

# MÜHENDİSLİK ALANINDA TEORİ VE ARAŞTIRMALAR II

EDİTÖR: DOÇ. DR. MİHRİBAN KALKANCI

**İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız**

**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel**

**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı**

**Editör / Editor • Doç. Dr. Mihriban Kalkancı**

**Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2020**

**ISBN • 978-625-7319-32-4**

**© copyright**

Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin  
almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Gece Kitaplığı.

Citation can not be shown without the source, reproduced in any way  
without permission.

**Gece Kitaplığı / Gece Publishing**

**Türkiye Adres / Turkey Address:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt. No: 22/A Çankaya / Ankara / TR

**Telefon / Phone:** +90 312 384 80 40

**web:** [www.gecekitapligi.com](http://www.gecekitapligi.com)

**e-mail:** [gecekitapligi@gmail.com](mailto:gecekitapligi@gmail.com)



**Baskı & Cilt / Printing & Volume**

Sertifika / Certificate No: 47083

# **Mühendislik Alanında Teori ve Araştırmalar II**

**EDİTÖR**

**Doç. Dr. Mihriban KALKANCI**





# İÇİNDEKİLER

## BÖLÜM 1

### PEYNİRDE İSTENMEYEN TAT: ACILIK

Bayram ÜRKEK, Mustafa ŞENGÜL ..... 1

## BÖLÜM 2

### SAĞIRKÖY -YARIKKAYA

### (YALVAÇ-İSPARTA) HAVZASININ JEOLJİK ÖZELLİKLERİ VE KÖMÜR POTANSİYELİ

Murat ŞENTÜRK ..... 29

## BÖLÜM 3

### BİR OTOMOTİV YAN SANAYİ İŞLETMESİNDE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMİ TASARIMI VE ÇOK AMAÇLI ÇİZELGELEME PROBLEMİ ÇÖZÜMÜ

Sena AYDOĞAN, Şafak KIRIŞ..... 45

## BÖLÜM 4

### ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE UZAY HARMONİKLERİ

Adem DALCALI, Serhat Berat EFE ..... 71

## BÖLÜM 5

### HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE UÇUCU KÜL KATKILARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİNE VE BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

İbrahim KODAK, Abdullah DEMİR..... 89

## BÖLÜM 6

### EKSENEL AKILI BİR STATORLU İKİ ROTORLU SENKRON GENERATÖRDE DEMAGNETİZASYON ARIZASININ TESPİTİ

Mehmet Recep MİNAZ ..... 115

## BÖLÜM 7

### DEVE SÜTÜ YAĞININ FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Okan EKMEK, Erman DUMAN ..... 129

## **BÖLÜM 8**

### **İNCE HAMMADDE İLE $Si_3N_4$ ÜRETİMİNDE GAZ BASINCININ TERMAL İLETKENLİĞE ETKİSİ**

Pınar UYAN ..... 147

## **BÖLÜM 9**

### **MİKROAKIŞKAN ÇİPLERİN BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI**

Ishak ERTUGRUL ..... 159

## **BÖLÜM 10**

### **ALANDA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZİLERİNE GENEL BİR BAKIŞ**

Ali Recai ÇELİK ..... 175

## **BÖLÜM 11**

### **YENİDEN MODÜLASYON PASİF OPTİK AĞLARDA FARKLI KOD TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

Nisa Nacar ÇIKAN, Mustafa ŞEKER ..... 187

## **BÖLÜM 12**

### **FARKLI YAPAY SİNİR AĞI TOPOLOJİLERİ KULLANILARAK FOTOVOLTAİK ÜRETİM TAHMİNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Mustafa ŞEKER, Nisa Nacar ÇIKAN ..... 201

## **BÖLÜM 13**

### **FARKLI BİYOMETRİ ÖZELLİKLERİ İLE CİNSİYET TANIMLAMA ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ**

Olca PALTA ..... 219

## **BÖLÜM 14**

### **FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEMLERİN PARAMETRE ÇIKARIMI İÇİN ÇÖZÜMLER**

Mehmet Fatih TEFEK ..... 239

## **BÖLÜM 15**

### **GÜNCEL METASEZGİSEL ALGORİTMALAR**

Mehmet Fatih TEFEK..... 255

## **BÖLÜM 16**

### **MİNERAL PUZOLANLARIN BETON VE ÇİMENTODA KULLANILABİLİRLİĞİNİN PUZOLANİK AKTİVİTE DENEYİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Yüksel Furkan YILDIRIM, Korkmaz YILDIRIM ..... 271

## **BÖLÜM 17**

### **TERMAL İLETKENLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE $Y_2O_3$ SİNERLEME YARDIMCISI İLE ÜRETİLMİŞ $Si_3N_4$ İÇİN ISIL İŞLEMİN ROLÜ**

Pınar UYAN ..... 287

## **BÖLÜM 18**

### **ŞEHİR İÇİ ULAŞIMDA ARA TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİNİN ÖNEMİ; BURSA DOLMUŞ SİSTEMİ ÜZERİNDEN BİR DEĞERLENDİRME**

Şafak BİLGİÇ ..... 299

## **BÖLÜM 19**

### **ÇELİK LİF VE KÖMÜR KÜLÜ KATKILI BETONUN DAYANIM ÖZELLİKLERİ**

Aylin AKYILDIZ..... 315

## **BÖLÜM 20**

### **FARKLI TİP ÇİMENTOLARDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN FARKLI KÜR KOŞULLARINDA ÖZELLİKLERİ**

Aylin AKYILDIZ..... 327

## **BÖLÜM 21**

### **MADENCİLİKTE PATLATMA, ÇEVRESEL ETKİ VE İŞ GÜVENLİĞİ Blasting, Environmental Impact and Work Safety in Mining**

Orkun KANTARCI..... 337

## **BÖLÜM 22**

### **KURŞUN İYONLARININ SULU ÇÖZELTİLERDEN *FICUS CARİCA* L.-ZEOLİT-ALJİNAT BİYOKOMPOZİTİYLE UZAKLAŞTIRILMASI**

Kadriye ESEN ERDEN, İbrahim DORUK, Meruyert KAYGUSUZ,  
Cem GÖK ..... 359

## **BÖLÜM 23**

### **GEOSENTETİK FONKSİYONLARINA VE ÇEŞİTLERİNE YÖNELİK BİR ANALİZ ÇALIŞMASI**

Gamze GENCER..... 377

## **BÖLÜM 24**

### **GEOSENTETİĞİN KARAYOLU YAPISINDAKİ UYGULAMALARI**

Gamze GENCER..... 395

## **BÖLÜM 25**

### **ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER**

Mehmet Arif KAYA..... 411

## **BÖLÜM 26**

### **HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ KÖTÜ ETKİLERİNİN AZALTILMASI**

Yıldırım ÖZÜPAK..... 431

## **BÖLÜM 27**

### **MATLAB GRAFİK KULLANICI ARAYÜZÜ (GUI) TABANLI OPTİK FİBER DAĞINIK ALGILAMALI SİSTEM SİMÜLATÖRÜ**

Abdurrahman GÜNDAY..... 445

## **BÖLÜM 28**

### **İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI MİKRODENETLEYİCİ DENETİMLİ KONTROL ÜNİTESİ PROTOTİPİ**

Olcay PALTA ..... 457

# Bölüm 1

## PEYNİRDE İSTENMEYEN TAT: ACILIK



*Bayram ÜRKEK<sup>1</sup>,  
Mustafa ŞENGÜL<sup>2</sup>*

---

1 Dr. Öğr.Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi, Şiran Mustafa Beyaz Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, bayramurkek@gumushane.edu.tr

2 Prof. Dr., Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, msengul@atauni.edu.tr



## 1. Giriş

Peynirin Mezopotamya Vadi'sinde çobanlar tarafından 10000 yıl önce bulunduğu tahmin edilmekle birlikte ilk nerede ve ne zaman üretildiği ile ilgili kesin bilgi bulunmamaktadır. Peynir, sütün konsantre hali olup birçok besin ögesini süte göre daha yoğun şekilde bulundurmaktadır (Emirmustafaoğlu ve Coşkun, 2012). Peynir, içerdiği %48 yağ, %23-25 protein ile birlikte karbonhidrat, kalsiyum, fosfor ve A ve B vitaminleri gibi diğer besin öğelerini içermesi nedeniyle en besleyici gıda ürünlerinden bir tanesidir (Cruz et al. 2011). Bu nedenle insanların beslenmesindeki yeri oldukça önemlidir (Emirmustafaoğlu ve Coşkun, 2012). Peynir gerek geçmişi ve gerekse 1000'den fazla çeşidi ile süt ürünleri arasında dikkat çekici bir yere sahiptir (Erbay, 2013). Peynir çeşitliliği ile ilgi olarak bazı kaynaklarda bu sayının 2000'den fazla (Okur ve Güzel-Seydim, 2011) bazılarında ise 4000 civarında olduğu ifade edilmektedir (Özer ve Hayaloğlu, 2011).

Süt endüstrisinde önemli bir yere sahip olan peynir üretimi için dünyada üretilen toplam sütün yaklaşık %40'ı kullanılmaktadır (Erbay, 2013). Dünyada olduğu gibi ülkemizde de üretilen sütün yaklaşık %40'ı gibi önemli bir kısmı peynir üretiminde kullanılmaktadır (Fişekçi, 2013). Ülkemizde 2016 yılında 657694 ton, 2017 yılında 687095 ton inek peyniri üretilmiştir. Toplam peynir üretimi ise 2018 yılında 753230 ton iken 2019 yılında bir miktar azalarak 696804 tona düşmüştür (TUİK, 2020). AB ülkelerinde 2018 yılında 10,3 milyon tona ulaşan peynir üretiminde toplam sütün %37,7'si kullanılmıştır (Eurostat, 2020).

Peynir dünya genelinde en çok tüketilen süt ürünlerinden birisi olup, peynir kalitesinin belirlenmesinde duyuşal özellikler önemli bir kalite unsurudur. Tüketiciler tarafından algılanan kalite peynir kalitesi olarak tanımlanmaktadır (Pripp et al. 2006). Acılık birçok peynir çeşidinde karşılaşılan genel lezzet problemlerinden birisidir. Özellikle mezofilik kültürlerle üretilmiş peynirlerde görülmektedir (Singh et al. 2005). Gıdalarla ilgili çalışmalarda temel amaç duyuşal analizle algılanan kalite ile gıda biyokimyası arasındaki ilişkiyi kurabilmektir (Pripp et al. 2006).

## 2. Gıdalarda Acı Tat

Acı tat, gıdalarda normal olarak bulanabildiği gibi bir reaksiyon sonucunda meydana gelebilmektedir (Koka and Weimer 2000). Tat duygusu, gıdaların tüketilmeden önce besinsel kalitesinin belirlenmesinde önemli bir rolü vardır. Günümüze birçok tadın varlığı tartışılrsa da, genel olarak tatlı, ekşi, tuzlu, acı, metalik ve umami olmak üzere altı temel tat kabul edilmektedir (Behrens and Meyerhof 2013; Niimi et al. 2014). Acılık ve ekşilik genellikle gıdalarda istenmeyen ve uzak durulan tatlardır. Çünkü bu tatlar bozulmuş, olgunlaşmamış gıdalarla ve gıdalardaki toksin içeriği

ile ilişkilendirilmektedir (Homma et al. 2012; Behrens and Meyerhof 2013). Birçok zehirli bileşik acı tada sahip olduğundan (Dong et al. 2009), acılık algısı toksinlerin insanlar ve hayvanlar tarafından vücutlarına alınmalarını engelleyebilmektedir. Metal iyonları, bazı amino asitler, peptitler ve bitkiler tarafından üretilen alkoloitler, fenoller, flavonoidler, isoflavonlar, terpenler gibi ikincil metabolitler, glukozinolatlar (Homma et al. 2012), toksinler ve değişik zehirler insanlar tarafından beğenilmeyen acı bileşiklerdir. Bunun yanında sağlığa olumlu etkilere sahip antioksidanlar gibi bileşiklerde acı tada sahiptir (Berre et al. 2013). Acı tat gıdalarda kahve, bira ve şarap gibi gıdalar dışında tercih edilen bir tat değildir (Homma et al. 2012; Berre et al. 2013; Newman et al. 2014). Acı tat insanlar tarafından beğenilmemesine rağmen, birçok fizyolojik öneme sahip farmasötik bileşikler de acı tada sahiptir. Bu nedenle gıda üretiminde ve farmakolojide acılığın maskelenmesi önemli bir sorundur (Homma et al. 2012; Berre et al. 2013). Acı tat bira ve bitter çikolata gibi gıdalarda istensede diğer birçok gıdada istenmemektedir. Bu gıdalardan bir tanesi de süt ürünleridir. Süt ürünlerinde proteinlerin hidrolize olması sonucu acı tat oluşmaktadır. Bu protein hidrolizatları; hidrolize olmayan proteinlerin çözünürlüğü, köpük ve jelleşme özelliğinin iyileştirilmesi, biyoaktif peptitlerin besinsel değerinin artırılması gibi birçok özelliğini etkilemektedir (Newman et al. 2014).

### 3. Peynirde Acılık Oluşumunda Etkili Faktörler

Lezzetli bileşiklerin istenen dengede olması peynirin kalitesi ve tat kusurları için önem arz etmektedir. Peynirde görülen kötü tadın en genel örneği acılıktır. Süt ürünlerinde acılığı birincil ve ikincil proteoliz düzeyinin dengesizliği meydana getirmektedir. Acılık, aşırı proteoliz ve peptoliz sonucu oluşan acı peptitlerin toplanmasından meydana gelmektedir (Fallico et al. 2005). Yani proteoliz sonucu küçük ve orta büyüklükteki hidrofobik peptitler oluşmakta ve peynirde brikmektedir. Bu peptitler potansiyel olarak peynirde acı tat oluşmasına katkıda bulunmaktadır (Fallico et al. 2005; Ertekin ve ark. 2009).

Acı peptitler koagülant ve mikrobiyal proteinazların faaliyetleri neticesinde  $\alpha_{s1}$  ve  $\beta$  kazeinin belirli bölgelerinden ayrılan hidrofobik peptidler sonucu meydana gelirler. Bu hidrofobik peptitler normal olarak peynir üretimi ve olgunlaşma süresince oluşurlar ve hafif bir acı tadın oluşmasına neden olurlar. Bu durum bazen peynirlerin olgunlaşmasında istenebilir. Acı peptitlerle beraber acı olmayan peptitler mikrobiyal peptidazlar tarafından aynı oranlarda üretilir. Bu durumda acı peptitlerin aşırı üretiminden kaçınılmalıdır. Bununla birlikte, acı peptitlerin konsantrasyonu aşırı üretim ve yetersiz parçalanma sonucu belirli bir eşige ulaştığı zaman peynirde acı tat algılanmaya başlar (Fallico et al. 2005). Peynirde acılaşmaya neden olan faktörlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.



### 3.1. Proteoliz

Olgunlaştırma işlemiyle peynirlerin kendine özgü tat-aroma ve tekstüre sahip olması sağlanmaktadır (Çelik ve Uysal, 2009; Ertekin ve ark. 2009; Erdoğan ve Baran 2012). Peynirin olgunlaşması sırasında glikoliz, proteoliz ve lipoliz olmak üzere başlıca 3 temel biyokimyasal olay meydana gelmektedir (Ong et al. 2007; Çelik ve Uysal 2009; Albenzio et al. 2010; McSweeney 2004). Proteoliz, çoğu peynir çeşidinin olgunlaşması boyunca meydana gelen başlıca ve en kompleks biyokimyasal olaydır (Ertekin ve ark. 2009; Ferrandini et al. 2011; Addis et al. 2008; Hayaloglu et al. 2008). Peynirlerde aminler, amonyak, sülfürlü bileşikler ve uçucu yağ asitleri nedeniyle meydana gelen lezzet değişiminden proteoliz sorumludur (Ferrandini et al. 2011; Addis et al. 2008).

Proteoliz peynirlerde doğrudan lezzet oluşumu etkiler ve hatta peptilerin ve amino asitlerin serbest kalması sonucu aşırı acılık gibi olumsuz tatların oluşmasında neden olabilmektedir (Delgado et al. 2010; Bas et al. 2019). Biyokimyasal reaksiyonların peynirde istenen lezzet ve tekstürün oluşması için dengeli ve kontrollü olması gerekmektedir (Albenzio et al. 2010; McSweeney 2004). Peynirde proteolize sütte bulunan enzimler, koagülantlar, starter kültür bakterileri ve bunların enzimleri, starter olmayan bakteriler (McSweeney 2004; Upreti et al. 2006; Ong et al. 2007; Çelik ve Uysal 2009; Ertekin ve ark. 2009; Albenzio et al. 2010; Delgado et al. 2010; Erdoğan ve Baran 2012) ve dışarıdan ilave edilecek olgunlaşmayı hızlandıran proteinaz ve peptidazlar ile sekonder kültürler (Delgado et al. 2010; Erdoğan ve Baran 2012) neden olmaktadır. Bu enzimlerin  $\alpha_{s1}$ -,  $\alpha_{s2}$ -,  $\beta$  ve  $\kappa$ -kazeinleri hidrolize etmesiyle orta ve büyük peptitler oluşmaktadır. Bu biyokimyasal olaylar peynirin tat ve aromasının oluşumunda etkilidir (Ong et al. 2007). Özellikle peynirlerde meydana gelen keskin acılık  $\beta$ -kazein kaynaklı olmaktadır (Karametsi et al. 2014).

Peynirin kalitesi istenilen tekstür ve lezzet ile yakından ilişkilidir. Proteoliz, olgunlaşmış peynirlerde tekstür ve lezzetin belirlenmesinde önemli rol oynar (Fallico et al. 2005). Proteoliz protein ağının kırılması, lezzetin oluşumu süresince serbest amino asitlerin ve katabolik ürünlerin serbest kalması sonucu tektstürdeki değişikliklerle kendini gösteren peynir olgunlaşmasındaki ana süreçtir (Çelik ve Uysal 2009; Albenzio et al. 2010; Jacob et al. 2010). Özellikle ilk proteoliz kazein zincirleriyle alakalı olup, koagülant ve plazmin aktivitesiyle gerçekleşir. Rennetin kazein fraksiyonları üzerinde farklı görevleri olup ve  $\alpha$ -kazein  $\beta$ -kazeinden daha fazla proteolize maruz kalmaktadır. İlk proteoliz ise  $\alpha_{s1}$ -kazeinin hidrolitik fraksiyonlarındaki parçalanmalarla kendini gösterir (Albenzio et al. 2010). Oluşan düşük molekül ağırlıklı peptitlerin miktarındaki artış peynirlerde acılık gibi tat-aroma bozuklukları olarak kendini göstermekte olup (McSweeney 2004; Çelik ve Uysal 2009; Jacob et al. 2010) kazein

proteolizinin artmasıyla  $\alpha_s$ - ve  $\beta$ -kazeinden parçalanarak acı peptitlerin yüksek miktarlara ulaşmasıyla meydana gelir (Jacob et al. 2010). Buna karşın lipolizin peynirlerde meydana acılıktan sorumlu olmadığı bildirilmektedir (Santillo et al. 2012).

$\beta$ -kazeinin C-terminal bölgesine bağlı (f1-189/192), (f193-209) ve (f190-209) çok hidrofobik peptitler olup peynirde acılığa sebep olan peptitlerdir (Bansal et al. 2009b). Birçok peynirde acılığın başlıca kaynağı kimozinin  $\beta$ -kazeini hidrofobik C-terminal bölgesinden f193-209 (Møller et al. 2013a, b) ve  $\alpha_{s1}$ -kazeinin f1-9 kısmından bölünmesi sonucu oluşan peptitlerin toplanmasıdır (Lemieux and Simard, 1992). Aşırı  $\beta$ -kazein toplanması ise acılığın temel kaynağı olarak gösterilmektedir. Acılığa neden olan amino asitler lösin, fenilalanin, lizin, valin (Kabelová et al. 2009; Andersen et al. 2010; Møller et al. 2013b), arginin, histidin (Andersen et al. 2010) ve treonin olarak verilebilir (Møller et al. 2013b). Olgunlaştırılan peynirlerde olgunlaştırma sonrasında 16 tane acı peptit oluştuğu, bunların 12 tanesinin düşük konsantrasyonlarda dahi acı tada neden olduğu ve 11 tanesinin  $\beta$ -kazein kaynaklı olduğu bildirilmektedir (Toelstede and Hofmann, 2008).

### 3.2. Mikroorganizmalar

Olgunlaşma sırasında farklı miktarlarda acı peptitler oluşmasının sebebi starter olan ve olmayan bakteriler farklı proteolitik özelliklere sahip olmalarıdır (Koka and Weimer 2000). Peynirlerde acılık özellikle mezofilik kültürlerle üretilen peynirlerde görülmekle birlikte acılığın oluşmasının nedeni hidrofobik amino asit kalıntıları içeren acı peptitlerin üretilmesidir (Tejada et al. 2007). Zayıf süt hijyeni ve üretimdeki diğer problemler peynirin tüketiciler tarafından kabulünü sınırlar ve ürünün pazarlanabilirliğini azaltır (Fallico et al. 2005). Peynir kalitesi;

- ✓ çiğ sütün mikrobiyal profiline ve yüküne,
- ✓ pastörizasyondan sonra sütte canlı kalan süt mikroflorasına,
- ✓ peynir fabrikasındaki mikrofloraya,
- ✓ peynire eklenen starter kültür aktivitesine ve asitlik profiline,
- ✓ peynir üretim teknolojisine,
- ✓ peynirin bileşimine ve
- ✓ olgunlaşma süresince sıcaklık ve çevreye bağlı olarak etkilenmektedir (Sheehan 2013).

Acı tat peynirlerde peynir yapımında ve özellikle olgunlaşma sürecinde kazein hidrolizinden oluşan acı peptitlerin neden olduğu genel kalite eksiklerinden bir tanesidir (Koka and Weimer 2000; Agboola et al. 2004). Acı peptitler  $\alpha_{s1}$ - ve  $\beta$ -kazeinin parçalanmasının artmasıyla oluşan

kazein hidrolizatlarından meydana gelir (Agboola et al. 2004). Peynirde acı peptitlerin oluşumunda iki temel faktör katkıda bulunur. Bunlar laktokokal proteazlar ve rennettir. Proteazlar starter bakteriler tarafından üretildiği gibi (Koka and Weimer 2000) starter olmayan bakteriler de etkili olup (Agboola et al. 2004)  $\beta$ -kazeinden acı peptitler oluştururlar (Koka and Weimer 2000). Rennetin yanında diğer proteazlar da önemli rol oynarlar (Agboola et al. 2004).

Buzağı renneti veya *Rhizomucor miehei*'den elde edilen ticari mikrobiyal renneti kullanılarak üretilen Gouda peynirlerde olgunlaşma sonrasında mikrobiyal rennetle üretilen peynirlerin acılığı artmaktadır. Acılığın artışı ise, acı peptit üreten bakteriler tarafından kazeinin parçalanma ürünleri olan hidrofobik peptitler ile aromatik amino asit kalıntılarının yüksek oranlara ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Mikrobiyal enzimle üretilen Gouda peynirlerinin acılığının önemli oranda artmasından, peynirlerin uzun süre olgulaştırılması sırasında kazeinin parçalanmasının artması sorumludur (Jacob et al. 2010).

Yağı azaltılmış peynirlerde acılığı azaltmak amacıyla ekzopolisakkarit (EPS) üreten kültürlerin ve ultrafiltrasyon (UF) tekniğinin peynir üretiminde kullanılması peynirlerde acılığı azalmaktadır. Peynirde oluşan acılık ise starter kültürlerin zayıf peptolitik aktivitesi ve yüksek kimozen kalıntısı nedeniyle toplanan peptitlerden kaynaklanmaktadır (Agrawal and Hassan, 2007). *Penicillium camemberti* LMA-1029 ve *Geotrichum candidum* LMA-1028 (*G. candidum*) starter kültür olarak Camembert tipi peynirlerin üretiminde kullanıldığında *G. candidum* peynirlerdeki acılığı azaltmaktadır (Lessard et al. 2014).

### 3.3. Psikrotrof ve Psikrofilik Bakteriler

Proteolize, sütte bulunan proteazlar ve soğukta depolanan sütlerde gelişen psikrofilik mikroorganizmalar tarafından üretilen proteazlar neden olmaktadır (Koka and Weimer 2000; Ismail and Nielsen 2010). Çiğ ve pastörize sütlerin uzun süre soğukta depolanması psikrotropların gelişmesini artırır veya plazmin sistemini etkiler (Ismail and Nielsen 2010). Sütte gelişen psikrotrop bakterilerin proteaz aktiviteleri sonucu  $\beta$ -kazeinin C terminal bölgesinden ve  $\alpha_{s1}$ -kazeinden kopan hidrofobik peptidler acılığın oluşmasına neden olabilmektedir. *Pseudomonas fluorescens* ve *P. putrefaciens* tarafından üretilen bu enzimler sıcaklığa dayanıklı ve pastörizasyon sıcaklığından etkilenmezler ve sonuç olarak peynirin olgunlaşması süresince acı tat oluşur (Sheehan 2013). Psikrotrop bakteriler tarafından sıcaklığa dayanıklı proteazlar üretilmekte (Koka and Weimer 2000; Ismail and Nielsen 2010) ve bunlar kazein misellerin yapılarını bozarak peynir kalitesinin düşmesine ve üretilen küçük peptitler nedeniyle de peynirde acı tat oluşumuna katkıda bulunmaktadır (Ismail and Nielsen 2010). Mikrobiyal kaynaklı asit proteazlar peynirlerde

acılığı arttırmaktadır. Proteolitik enzimler doğrudan peynir pıhtısına eklenebilmektedir. Bunun yanında süte ilave edilen farklı protezlar ve peptidaz karışımları peynirde istenen tadı artırırken, acılığı azalttığı bildirilmiştir (Koka and Weimer 2000).

Peynir yapımında kullanılacak olan sütün yüksek hijyen kalitesine sahip olması ve uygun koşullarda depolanması ile peynirde acılıktan sorumlu olan psikrofilik bakteriler gibi bakterilerin kontaminasyonu en aza indirilebilir (Fallico et al. 2005).  $\alpha_{s1}$ -kazein (f1-9) ve  $\beta$ -kazein (f193-204)'den oluşan acı peptitlerin bulunduğu Cheddar peynirine *Pseudomonas yuorescens* RO98'den elde edilen saf proteazlar ilavesi sonucu 90 dakikada  $\alpha_{s1}$ -kazein (f1-9)'un %50'si ve  $\beta$ -kazein (f193-204)'ün tamamını diğer hidrolitik ürünlere çevirerek, acılığı giderilmektedir (Koka and Weimer, 2000).

### 3.4. Laktik Asit Bakterileri

Peynirin olgulaşması süresince biyokimyasal olayların yanında mikrobiyolojik olaylar da meydana gelmektedir. Mikrobiyolojik değişimler peynirin olgunlaşması süresince starter mikroorganizmaların ölmesi ve lize olması, ikincil mikrofloranın gelişmesi gibi birçok değişimlerle kendini göstermektedir (McSweeney 2004). Peynir yapında kullanılan starter kültür proteoliz üzerinde etkilidir. *Lactobacillus helveticus*'un (*Lb. helveticus*) bazı suşları hücreler arası yüksek peptidaz aktiviteye sahiptir ve peynirde hızlıca otoliz olurlar. Böylece acı peptitlerin parçalanması hızlanır ve serbest amino asitler ortaya çıkar (Møller et al. 2013a). Peynire laktobasil eklendiğinde proteoliz ve lezzet yoğunluğu artmaktadır. Çünkü belirli probiyotikler tarafından üretilen proteolitik enzimler acı peptitleri parçalayabilmektedir (Ong et al. 2007; Albenzio et al. 2010). Diğer taraftan ise laktokokların ürettiği proteinaz ve rennet Cheddar peynirinde kazeinlerden acı peptitlerin oluşumundan sorumludur (Ong et al. 2007).

Özellikle *Lb. acidophilus* ve *Bifidobacterium longum* (*B. longum*) ile *Bifidobacterium lactis* (*B. lactis*) karışımının rennette yeterli düzeyde bulunması ile koyun peynirlerinde daha fazla proteoliz ve lipoliz meydana gelmektedir (Albenzio et al. 2010; Santillo et al. 2007a,b; 2009). Kuzu renneti ile *B. longum* ile *B. lactis*'in karışımıyla üretilen Pecorino peynirlerinde kazein parçalanmaları, dolayısı ile proteolizin daha yüksek olmaktadır (Santillo and Albenzio 2008). Peynir yapımında starter olarak kullanılan laktik asit bakterileri (LAB) proteinaz ve peptidaz gibi enzimler için önemli bir kaynaktır. LAB peynirin olgunlaşmasına katkıda bulunduğu gibi peynirin tekstür ve duyuusal özellikleri üzerine önemli etkisi vardır (Sridhar et al. 2005; Ávila et al. 2006). LAB asit bakterilerinin lize olması sonucu hücre içi enzimler ortaya çıkacak ve peynirin olgunlaşması hızlanacaktır. Özellikle LAB bakterilerini lize edecek bakteriyosin üreten kültürler kullanılmalıdır (Ávila et al. 2006).

Peynirde acılık tüketicilerin kabulünü sınırlandırmaktadır. *Lactococcus lactis* tarafından üretilen hücre dışı bir enzim olan laktosepinin peynirde acılık üzerinde önemli rol oynamaktadır. Peynirlerde laktoseptin a, e ve h üreten izogenlere sahip *Lactococcus lactis*'in üretimde kullanılması peynirlerde acılığı arttırmaktadır. Bu nedenle peynir üretiminde proteinaz negatif izogen içeren *Lactococcus lactis* kullanılmalıdır (Broadbent et al. 2002). Peynir üretiminde nisin Z ve laktisin 481 üreten *Lactococcuslactis* ssp. *lactis* INIA 415 kullanarak üretilen peynirler daha düşük peptit içermekte ve proteolizi daha fazla olmaktadır. Hidrofobik peptilerin hidrofilik peptilere oranı acılık için önemli bir gösterge olup ve bu nedenle de bakteriyosin içeren peynirlerin acılığı düşmektedir (Ávila et al. 2006). Peynirlerde olgunlaşma şartlarında acılığa neden  $\beta$ -kazein (f193-209) ve  $\alpha$ -kazeinin f1-9, f1-13 ve f1-16 fraksiyonları *L. helveticus* CNRZ32 tarafından üretilen endopeptidazlardan pepO2 ve pepO3 peynirde acılığı gidermektedir. pepO2 ve pepO3  $\beta$ -kazein (f193-209),  $\alpha$ -kazein (f1-9) ve  $\alpha$ -kazein (f1-13) fraksiyonları üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle peynirde acılığı gidermede kullanılabilirler (Sridhar et al. 2005).

*Lb. acidophilus* LA-5 ve *Bifidobacterium longum* 46 ile *Bifidobacterium lactis* BB-12 karışımının bulunduğu rennet ile üretilen koyun peynirlerinin  $\alpha$  ve  $\beta$ -kazeinin fraksiyonlarında meydana gelen başlıca kırılmalar sonucu birincil proteolizin daha fazla meydana gelmektedir. Bunun sonucunda probiyotik peynirlerin duyusal puanları geleneksel olarak üretilenlerden daha yüksek puanlar almaktadır (Albenzio et al. 2010). Peynirde üretiminde *Lb. acidophilus* LA-5 ve *Bifidobacterium longum* 46 ile *Bifidobacterium lactis* BB-12 karışımının kullanılması peynirlerde acılığı arttırmaktadır (Albenzio et al. 2013).

$\beta$ -kazeinin parçalanmasıyla oluşan acı peptitlerin *L. lactis* ssp. *lactis* 303, *L. lactis* ssp. *lactis* 527, *L. Lactis* ssp. *lactis* IAM 1198, *L. lactis* ssp. *cremoris* SK11, *L. lactis* ssp. *cremoris* AM2, *L. lactis* ssp. *cremoris* HP, *L. lactis* ssp. *cremoris* 317, *L. lactis* ssp. *cremoris* H61 ve *L. lactis* ssp. *cremoris* IAM1150 tarafından oluşturulan peptidazlar tarafında parçalanabilmektedirler. *L. lactis* ssp. *cremoris* SK11, *L. lactis* ssp. *cremoris* AM2 ve *L. lactis* ssp. *lactis* 527 tarafından üretilen peptidazların acı peptileri parçalayabilme özelliği daha yüksektir. Özellikle *L. lactis* ssp. *lactis* 527 starter olarak kullanılmasıyla peynirlerde acılığın giderilebileceği bildirilmektedir (Shimamura et al. 2009). Peynirlerde *Lb. acidophilus*, *Lb. casei*, *Lb. paracasei* ve *Bifidobacterium* sp. probiyotik kültürlerin kullanılması proteolizin artmasına bağlı olarak acılığında arttırmaktadır. *Lb. casei* 279 ile üretilen peynirlerde acı tat düşmektedir. Tuz/nem oranının en düşük olduğu peynirlerde ise acılık artmaktadır (Ong et al. 2007). Peynir üretiminde deve kimozinin kullanılması birinci olarak  $\beta$ -kazeinden (f93-209) ve ikinci olarak  $\alpha_{s1}$ -kazeinde (f1-9) oluşan acı peptitlerin oluşumunu önemli oranda düşürmektedir (Bansal et al. 2009b; Børstin et al. 2012;

Møller et al. 2013a). Diğer taraftan ise *Lb. helveticus* CHCC 4481'in acı tada neden olan peptileri paçalayabilmektedir (Møller et al. 2013a). Deve kimozi ve 0-Lb (*Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris* ve *Lb. delbrueckii*) kültür ile üretilen peynirler daha az acılık göstermektedir (Børstin et al. 2012).

İnek ve bufalo sütünden peynir üretiminde *Lactococcus lactis* ssp. *cremoris* ve *Lactococcus lactis* ssp. *lactis* kullanılması acılığın yoğunluğu ticari kültürle üretilen peynirlere göre daha düşük olmaktadır (Murtaza et al. 2013). Ticari kültürün peynir üretiminde kullanılması ve olgunlaşma süresi genel olarak peynirlerde acılığı arttırmaktadır. Acılığın artmasında starter kültürler tarafından üretilen proteolitik enzimlerin neden olmaktadır (Shakeel-Ur-Rehman et al. 2008). Peynir üretiminde starter kültür olarak kullanılan *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *diacetylactis*, *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus helveticus* peynirlerde oluşan acılığı arttırmakta. Bunda da bu bakteriler tarafından oluşturulan proteolitik enzimlerle hızlı şekilde acı peptilerin üretilmesidir (Kvėtoslava et al. 2019). Nisin Z üreten *Lactococcus lactis* (*L. lactis*) LL59 ile *L. lactis* ATCC11454 peynir üretimine kullanılması peynirlerde acılığı düşürken, nisin Z üreten *L. lactis* LL56 ve LL63 peynirlerde oluşan acılığı arttırmaktadır (Kondrotienė et al. 2019).

### 3.5. Enzimler

Peynirdeki proteolitik parçalanma, para-κ-kazeini pıhtıda kalan rennet ve/veya plazmin kalıntılarının parçalamasıyla başlar ve laktik asit bakterileri ve/veya ikincil mikrobiyal floranın ürettiği proteazlarla devam eder. İlk proteolizde kullanılan rennetin tipi önemli rol oynar. Farklı tiplerde rennetler ticari olarak kullanılabilir. Bu farklılık kaynağına göre (hayvansal, bitkisel, mikrobiyal ve rekombinant rennet), ya da fiziksel durumuna göre (sıvı, toz ya da macun) olmaktadır. Genel olarak kullanılan buzağı renneti sıvı ve toz formdadır. Bununla birlikte Ortadoğu'da bazı peynir çeşitlerinin üretiminde kuzu ve oğlak rennetleri kullanılmakta ve bunlar lipolitik enzimler içermesi nedeniyle enzim kompozisyonunda farklılıklar göstermektedir (Ferrandini et al. 2011; Addis et al. 2008).

Peynir pıhtısında kalan kimozi olgunlaşma boyunca proteolize temel katkı sağlayan önemli bir faktördür (Soeryapranata et al. 2008; Bansal et al. 2009b). Rennetteki kimozi ve diğer enzimlerin temel rolü kazeinin yapısını bozmak ve böylece sütün pıhtılaşmasını sağlamaktır. Peynir pıhtısında kalan az miktardaki koagülant birçok peynir çeşidinin olgunlaşmasına katkıda bulunur. Rennet aktivitesi sonucu oluşan küçük peptitlerin doğrudan peynirin lezzetini etkiler. Rennet aktivitesi sonucu oluşan peptitler ise mikrobiyal proteinazlar ve peptidazlar tarafından küçük peptitlere ve amino asitlere parçalanır. Olgunlaşma süresince koagülant



tarafından üretilen peptitler istenen lezzetin oluşumuna etki ettiği gibi koagülant aşırı aktivite gösterirse acılığa neden olmaktadır (Bansal et al. 2009a). Kimozinin öncelikli aktivitesi  $\alpha_{s1}$ -kazeine olup  $\alpha_{s1}$ -kazeinde f1-23 ve f24-199 oluşturur.  $\alpha_{s1}$ -kazein f1-23 peptidi starter proteinazlar tarafından parçalanır ve bu peptitten oluşan f1-7, f1-9, f1-13, f11-14, f14-17, f17-21 ve f21-23 fraksiyonları acılığın tespit edilmesini sağlamaktadır. Acı peptitlerin olgunlaşma süresince toplanması sonucu peynirde acılık meydana gelebilmektedir (Soeryapranata et al. 2008). Koagülantın peynir pıhtısında tutulma düzeyi bazı faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bunlar sütün kazein miktarına, farklı kazeinlerin oranına, kazein miselinin büyüklüğüne, sütün iyonik gücüne, süte uygulanan sıcaklığa, rennet eklenmeden önce sütün asitliğine, peyniraltı suyunun uzaklaştırıldığı pH'ya, pişirme sıcaklığına, peynirin olgunluğu ve nemine bağlı olarak değişmektedir. Peynir pıhtısında tutulan rennetin miktarı rennette bulunan enzimlerin oranı ve tipi, enzimin pH stabilitesi ve peynir yapımında uygulanan sıcaklık, enzimin kazeinlere bağlanma pH'sı etkilidir (Bansal et al. 2009b).

$\alpha_s$ -kazeinin hidrolizi peynirde acı tattan sorumludur. Kazeinin kontrolsüz parçalanması sonucu acı peptitler oluşur ve bu peptitler fazla miktarda biriktiği zaman acı tat meydana gelmektedir. Özellikle bakteriyel kaynaklı pıhtılaştırıcı enzimlerin peynir yapımında kullanılması sonucu yüksek miktarda acı peptit üretmesi nedeniyle uygun değildir. Acılığın şiddeti genellikle hidrofobik acı peptitlerin konsantrasyonuyla alakalıdır. Sığır kimozini mikrobiyal pıhtılaştırıcı enzimlere göre daha düşük  $\beta$ -kazeini parçalama aktivitesine sahiptir. Mikrobiyal pıhtılaştırıcılar sığır rennetiyle üretilen yarı sert peynirlere göre olgunlaşma sonrası acı tadı arttırmaktadır (Jacob et al. 2011).

Birçok peynirde proteolitik enzimlerin başlıca kaynağı peyniraltı suyunun uzaklaştırılması sırasında pıhtıda kalan koagülant enzimlerdir ki bu da genellikle kimozindir. Koagülant aktivitesi pıhtıda kalan enzimin çeşidi, peyniraltı suyunun uzaklaştırıldığı pH ve sıcaklığa bağlı olarak %30'a kadar çıkmaktadır. Kimozin  $\beta$ -kazeini hidrofobik bölge yakınlarında (Leu<sub>192</sub>-Tyr<sub>193</sub>) parçalamakta, bu da kısa hidrofobik peptitlerin oluşmasına neden olarak peynirde acı tadı oratya çıkarırlar. Kimozinin asıl aktivitesi  $\alpha_{s1}$ -kazeinin Phe<sub>23</sub>-Phe<sub>24</sub> bağları arasından keserek küçük peptitlerin oluşmasında etkilidir.  $\alpha_{s2}$ -kazein kimozinin hidrolizine karşı  $\alpha_{s1}$ -kazeinden daha dirençlidir. Diğer taraftan  $\alpha_{s2}$ -kazeinin kimozin tarafından parçalanabilecek hidrofobik bölgeleri kısıtlıdır. Para- $\kappa$ -kazein potansiyel olarak kimozin tarafından parçalanabilecek bazı bölgeleri bulunsa da, peynirde hidrolizi görülmemektedir (McSweeney 2004).

Rennetin peynirde kalan miktarı yüksekse  $\alpha_{s1}$ - ve  $\beta$ -kazeinden acı peptitler üretebilir ve önemli ölçüde peynirde acılığa neden olabilir. Süt

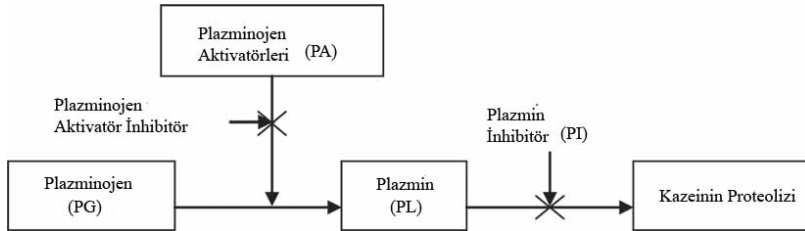
koagülantları peynirde acılık algısını iki yolla etkileyebilir. Birinci yol, kazeinin parçalanmasıyla oluşan ürünlerin acı peptit üreten bakteriler tarafından kullanılmasıdır. İkinci yol ise, lezzet peptitleri ve amino asitlerinin üretilmesiyle peynirde acı tadı maskeleyebilir. Peynirde acılık ile 165-6500 g/mol molekül ağırlığına sahip peptitlerin miktarı arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır (Agboola et al. 2004).

### 3.6. Plazmin

Sütte endojen proteolizin plazmin ve somatik hücre proteazları olmak üzere başlıca 2 kaynağı vardır (Olives et al. 2011; Moussaoui et al. 2002). Plazmin ve katepsin D gibi bazı proteolitik enzimler sütte doğal yapısında bulunmakla birlikte sütte ve peynirde önemli rol oynarlar (Albenzio et al. 2009). Plazmin ise diğerlerinden baskın bir enzimdir. Plazminin indüklediği proteoliz süt ürünlerinin tipine bağlı olarak süt ürünlerinin lezzetinde ve tekstüründe olumlu ve olumsuz etkilere sahiptir. Peynirde proteinlerin parçalanmasına yardım ederek istenen lezzetin oluşmasına katkıda bulunabildiği gibi kontrolsüz proteoliz süt ürünlerinin kalitesinde kayıplara neden olabilmektedir (Ismail and Nielsen 2010). Plazmin, plazminojen ve sistemi aktive ve inhibe eden maddelerden oluşan karmaşık bir sistemdir (Albenzio et al. 2009; Ismail and Nielsen 2010; Erdoğan ve Baran 2012; Şekil 1). Plazmin  $\beta$ -kazeini parçaladığı (Olives et al. 2011; Moussaoui et al. 2002) ve plazminin kazeinleri parçalamaındaki öncelik  $\beta$ -kazein= $\alpha_{s2}$ -kazein >  $\alpha_{s1}$ -kazein olarak sıralanmakla birlikte  $\kappa$ -kazeinin dirençli olduğu ifade edilmiştir (Erdoğan ve Baran 2012). Plazminin neden olduğu hidrolizi;

- ✓ sıcaklık,
- ✓ pH,
- ✓ mineral madde içeriği,
- ✓ serum proteinleri ve
- ✓ depolama sıcaklığı etkilemektedir (Ismail and Nielsen 2010).

Bu sistem kazeinlerin parçalanmasında, peynir veriminin düşmesinde ve peyniraltı suyunda proteoz-pepton kayıplarında önemli rol oynarlar (Albenzio et al. 2009).



Şekil 1. İnek sütündeki plazmin sistemi (Ismail and Nielsen 2010)



Somatik hücre sayısının artması ile mastitisli sütlerde artan proteolitik aktivite sonucu kazein hidrolizi ve bunun sonucunda süt ürünlerinin kalitesi ve veriminde düşme meydana gelmektedir. Somatik hücrelerdeki lizozomlar değişik proteolitik enzimler içermektedir (Olives et al. 2011; Moussaoui et al. 2002). Sütte bulunan somatik hücrelerle ilişkili diğer enzimler ise elastas, katepsin ve kolajenazdan oluşan proteolitik enzimlerdir (Albenzio et al. 2009). Kazeinin D  $\alpha_{s1}$ -,  $\alpha_{s2}$ -,  $\beta$ - ve hatta  $\kappa$ -kazeini parçalamaktadır (Moussaoui et al. 2002; Albenzio et al. 2009; Olives et al. 2011). Diğer bir enzim elastas ise  $\alpha_{s1}$ -kazeini hidrolize edebilmektedir. Proteoz-pepton da  $\beta$ -kazeinin proteolizden sorumludur (Olives et al. 2011; Moussaoui et al. 2002). Sütte doğal bulunan ve sütün içindeki mikroorganizma ve somatik hücrelerden kaynaklanan enzimler sütün kalitesine önemli katkıda bulunmaktadır. Bu enzimler de proteinlerin ve yağları parçalanmasında rol oynadıkları gibi peynir kalitesine zarar vermektedirler (Albenzio et al. 2009). Proteolitik enzimler peynirin tekstür ve istenen lezzetin gelişmesinde etkili olduğu kadar acı tat gibi tatların gelişmesinde de önemli rol oynarlar (Hayaloglu et al. 2008).

Sütlerin depolama süresince meydana gelen proteoliz sonucu küçük peptitlerin miktarında bir artış olur ve bu durum acılığın gelişmesine neden olur. Düşük bakteri sayısına sahip çiğ sütlerde proteolitik aktivitenin başlıca nedeni plazmindir. Plazmin aktivitesi ise artan somatik hücre sayısı ile birlikte artmaktadır. Sütte proteoliz için ana substrat kazeindir. Plazmin  $\alpha_{s1}$ -,  $\alpha_{s2}$ - ve  $\beta$ -kazein üzerinde etkili olan önemli bir proteozdur. Mastitis süresince plazminle birlikte plazminojen miktarı artmaktadır. Plazmin normal sütte birçok proteolitik aktiviteden sorumlu enzimdir (Santos et al. 2003).

### 3.7. Koagülantlar (Pıhtılaştırıcı enzimler)

Peynir yapımında fazla miktarda koagülantların kullanılması pıhtıda tutulan koagülant miktarını arttıracak ve  $\alpha_{s1}$ -kazeini daha fazla parçalayacaktır. Bu parçalanma olgunlaşmanın ilk aşamalarında etkili olurken artan olgunlaşma süreciyle etkisi azalmaktadır (Erdoğan ve Baran 2012). Rennet, sütte doğal olarak bulunan ve mikrofloradan kaynaklanan proteolitik enzimler ilk olarak kazein ağından peptitleri koparır. Bu büyük ve orta peptitler peynirin istenen yapısı üzerinde doğrudan etkili iken, dolaylı olarak da peynirin lezzet oluşumunu etkilemektedirler. Mikrobiyal peptidazlar büyük ve orta peptitleri daha küçük peptitlere ve serbest amino asitlere parçalar. Bu parçalanma peynirin lezzet ve tadı üzerinde etkilidir. Peynirin ana tadının oluşumuna daha çok düşük molekül ağırlıklı bileşikler (<500 Da) katkıda bulunabilmektedir. Bununla birlikte serbest amino asitlerin aldehitler, fenoller, alkoller, asitler, eter ve sülfürlü bileşiklere dönüşmesi neticesinde peynirin kendine özgü lezzeti oluşmaktadır (Fallico et al. 2005).

Peynir endüstrisinde genellikle sıvı ve toz buzağı rennet kullanılmaktadır. Ticari sıvı rennetler lipolitik enzimler içermezken, kuzu renneti mide esterazları içermektedir. Bu da peynirin tadında değişikliklere neden olmaktadır. Kuzu rennetinde koagülant enzimler, lipaz ve diğer enzimler bulunmaktadır. Kuzu renneti buzağı rennetine göre daha kompleks bir yapıya sahiptir (Ferrandini et al. 2012).

Acılık peynirlerde genel bir tat kusurudur. Bu kusur hidrofobik peptilerin toplanması sonucunda acılık hissinin tat eşliğinin üzerine çıkmasıyla ortaya çıkar. Bu peptitlerin peynir olgunlaşma süresince oluşumu doğrudan hücre proteinazları ve kimozin ile ilgilidir (Sridhar et al. 2005). Peynir üretiminde kuzu renneti kullanımı peynirlerde acılığı arttırmaktadır (Virto et al. 2003; Ferrandini et al. 2012). Bu acı tadın kuzu rennetinin daha fazla lipolitik aktiviteye sahip olması ve özellikle bütirik asit gibi kısa zincirli yağ asitlerinin miktarının artmasıyla ilgilidir (Ferrandini et al. 2012). Kısa ve uzun zincirli yağ asitleri acı tat kaynağı olabilirler (Evans et al. 2010).

Peynirlerde tuzlama zamanı ve koagülantların miktarı acı tadın oluşmasına katkıda bulunan olası faktörlerdir. Acı peynirlerde tuz ve tuz/nem oranının yüksek olmasının nedeni salamurada kalma zamanının aşırı uzun oluşuyla açıklanabilmektedir. Bununla birlikte nem içeriği ve su aktivitesi düşer, mikrofloranın enzimatik aktivitesi sınırlanır ve bunun sonucunda ikincil proteolizin oranı düşmektedir. Acı peynirlerde tuz kimozinin neden olduğu proteolizde istenmemesine rağmen, kazeinler rennetin aktivitesi ile hemen hemen parçalanır. İstenilen miktardan daha fazla rennet kullanımı hidrofobik peptilerin oluşumunu yavaşlatır ama toplanması devam eder ve bunun sonucunda acılık algısının oluşumu etkilenir. Kimozin kazeinin çok hidrofobik bölgelerinden peptitlerin koparılmasında başlıca rol oynar. Ayrıca peynir pıhtısının içerdiği rennet miktarında peynirde acılığın gelişmesinde doğrudan etkilidir (Fallico et al. 2005). Bununla birlikte yüksek nem içeriği peynirlerde koagülant aktivitesi artırmaktadır (Bansal et al. 2009a). Proteolitik enzimler su aktivitesinin düşmesinde, ikincil metabolizma ürünlerinin ortaya çıkmasında etkilidirler (Hayaloglu et al. 2008).

Peyniri üretiminde kenger otunun (*Cynara cardunculus*) koagülant olarak kullanımı peynirlerin hidrofilik ve hidrofobik peptit içeriğini arttırmakata, mikrobiyal koagülant hidrofobik peptileri, sığır koagülantı hidrofilik peptitlerin oranını yükseltmektedir. Peynir üretiminde mikrobiyal koagülant kullanımı, peynirlerde acı peptit konsantrasyonunun (molekül büyüklüğü 165-6500 g/mol<sup>-1</sup>) sığır koagülantı kullanılanlara yükseltmektedir (Agboola et al. 2004). Buna karşın kenger otunun peynir üretiminde kullanılması acılığın yükselmesine neden olmaktadır (Tejada et al. 2007; 2008). Peynirlerde acı tat, acı peptit ve acı peptitlerin toplam

peptilere olan oranına bağlı, fakat toplam hidrofobik peptidlere bağlı değildir (Agboola et al. 2004). Peynirde acı tat ile hidrofobik peptit konsantrasyonu ve hidrofobik/hidrofilik peptit oranı arasında önemli bir korelasyon bulunmaktadır (Tejada et al. 2008; Picon et al. 2010). Safran gibi bitkilerinde peynirlerde acılığa neden olmaktadır (Licón et al. 2012).

Farklı hayvanlardan elde edilen sütlerden (koyun ve inek) peynir üretiminde bitkisel koagülat (kenger otu) kullanımı acılıkta farklılıklar oluşturmuştur. Bunun durum ise proteaz aktivitesiye karşı inek sütü kazeinlerinin koyun sütü kazeinlerine göre daha hassas olmasından ve daha fazla acı hidrofobik peptitlerin oluşumundan kaynaklanmaktadır (Tejada et al. 2007). Koyun sütünden peynir yapımında kenger otunun kullanılması peynirlerde acılığa neden olmaktadır. Diğer taraftan kullanılan kenger otu oranı peynirlerde acılık düzeyini etkilememektedir (Galán et al. 2008).

### 3.8. Tuzlama

Tuz gıdaların besinsel değerini, bileşimini ve fonksiyonelliğini etkileyen faktörlerden bir tanesidir (Da Silva et al. 2014). Tuzun neden olduğu hipertansiyon, osteoporoz, böbrek taşı (Ayyash et al. 2012) ve kardiyovasküler hastalıklar (Møller et al. 2013a, b) gibi hastalıkları azaltmak için günlük tuz alım miktarının 2 g'ın altına düşürülmesi gerektiği WHO (World Health Organization) tarafından bildirilmektedir (Møller et al. 2013a). Birçok sağlık sorunlarına neden olduğundan tuzun tüm gıdalarda azaltılması gerekmektedir. Günlük alınması gereken tuz miktarına günlük tüketilen peynirinde katkısı olmaktadır (Ayyash et al. 2012; 2013).

Peynir çeşidine göre ilave edilecek tuz miktarı değişmektedir (Møller et al. 2012). Peynir yapımında peynir kalitesi ve beğenirliği üzerinde tuzun oranı ve kitleye dağılımı etkili birer faktördür (Çelik ve Uysal, 2009). Tuzlamanın peynirdeki görevleri aşağıdaki gibidir:

- ✓ peynir yapımında sinerizisde (Grummer and Schoenfuß 2011; Grummer et al. 2012; Møller et al. 2013a,b)
- ✓ peynir pıhtısının serum fazının iyonik güçlülüğünün artırılmasında (Çelik ve Uysal, 2009; Agarwal et al. 2011; Møller et al. 2013a,b)
- ✓ su aktivitesinin düşürülmesinde (Çelik ve Uysal, 2009; Grummer et al. 2012; Ozturk et al. 2013; Møller et al. 2013a,b; Da Silva et al. 2014)
- ✓ enzim aktivitesinin kontrolünde (Grummer and Schoenfuß 2011; Agarwal et al. 2011; Cruz et al. 2011; Møller et al. 2012; Ayyash et al. 2013; Da Silva et al. 2014)
- ✓ koruyucu olarak (Çelik ve Uysal, 2009; Kameh et al. 2012; Ozturk et al. 2013; Møller et al. 2013b)

- ✓ istenmeyen mikrobiyal gelişmeyi engellemede (Çelik ve Uysal, 2009; Grummer and Schoenfuss 2011; Cruz et al. 2011; Møller et al. 2013b)
- ✓ acılık gibi olumsuz tatların baskılanmasında (Cruz et al. 2011; Sinopoli and Lawless 2012; Møller et al. 2012; Møller et al. 2013a, b)
- ✓ tuzlu tadın artmasında ve ortaya çıkmasında (Cruz et al. 2011; Sinopoli and Lawless 2012; Møller et al. 2012; Møller et al. 2013a, b)
- ✓ hoş giden lezzetin artırılmasında (Çelik ve Uysal, 2009; Sinopoli and Lawless 2012; Kameh et al. 2012; Møller et al. 2013a, b)
- ✓ duyusal kaliteyi iyileştirmede (Sinopoli and Lawless 2012; Grummer et al. 2012; Møller et al. 2013a, b)
- ✓ bozulmayı minimize etmede (Çelik ve Uysal, 2009)
- ✓ pH ve redoks potansiyelini istenen seviyeye getirmede (Çelik ve Uysal, 2009)
- ✓ peynirin nem içeriğinin düşürülmesinde (Çelik ve Uysal, 2009)
- ✓ proteinlerin çözünürlüğü, tekstürü, lipoliz ve proteoliz (Çelik ve Uysal, 2009; Agarwal et al. 2011) üzerinde etkilidir.

Tuz/nem oranı mikrobiyal gelişme için gerekli olan serbest su miktarını yansıtır. Düşük tuz/nem oranı serbest su miktarını yüksek göstermektedir. Bu durum aşırı mikrobiyal gelişmeyle birlikte fazla proteoliz ve lipolize neden olmaktadır. Bunun sonucu acılık gibi tat bozukluklarına neden olur (Ong et al. 2007).

Peynirdeki tuz/nem oranının proteoliz üzerinde önemli etkisi vardır. Düşük tuz/nem oranı  $\alpha_{s1}$ - ve  $\beta$ -kazein proteolizini arttırmaktadır. Düşen nem ve su aktivitesiyle birlikte mikrobiyal peptidaz aktiviteleri azalır, böylece oluşan acı peptitlerin miktarı artar ve peynirde toplanır (Fallico et al. 2005). Düşük tuz konsantrasyonu  $\beta$ -kazeinin kimozin tarafından parçalanmasını azaltırken,  $\alpha_{s1}$ -kazein parçalanmasını etkilemez. Yüksek oranda eklenen tuzun kazein misellerinden plazminin ayrılışını arttırmakta ve böylece peynirde plazminin kalma süresini düşmektedir. Bu durum proteolizin oranını ve derecesini düşürebilmektedir (Upreti et al. 2006). Ayrıca tuz/nem oranından peynirin su aktivitesini ( $a_w$ ) etkilenmekte ve buna bağlı olarak starter ve starter olamayan bakterilerin protein metabolizması ve gelişmesi etkilenmektedir. Bunun yanında peynirin  $a_w$  peynirde bulunan diğer proteolitik enzimlerin aktivitelerini de değiştirebilir (Upreti et al. 2006; Grummer et al. 2012). Düşük tuz/nem oranı starter bakterilerin çoğalmasını arttırırken, starter olmayan bakterilerde ise bu artışı çok daha hızlı olduğu gözlenmiştir. Bu durum yüksek tuz/nem oranına sahip peynirlerde düşük tuz/nem oranına sahip peynirlere göre daha fazla laktik

asit bakteri kaynaklı proteolitik aktivite oluşmaktadır (Upreti et al. 2006). Peynirlerde acılığı engellemek için tuz/nem oranının %4,5'ten büyük olması tavsiye edilmektedir (Ong et al. 2007; Agarwal et al. 2011). Starter kültürlerin otolizi tuz miktarından, tuz/nem oranından, pişirme sıcaklığı gibi değişik üretim koşullarından etkilenebilmektedir (Beresford et al. 2001).

Acı tada sahip peynirler, normal peynirlere göre daha az asitlik ve 2 kat daha fazla tuz ve tuz/nem oranına sahiptirler. Peynirde acılığın gelişmesinde genel olarak düşük pH ve tuz/nem düzeyi etkilidir. Bu faktörlerin pıhtıda koagülantların aktivitesinde ve tutulmasında pozitif etkileri vardır. Kimozin kalıntıları birçok peynir çeşidinde temel proteinaz olup  $\beta$ -kazeinin hidrofobik bölgelerinden peptitlerin koparılmasında önemli rol oynar (Fallico et al. 2005). Peynirlerin düşük nem ve kurmaddede yağ içerikleri acılığın meydana gelmesinde etkilidirler. Buna ek olarak, peynirlerin düşük yağ içeriğine sahip olması hidrofobik peptitlerin yağ fazında çözülmesini azalttığından veya yağ fazı tarafından acılık hissinin maskelenmesi düşüğünden acılığın algılanma riskinin düşük yağ içerli peynirlerde daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Fallico et al. 2005; Drake et al. 2010). Yağı azaltılmış peynirlerde NaCl acılığı engellemeyip sadece maskeleymektedir (Ritvanen et al. 2010; Møller et al. 2013b). Tuz oranının peynirlerde meydana gelen acılık üzerinde etkilidir (Møller et al. 2012; Ozturk et al. 2013; Hoffmann et al. 2020). Tuz oranının azalmasına bağlı olarak peptidaz/proteinaz oranı düşmekte ve acı tada sahip  $\beta$ -kazein (f193-204) yeterince parçalanmamakta ve bu  $\beta$ -kazein fraksiyonunun aşırı toplanmasına neden olmaktadır (Møller et al. 2012; Ozturk et al. 2013). Bu duruma starter kültürlerin lize olması sonucu ortaya çıkan hücre içi enzimler neden olmakta ve lize olmayla tuz konsantrasyonu arasında güçlü pozitif bir korelasyon bulunmaktadır (Møller et al. 2012).

Potasyum klorür (KCl) tuzlu tadı arttırmasının yanında acı bir tada sahip olup peynirlerde acılığı arttırmaktadır (Karagözlü et al. 2008; Karimi et al. 2012; Grummer et al. 2013; Hoffmann et al. 2020). *Saccharomyces cerevisiae*'den elde edilen maya ekstraktının (Silva et al. 2018) veya ksiloligosakkaritin peynirlerde kullanımı KCl'ün neden olduğu acılığı azaltmaktadır (Ferrão et al. 2018). NaCl ve KCl birlikte kullanıldığında acılık gibi istenmeyen tatları baskılamaktadır (Karagözlü et al. 2008; Karimi et al. 2012; Sinopoli and Lawless 2012; Frankowski et al. 2014). Fakat yapılan bazı araştırmalarda peynirdeki acı tat üzerine eklenen tuz bileşiminin önemli bir etkisinin olmadığı da bildirilmektedir (Ayyash et al. 2012; 2013).

Peynirlerde NaCl oranının azaltılarak yerine kalsiyum sitrat veya kalsiyum laktat kullanımının peynirlerde acılığın maskelenmesinde herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır (Gore et al. 2019). Peynir tuzlamada kullanılan magnezyum klorür ( $MgCl_2$ ) veya kalsiyum klorür ( $CaCl_2$ ) ise

acılığın artmasına neden olmaktadır (Grummer et al. 2012). Diğer taraftan potasyum klorid, magnezum klorid, monosodyum glutamat, potasyum laktat, kalsiyum laktat ve potasyum fosfat monobazığının peynirlerde acılığı azaltma potansiyelleri sodyum klorüre göre daha düşüktür (Da Silva et al. 2014).

### 3.9. Mineral Maddeler

Gıdalara kalsiyum (Ca) eklenmesi acı ve tebeşirimsi tat ile birlikte bazı istenmeyen tekstür ve renk değişikliklerine neden olmaktadır. Peynire eklenen gamların kalsiyum klorürün neden olduğu acı tadı maskeleymektedir (Puspitasar, et al. 1991). Fosfat (P) ve Ca kazein misel yapısına katkıda bulunmaktadır. Kazeinden P ve Ca uzaklaştırılması kazein misellerinde ayrışmaya neden olmaktadır. Bu ayrışma sonucu proteinazlar karşı proteinlerin yüzey alanı genişler ve enzim substrat interaksyonunun artmasına neden olur. Böylece, düşük oranda Ca ve P içeren peynirlerde daha fazla proteoliz meydana gelir. Yüksek kimozin miktarı ve peynirde kalma süresinin uzaması da proteoliz oranını artırmaktadır (Upreti et al. 2006). Peynirlerde Ca, P, laktoz kalıntısı ve tuz/nem oranı genel olarak proteolizi etkilemektedir. Buna ek olarak proteolize protein yapısı, kimozin kalıntısının ve laktik asit bakterilerinin aktivitesinin de etkisi bulunmaktadır (Upreti et al. 2006).

### 3.10. Acılık Üzerinde Etkili Diğer Faktörler

Peynir üretiminde çiğ süt yerine pastörize süt kullanımı proteolizin daha hızlandırmakta ve bu nedenle ilerleyen olgunlaşma süresinde acı tat oluşmaktadır (Mutluer ve Güven 2010). Az yağlı peynirlerde titanyum dioksit kullanımı sonucu peynirlerde depolama süresince daha az acı peptid toplanmaktadır. Bu durum peynirlerde acılığın azalmasına neden olmaktadır (Wanhwani and McMahan 2012). Peynir üretiminde kullanılan hayvan türüne göre de peynirlerde meydana gelen acılık düzeyi değişmektedir. Keçi sütünden elde edilen peynirlerin acılığı inek sütünden ve bu ikisinin karışımından elde edilen peynirlere göre daha yüksek olmaktadır. Bu durum ise keçi sütünden yapılan peynirlerde yükselen kaprilik ve kaprik yağ asitlerin miktarından kaynaklanmaktadır (Queiroga et al. 2013). Acılık üzerinde hayvanın tütü kadar beslenmek şeklide etkili olabilmektedir. Otlatılan veya otlarla beslenen hayvanlardan elde edilen hayvanların sütlerinden üretilen peynirlerde proteoliz daha fazla olmakla birlikte proteoliz sonucu oluşan kısa petitler ve amino asitler acılığa neden olmaktadır (Bananno et al. 2013; Esposito et al. 2014). Bunun yanında yüksek proteinli yemlerle beslenen hayvanlardan elde edilen sütlerden üretilen peynirlerde yüksek üre ve çözünen azot sonucu peynirlerde acılık meydana gelmektedir (Bananno et al. 2013). Şalgam ve kanola ile beslenen hayvanların sütlerinden elde edilen peynirlerde acılık daha yoğun hissedilmektedir (Seguel et al. 2020).

Fenilasetaldehidin miktarındaki artış peynirlerde meydana gelen keskin ve acı tat ortaya çıkmasında önemli bir etkiye sahiptir (Ertekin ve ark. 2009). Peynire işelencek sütlerin homojenize edilmesi üretilen taze peynirlerde acılığa neden olmamaktadır. Buna karşın olgunlaştırılan peynirlerde olgunlaşma süresince hidrofobik/hidrofilik peptit oranının artmasına bağlı olarak peynirlerde acılık yükselmektedir (Alonso et al. 2012).

Peynirlerin depolanmasında dondurma yönteminin kullanılması peynirlerde meydana gelen acılığın yoğunluğunu artırmaktadır. Acılığın artmasına ise plazmin, pıhtılaştırıcı enzimler ya da mikrobiyal proteazsonucu meydana gelen proteoliz kaynaklı hidrofobik peptitlerin miktarındaki artış neden olmaktadır (Alinovi et al. 2020). Peynirlerde acılıkta depolama sıcaklığı kadar ambalajlama şeklide önem arz etmektedir. Parafin kullanılarak paketlenen peynirlerde acılık yükselmekte, artışa da serbest yağ asitlerinin oranındaki yükselme neden olmaktadır (Todaro et al. 2018).

#### 4. Peynirde Acılığı Önleme Yolları

Peynirde görelen önemli tad kusurlarından bir tanesi olan acılığın önlemek için bazı önlemler alınabilir. Bunlardan bazıları aşağıdadır.

1. *L. helveticus* CNRZ32 tarafından üretilen pepO2 ve pepO3 endopeptidazları peynirlerde acılığın giderilmesinde etkili olduğu için Cheddar and Gouda gibi ticari olarak üretilen peynirlerde *L. helveticus* CNRZ32 kültür olarak kullanılabilir (Sridhar et al. 2005).
2. Peynir yapımında düşük yağlı veya yağı azaltılmış peynir yerine tam yağlı peynir yapılması, acılığa neden olan hidrofobik peptitlerin acılığını maskeleyebilir (Drake et al. 2010).
3. Yağı azaltılmış peynirlerde acılığın azaltılmasında farklı enzim ve kültür kombinasyonları kullanılarak yapılabilir (Børsting et al. 2008).
4. Peynir yapımında bitkisel koagülant kullanımında dikkatli olunarak veya kullanılmayarak peynirlerde acılık önlenir (Galán et al. 2012).
5. Tuzu azaltılmış peynirlerde hidrofobik peptitler daha fazla toplanmaktadır (Kabelová et al. 2009; Andersen et al. 2010; Møller et al. 2013b)
6. Peynirlerde rennet veya starter kültürler tarafından üretilen acılığa neden olan hidrofobik peptitlerin hidrolize edilerek acılığın giderilmesinde proteazlar kullanılabilirler (Koka and Weimer 2000).
7. Gıdalarda acılığı maskelemek için siklodekstrin ve polifosfat kullanılabilir (Shimamura et al. 2009).
8. Starter kültürlerin yüksek popülasyona ulaşması ya da uzun süre canlı kalması acılık gibi lezzet kusurlarını maskeleyebilir veya acılığı azaltabilir (Beresfor et al. 2001).



9. Acılığın ortaya çıkmasında peynir yapımında kullanılan koagülanlar önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla peynir yapımında acılık meydana gelmemesi için dikkatli koagülan seçimi yapılmalıdır (Agboola et al. 2004).
10. Peynir yapımında buzağı kimozinin yerine deve kimozinin kullanılmasıyla olgunlaşma süresince acılığın gelişimi azaltılabilir (Bansal et al. 2009b).
11. Kazein fraksiyonlarının kontrollü hidrolizi ile peynirlerde acılık önlenebilir (Toelstede and Hofmann, 2008).
12. Peynirde ilave edilen katkı maddeleri acılık algısını etkilemekte ve acılığı maskeleyebilmektedir (Kamleh et al. 2012).

Peynir ülkemizde ve dünyada en çok tüketilen süt ürünlerinde bir tanesidir. Peynir gören tad kusurlarında bir tanesi olan acı tat peynirin tüketiciler tarafında beğenirliğini olumsuz etkilemektedir. Acı tadın oluşumun en önemli etkenlerden bir tanesi proteoliz olup bunun dışında birçok etken bulunmaktadır. Peynirde acılığın önleyebilmek için alternatif yollar bulunmalıdır. Bunun için bu konuda yapılacak çalışmalar oldukça önemlidir.



**KAYNAKLAR**

- Addis, M., Piredda, G., Pirisi, A., 2008. The use of lamb rennet paste in traditional sheep milk cheese production. *Small Ruminant Research*, 79, 2-10.
- Agarwal, S., McCoy, D., Graves, W., Gerard, P.D., Clark, S., 2011. Sodium content in retail Cheddar, Mozzarella, and process cheeses varies considerably in the United States. *J. Dairy Sci.*, 94, 1605-1615.
- Agboola, S., Chen, S., Zhao, J., 2004. Formation of bitter peptides during ripening of ovine milk cheese made with different coagulants. *Lait*, 84, 567-578.
- Agrawal, P., Hassan, A.N., 2007. Ultrafiltered milk reduces bitterness in reduced-fat Cheddar cheese made with an exopolysaccharide-producing culture. *J. Dairy Sci.*, 90, 3110-3117.
- Alonso, R., Picon, A., Gaya, P., Fernández-García, E., Nuñez, M., 2012. Effect of high-pressure treatment of ewe raw milk curd at 200 and 300 MPa on characteristics of Hispánico cheese. *J. Dairy Sci.* 95, 3501-3513.
- Albenzio, M., Santillo, A., Caroprese, M., d'Angelo, F., Marino, R., Sevi, A., 2009b. Role of endogenous enzymes in proteolysis of sheep milk. *J. Dairy Sci.*, 9, 79-86.
- Albenzio, M., Santillo, A., Caroprese, M., Braghieri, A., Sevi, A., Napolitano, F., 2013. Composition and sensory profiling of probiotic Scamorza ewe milk cheese. *J. Dairy Sci.*, 96, 2792-2800.
- Albenzio, M., Santillo, A., Caroprese, M., Marino, R., Trani, A., Faccia, M., 2010. Biochemical patterns in ovine cheese: Influence of probiotic strains. *J. Dairy Sci.*, 93, 3487-3496.
- Alinovi, M., Wiking, L., Corredig, M., Mucchetti, G., 2020. Effect of frozen and refrigerated storage on proteolysis and physicochemical properties of high-moisture citric mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.* 103, 7775–7790.
- Andersen, L.T., Ardö, Y., Bredie, L.P., 2010. Study of taste-active compounds in the water-soluble extract of mature Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 20, 528-536.
- Ávila, M., Garde, S., Gaya, P., Medina, M., Nuñez, M., 2006. Effect of high-pressure treatment and a bacteriocin-producing lactic culture on the proteolysis, texture, and taste of Hispánico cheese. *J. Dairy Sci.*, 89, 2882-2893.
- Ayyash, M.M., Sherkat, F., Shah, N.P., 2012. The effect of NaCl substitution with KCl on Akawi cheese: Chemical composition, proteolysis, angiotensin-converting enzyme-inhibitory activity, probiotic survival, texture profile, and sensory properties. *J. Dairy Sci.*, 95, 4747-4759.
- Ayyash, M.M., Sherkat, F., Shah, N.P., 2013. Effect of partial NaCl substitution with KCl on the texture profile, microstructure, and sensory properties of low-moisture mozzarella cheese. *Journal of Dairy Research*, 80, 7-13.

- Bansal, N., Drake, M.A., Piraino, P., Broe, M.L., Harboe, M., Fox, P.F., McSweeney, P.L.H., 2009b. Suitability of recombinant camel (*Camelus dromedarius*) chymosin as a coagulant for Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 19, 510-517.
- Bansal, N., Fox, P.F., McSweeney, P.L.H., 2009a. Comparison of the level of residual coagulant activity in different cheese varieties. *Journal of Dairy Research*, 76, 290-293.
- Bas, D., Kendirci, P., Salum, P., Govce, G., Erbay, Z., 2019. Production of enzyme-modified cheese (EMC) with ripened white cheese flavour: I-effects of proteolytic enzymes and determination of their appropriate combination. *Food and Bioprocess Technology*, 117, 287-301.
- Behrens, M., Meyerhof, W., 2013. Bitter taste receptor research comes of age: From characterization to modulation of TAS2Rs. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 24, 215-221.
- Beresford, T.P., Fitzsimons, N.A., Brennan, N.L., Cogan, T.M., 2001. Recent advances in cheese microbiology. *International Dairy Journal*, 11, 259-274.
- Berre, E.L., Boucon, C., Knoop, M., Dijksterhuis, G., 2013. Reducing bitter taste through perceptual constancy created by an expectation. *Food Quality and Preference* 28, 370-374.
- Bonanno, A., Tornambè, G., Bellina, V., De Pasquale, C., Mazza, F., Maniaci, G., Di Grigoli, A., 2013. Effect of farming system and cheesemaking technology on the physicochemical characteristics, fatty acid profile, and sensory properties of Caciocavallo Palermitano cheese. *J. Dairy Sci.*, 96, 710-724.
- Børsting, M.W., Qvist, K.B., Rasmussen, M., Vindelov, J., Vogensen, F.K., Ardö, Y., 2012. Impact of selected coagulants and starters on primary proteolysis and amino acid release related to bitterness and structure of reduced-fat Cheddar cheese. *Dairy Sci. & Technol.*, 92, 593-612.
- Broadbent, J.R., Barnes, M., Brennand, C., Strickland, M., Houck, K., Johnson, M.E., Steele, J.L., 2002. Contribution of *Lactococcus lactis* cell envelope proteinase specificity to peptide accumulation and bitterness in reduced-fat Cheddar Cheese. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(4), 1778-1785.
- Cruz, A.G., Faria, J.A.F., Pollonio, M.A.R., Bolini, H.M.A., Celeghini, R.M.S., Granato, D., Shah, N., 2011. Cheeses with reduced sodium content: Effects on functionality, public health benefits and sensory properties. *Trends in Food Science & Technology*, 22, 276-291.
- Çelik, Ş., Uysal, Ş., 2009. Beyaz peynirin bileşim, kalite, mikroflora ve olgunlaşması. *Atatürk Üniv.Ziraat Fak. Derg.*, 40(1), 141-151.
- Da Silva, T.L.T, De Souza, V.R., Pinheiro, A.C.M., Nunes, C.A., Freire, T.V.M., . Equivalence salting and temporal dominance of sensations analysis for different sodium chloride substitutes in cream cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 67(1), 31-38.

- Delgado, F.J., Rodríguez-Pinilla, J., González-Crespo, J., Ramírez, R., Roa, I., 2010. Proteolysis and texture changes of a Spanish soft cheese ('Torta del Casar') manufactured with raw ewe milk and vegetable rennet during ripening. *International Journal of Food Science and Technology*, 45, 512-519.
- Dong, D., Jones, G., Zhang, S., 2009. Dynamic evolution of bitter taste receptor genes in vertebrates. *BMC Evolutionary Biology*, 9 (12), 1-9.
- Drake, M.A., Miracle, R.E., McMahon, D.J., 2010. Impact of fat reduction on flavor and flavor chemistry of Cheddar cheeses. *J. Dairy Sci.*, 93, 5069-5081.
- Emirmustafaoglu, A., Coşkun, H., 2012. Keçi sütü, inek sütü ve bu sütlerin karışımından yapılan otlı peynirlerde olgunlaşma boyunca meydana gelen değişimler. *Gıda*, 37 (4), 211-218.
- Erbay, Z., 2013. Püskürtmeli kurutucuda beyaz peynir tozu üretim optimizasyonu ve peynir suyu ile maltodekstrin kullanımının ürün kalitesi ve depolama stabilitesi üzerine etkisi. Doktora tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 204s.
- Erdoğan, A., Baran, A., 2012. Peynirdeki proteolitik ajanların proteolize etkisi. *Gıda*, 37 (2), 119-126.
- Ertekin, B., Okur, Ö.D., Güzel-Seydim, Z., 2009. Peynirde aminoasit katabolizması ile lezzet bileşenlerinin oluşumu. *Gıda*, 34 (1), 43-50.
- Esposito, G., Masucci, F., Napolitano, F., Braghieri, A., Romano, R., Manzo, N., Francia, A.D., 2014. Fatty acid and sensory profiles of Caciocavallo cheese as affected by management system. *J. Dairy Sci.*, 97, 1918-1928.
- Eurostat, 2020. Agricultural products-milk and milk product statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Milk\\_and\\_milk\\_product\\_statistics#Milk\\_products](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Milk_and_milk_product_statistics#Milk_products) (Erişim: 10.11.2020).
- Evans, J., Zulewska, J., Newbold, M., Drake, M.A., Barbano, D.M., 2010. Comparison of composition and sensory properties of 80% whey protein and milk serum protein concentrates. *J. Dairy Sci.*, 93, 1824-1843.
- Fallico, V., McSweeney, P.L.H., Horne, J., Pediliggleri, C., Hannon, J.A., Carpino, S., Licitra, G., 2005. Evaluation of bitterness in ragusano cheese. *J. Dairy Sci.* 88, 1288-1300.
- Ferrandini, E., Castillo, M., de Renobales, M., Virto, M.D., Garrido, M.D., Rovira, S., López, M.B., 2012. Influence of lamb rennet paste on the lipolytic and sensory profile of Murcia al Vino cheese. *J. Dairy Sci.*, 95, 2788-2796.
- Ferrandini, E., López, M.B., Castillo, M., Laencina, J., 2011. Influence of an artisanal lamb rennet paste on proteolysis and textural properties of Murcia al Vino cheese. *Food Chemistry*, 124, 583-588.
- Ferrãoa, L.L., Ferreira, M.V.S., Cavalcanti, R.N., Carvalho, A.F.A., Pimentel, T.C., Silva, H.L.A., Silva, R., Esmerino, E.A., Neto, R.P.C., Tavares, M.I.B., Freitas, M.Q., Menezes, J.C.V., Cabral, L.M., 2018. The xylooligosaccharide addition and sodium reduction in requeijão cremoso processed cheese. *Food Research International* 107, 137-147.

- Fişekçi, B., 2013. Lor peynirinin raf ömrü üzerine modifiye atmosfer paketlemenin ve CO<sub>2</sub> uygulamasının etkilerinin belirlenmesi. Yüksek Lisan Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 102s.
- Frankowski, K.M., Miracle, R.E., Drake, M.A., 2014. The role of sodium in the salty taste of permeate. *J. Dairy Sci.*, 97, 5356-5370.
- Galán, E., Prados, F., Pino, A., Tejada, L., Fernández-Salguero, J., 2008. Influence of different amounts of vegetable coagulant from cardoon *Cynara cardunculus* and calf rennet on the proteolysis and sensory characteristics of cheeses made with sheep milk. *International Dairy Journal*, 18, 93-98.
- Gomes, A.P., Cruz, A.G., Cadena, R.S., Celeghini, R.M.S., Faria, J.A.F., Bolini, H.M.A., Pollonio, M.A.R., Granato, D., 2011. Manufacture of low-sodium Minas fresh cheese: Effect of the partial replacement of sodium chloride with potassium chloride. *J. Dairy Sci.*, 94, 2701-2706.
- Gore, E., Mardon, J., Cécile, B., Lebecque, A., 2019. Calcium lactate as an attractive compound to partly replace salt in blue-veined cheese. *J. Dairy Sci.*, 102, 1-13.
- Grummer, J., Bobowski, N., Karalus, M., Vickers, Z., Schoenfuss, T., 2013. Use of potassium chloride and flavor enhancers in low sodium Cheddar cheese. *J. Dairy Sci.*, 96, 1401-1418.
- Grummer, J., Karalus, M., Zhang, K., Vickers, Z., Schoenfuss, T.C., 2012. Manufacture of reduced-sodium Cheddar-style cheese with mineral salt replacers. *J. Dairy Sci.*, 95, 2830-2839.
- Grummer, J., Schoenfuss, T.C., 2011. Determining salt concentrations for equivalent water activity in reduced-sodium cheese by use of a model system. *J. Dairy Sci.*, 94, 4360-4365.
- Hayaloglu, A.A., Brechany, E.Y., Deegan, K.C., McSweeney, P.L.H., 2008. Characterization of the chemistry, biochemistry and volatile profile of Kufli cheese, a mould-ripened variety. *LWT*, 41, 1323–1334.
- Hoffmann, W., Luzzi, G., Steffens, M., Clawin-Rädecker, Franz, C.M.A.P., Fritsche, J., 2020. Salt reduction in film-ripened, semihard Edam cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 73 (1), 270-282.
- Homma, R., Yamashita, H., Funaki, J., Ueda, R., Sakurai, T., Ishimaru, Y., Abe, K., Asakura, T., 2012. Identification of bitterness-masking compounds from cheese, *J. Agric. Food Chem.*, 60, 4492-4499.
- Ismail, B., Nielsen, S.S., 2010. Plasmin protease in milk: Current knowledge and relevance to dairy industry. *J. Dairy Sci.*, 93, 4999-5009.
- Jacob, M., Jaros, D., Rohm, H., 2010. The effect of coagulant type on yield and sensory properties of semihard cheese from laboratory-, pilot- and commercial-scale productions. *International Journal of Dairy Technology*, 63 (3), 370-380.
- Jacob, M., Jaros, D., Rohm, H., 2011. Recent advances in milk clotting enzymes. *International Journal of Dairy Technology*, 64 (1), 14-33.

- Kabelová, I., Dvořáková, M., Čížková, H., Dostálek, P., Melzoch, K., 2009. Determination of free amino acids in cheeses from the Czech market. *Czech J. Food Sci.*, 27 (3), 143-150.
- Kamleh, R., Olabi, A., Toufeili, I., Najm, N.E.O., Younis, T., Ajib, R., 2012. The effect of substitution of sodium chloride with potassium chloride on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of Halloumi cheese. *J. Dairy Sci.*, 95, 1140-1151.
- Karagözlü, C., Kinik, O., Akbulut, N., 2008. Effects of fully and partial substitution of NaCl by KCl on physico-chemical and sensory properties of white pickled cheese. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 59, 181-191.
- Karametsi, K., Kokkinidou, S., Ronningen, I., Peterson, D.G., 2014. Identification of bitter peptides in aged Cheddar cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 8034-8041.
- Karimi, R., Mortazavian, A.M., Karami, M., 2012. Incorporation of *Lactobacillus casei* in Iranian ultrafiltered Feta cheese made by partial replacement of NaCl with KCl. *J. Dairy Sci.*, 95, 4209-4222.
- Koka, R., Weimer, B.C., 2000. Investigation of the ability of a purified protease from *Pseudomonas fluorescens* RO98 to hydrolyze bitter peptides from cheese. *International Dairy Journal*, 10, 75-79.
- Kondrotienė, K., Kašėtienė, N., Kaškonienė, V., Stankevičius, M., Kaškonas, P., Šernienė, L., Bimbiraitė-Survilienė, K., Malakauskas, M., Maruška, A., 2019. Evaluation of fresh cheese quality prepared with newly isolated nisin z-producing *Lactococcus lactis* bacteria. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 11, 713–722.
- Květoslava, Š., Stanislav, K., Miroslav, F., Pavla, B., 2019. Influence of starter culture to sensory quality of edam cheese during ripening. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 9, 422-426.
- Lemieux, L., Simard, R.E., 1992. Bitter flavor in dairy products. II. A review of bitter peptides from caseins: Their formation, isolation and identification, structure masking and inhibition. *Lait*, 72, 335-382.
- Lessard, M.H., Viel, C., Boyle, B., St-Gelais, D., Labrie, S., 2014. Metatranscriptome analysis of fungal strains *Penicillium camemberti* and *Geotrichum candidum* reveal cheese matrix breakdown and potential development of sensory properties of ripened Camembert-type cheese. *BMC Genomics*, 15, 235-247.
- Licón, C.C., Carmona, M., Molina, A., Berruga, M.I., 2012. Chemical, microbiological, textural, color, and sensory characteristics of pressed ewe milk cheeses with saffron (*Crocus sativus* L.) during ripening. *J. Dairy Sci.*, 95, 4263-4274.
- McSweeney, P.H., 2004. Biochemistry of cheese ripening. *International Journal of Dairy Technology*, 57 (2/3), 127-144.
- Møller, K.K., Rattray, F.P., Ardö, Y., 2013a. Application of selected lactic acid bacteria and coagulant for improving the quality of low-salt

- Cheddar cheese: Chemical, microbiological and rheological evaluation. *International Dairy Journal* 33,163-174.
- Møller, K.K., Rattray, F.P., Bredie, W.L.P., Høier, E., Ardö, Y., 2013b. Physicochemical and sensory characterization of Cheddar cheese with variable NaCl levels and equal moisture content. *J. Dairy Sci.*, 96, 1953-1971.
- Møller, K.K., Rattray, F.P., Høier, E., Ardö, Y., 2012. Manufacture and biochemical characteristics during ripening of Cheddar cheese with variable NaCl and equal moisture content. *Dairy Sci. & Technol.*, 92, 515-540.
- Moussaoui, F., Michelutti, I., Roux, Y.L., Laurent, F., 2002. Mechanisms involved in milk endogenous proteolysis induced by a lipopolysaccharide experimental mastitis. *J. Dairy Sci.*, 85, 2562-2570.
- Murtaza, M:A., Rehman, S.U., Anjum, F.M., Huma, N., 2013. Descriptive sensory profile of cow and buffalo milk Cheddar cheese prepared using indigenous cultures. *J. Dairy Sci.*, 96, 1380-1386.
- Mutluer, U., Güven, M., 2010. Uygulanan bazı farklı işlemlerin Sünme peynirinin özellikleri üzerine etkisi. *Ç.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü*, 22 (3), 19-28.
- Newman, J., Harbourne, N., O’Riordan, D., Jacquier, J.C., O’Sullivan, M., 2014. Comparison of a trained sensory panel and an electronic tongue in the assessment of bitter dairy protein hydrolysates. *Journal of Food Engineering*, 128, 127-131.
- Niimi, J., Eddy, A.I., Overington, A.R., Heenan, S.P., Silcock, P., Bremer, P.J., Delahunty, C.M., 2014. Cheddar cheese taste can be reconstructed in solution using basic tastes. *International Dairy Journal*, 34, 116-124.
- Okur, Ö.D., Güzel-Seydim, Z., 2011. Geleneksel dolaz peynirinin üretim yönteminin, mikrobiyal ve uçucu aroma bileşen içerikleriyle duyuşal özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda*, 36 (2), 83-88.
- Olives, A.M., Roux, Y.L., Rubert-Alemán, J., Peris, C., Molina, M.P., 2011. Effect of subclinical mastitis on proteolysis in ovine milk. *J. Dairy Sci.*, 94, 5369-5374.
- Ong, L., Henriksson, A., Shah, N.P., 2007. Chemical analysis and sensory evaluation of Cheddar cheese produced with *Lactobacillus acidophilus*, *Lb. casei*, *Lb. paracasei* or *Bifidobacterium* sp. *International Dairy Journal*, 17, 937-945.
- Ozturk, M., Govindasamy-Lucey, S., Jaeggi, J.J., Johnson, M.E., Lucey, J.A., 2013. The influence of high hydrostatic pressure on regular, reduced, low and no salt added Cheddar cheese. *International Dairy Journal*, 33, 175-183.
- Özer, B., Hayaloğlu, A.A., 2011. Giriş (1-10). In: Hayaloğlu, A.A. ve Özer B. (Ed), *Peynir Biliminin Temelleri*, Sidaş, İzmir
- Picon, A., Gaya, P., Fernández-García, E., Rivas-Cañedo, A., Ávila, M., Nuñez, M., 2010. Proteolysis, lipolysis, volatile compounds, texture, and flavor of

- Hispánico cheese made using frozen ewe milk curds pressed for different times. *J. Dairy Sci.*, 93, 2896-2905.
- Pripp, A.H., Skeie, S., Isaksson, T., Borge, G.I., Sørhaug, T., 2006. Multivariate modelling of relationships between proteolysis and sensory quality of Präst cheese. *International Dairy Journal*, 16, 225-235.
- Puspitasari, N.L., Lee, K., Greger, J.L., 1991. Calcium fortification of Cottage cheese with hydrocolloid control of bitter flavor defects. *J. Dairy Sci.*, 74, 1-7.
- Queiroga, R.C.R.E., Santos, B.M., Gomes, A.M.P., Monteiro, M.J., Teixeira, S.M., de Souza, E.L., Pereira, C.J.D., Pintado, M.M.E., 2013. Nutritional, textural and sensory properties of Coalho cheese made of goats' milk and their mixture. *LWT - Food Science and Technology*, 50, 538-544.
- Ritvanen, T., Lilleberg, L., Tupasela, T., Suhonen, U., Eerola, S., Putkonen, T., Peltonen, K., 2010. The characterization of the most-liked reduced-fat Havarti-type cheeses. *J. Dairy Sci.*, 93, 5039-5047.
- Santillo, A. and Albenzio, M. Influence of lamb rennet paste containing probiotic on proteolysis and rheological properties of Pecorino cheese. *J. Dairy Sci.*, 91, 1733-1742.
- Santillo, A., Caroprese, M., Ruggieri, D., Marino, R., Sevi, A., Albenzio, M., 2012. Consumer acceptance and sensory evaluation of Monti Dauni Meridionali Caciocavallo cheese. *J. Dairy Sci.*, 95, 4203-4208.
- Santos, M.V., Ma, Y., Caplan, Z., Barban, D.M., 2003. Sensory threshold of off-flavors caused by proteolysis and lipolysis in milk. *J. Dairy Sci.*, 86, 1601-1607.
- Seguel, G., Keim, J.P., Vargas-Bello-Pérez, E., Geldsetzer-Mendoza, C., Ibáñez, R.A., Alvarado-Gilis, 2020. Effect of forage brassicas in dairy cow diets on the fatty acid profile and sensory characteristics of Chanco and Ricotta cheeses. *J. Dairy Sci.* 103, 228–241.
- Shakeel-Ur-Rehman, Drake, M.A., Farkye, N.Y., 2008. Differences between cheddar cheese manufactured by the milled-curd and stirred-curd methods using different commercial starters. *J. Dairy Sci.*, 91, 76-84.
- Sheehan, J.J., 2013. Milk quality and cheese diversification. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 52, 243-253.
- Shimamura, T., Nishimura, T., Iwasaki, A., Odake, S., Akuzawa, R., 2009. Degradation of a bitter peptide derived from casein by lactic acid bacterial peptidase. *Food Sci. Technol. Res.*, 15 (2), 191-194.
- Silva, H.L.A., Balthazar, C.F., Silva, R., Vieira, A.H., Costa, R.G.B., Esmerino, E.A., Freitas, M.Q., Cruz, A.G., 2018. Sodium reduction and flavor enhancer addition in probiotic prato cheese: Contributions of quantitative descriptive analysis and temporal dominance of sensations for sensory profiling. *J. Dairy Sci.* 101, 8837–8846.

- Singh, T.K., Young, N.D., Drake, M., Cadwallader, K.R., 2005. Production and sensory characterization of a bitter peptide from  $\beta$ -casein. *J. Agric. Food Chem.*, 53, 1185-1189.
- Sinopoli, D.A., Lawless, H.T., 2012. Taste properties of potassium chloride alone and in mixtures with sodium chloride using a check-all-that-apply method. *Journal of Food Science*, 77 (9), 319-322.
- Soeryapranata, E., Powers, J.R., Ünlü, G., 2008. Degradation of  $\alpha_{s1}$ -CN f1-23 by aminopeptidase N and endopeptidases E, O, O2, and O3 of *Lactobacillus helveticus* WSU19 under cheese ripening conditions. *International Dairy Journal*, 18, 178-186.
- Sridhar, V.R., Hughes, J.E., Welker, D.L., Broadbent, J.R., Steele, J.L., 2005. Identification of endopeptidase genes from the genomic sequence of *Lactobacillus helveticus* CNRZ32 and the role of these genes in hydrolysis of model bitter peptides. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(6), 3025-3032.
- Tejada, L., Abellán, A., Cayuela, J.M., Martínez-Cacha, A., Fernández-Salguero, J., 2008. Proteolysis in goats' milk cheese made with calf rennet and plant coagulant. *International Dairy Journal*, 18, 139-146.
- Tejada, L., Gómez, R., Fernández-Salguero, J., 2007. Sensory characteristics of ewe milk cheese made with three types of coagulant: calf rennet, powdered vegetable coagulant and crude aqueous extract from *Cynara cardunculus*. *Journal of Food Quality*, 30, 91-103.
- Todaro, M., Palmeri, M., Cardamone, C., Settanni, L., Mancuso, I., Mazza, F., Scatassa, M.L., Corona, O., 2018. Impact of packaging on the microbiological, physicochemical and sensory characteristics of a "pasta filata" cheese. *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 85-90.
- Toelstede, S., Hofmann, T., 2008. Sensomics mapping and identification of key bitter metabolites in Gouda cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 2795-2804.
- TUİK, 2020. Süt ve Süt Ürünleri Üretimi. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=85&locale=tr> (Erişim: 10.11.2020).
- Upreti, P., Metzger, L.E., Hayes, K.D., 2006. Influence of calcium and phosphorus, lactose, and salt-to-moisture ratio on Cheddar cheese quality: Proteolysis during ripening. *J. Dairy Sci.*, 89, 444-453.
- Virto, M., Chávarri, F., Bustamante, M.A., Barron, L.J.R., Aramburu, M., Vicente, M.S., Pérez-Elortondo, F.J., Albisu, M., de Renobales, M., 2003. Lamb rennet paste in ovine cheese manufacture. Lipolysis and flavour. *International Dairy Journal*, 13, 391-399.
- Wadhawani, R., McMahon, D.J., 2012. Color of low-fat cheese influences flavor perception and consumer liking. *J. Dairy Sci.*, 95, 2336-2346.



# Bölüm 2

## SAĞIRKÖY - YARIKKAYA (YALVAÇ-İSPARTA) HAVZASININ JEOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE KÖMÜR POTANSİYELİ



*Murat ŞENTÜRK<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çünür/Isparta, Türkiye  
muratsenturk@sdu.edu.tr ORCID ID: [orcid.org/0000-0002-9672-3021](https://orcid.org/0000-0002-9672-3021)

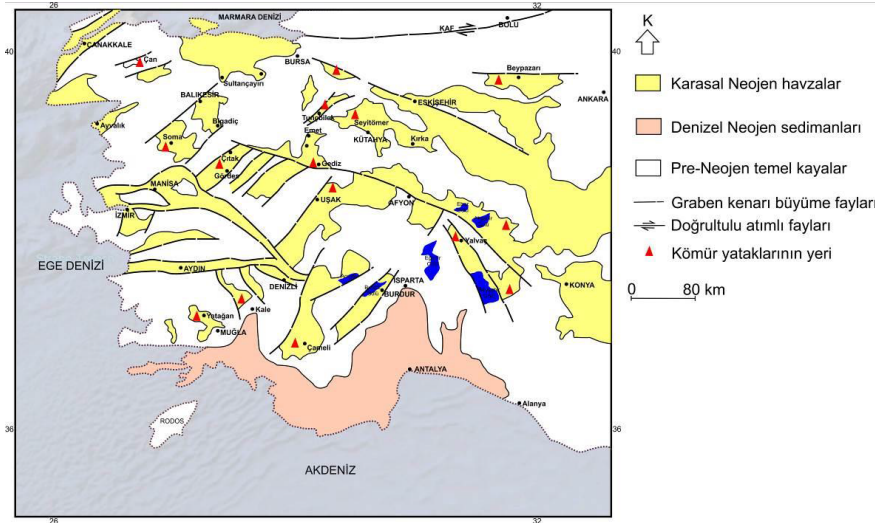


## 1. Giriş

Batı Anadolu da yayılım gösteren Neojen havzalarının büyük bir bölümü, farklı boyutlarda, değişik endüstriyel hammaddeler kapsar. Çok önemli boyutlarda ekonomik olabilecek kaynaklar içeren ve genellikle karasal tortul kayalar ile volkanikler içeren Neojen havzalarının büyük bir bölümü henüz keşfedilmemiş durumdadır.

GB-Anadolu da KD, KB uzanımlar gösteren ve kömür oluşumları içeren Neojen havzaları, genellikle büyüme fayları ile sınırlandırılmışlardır. Son yıllarda, yeni kömür sahalarının bulunduğu havzalarda yapılan değerlendirmeler, bu havzaların büyük bir bölümünün, Kuvaterner yaşlı oldukça kalın bir alüvyon örtüyle kaplı olduğunu, fay kontrolünde gelişen asimetrik graben yapısına sahip olduklarını ve dağarası bir havza özelliği taşıdıklarını gösterir (Şekil 1).

Yalvaç havzası da, GB Anadolu da yer alan ve farklı jeolojik ve tektonik unsurlar içeren Neojen yaşlı havzalardan birisidir. Genellikle fluvial tortulların yanısıra gölsel ve akarsu tortullarıyla da doldurulmuş olan Yalvaç havzası, 750-800 metreye ulaşan kırıntılı tortul kalınlığı ile yanal ve düşey yönlerde birbirine girik olabilen litofasiyes sınırlarıyla birbirinden ayrılmıştır.

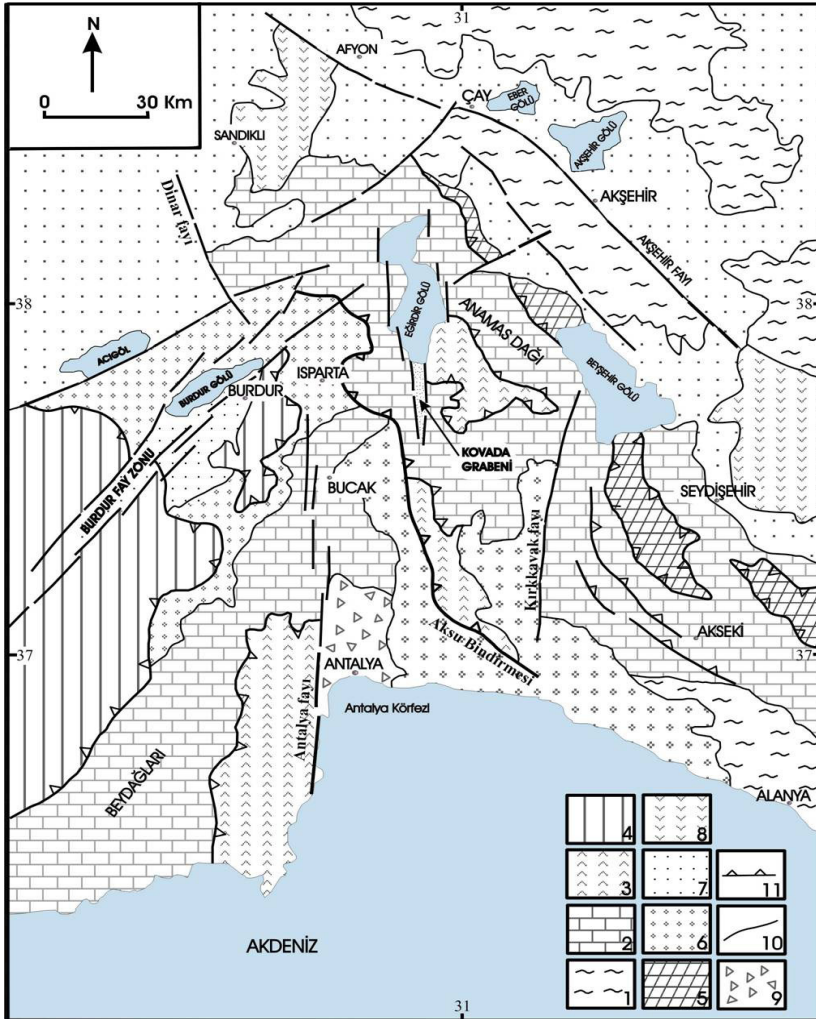


Şekil 1: Batı Anadolu da yer alan Neojen havzalarının konumları (Helvacı ve Yağmurlu, 1995).

## 2. BÖLGESEL JEOLJİ

GB Anadolu'da, Isparta açısı olarak adlandırılmış bölgesel ölçekli coğrafik yapı, neotektonik dönemde Toroslari oluşturan Mesozoyik yaşlı karbonat ekseninin, Antalya Körfezi kuzeyinde ters V şeklinde bükülmesi ile oluşmuştur (Blumenthal, 1963).

Yörede doğal bir simetri eksenini oluşturan K-G uzanımlı Eğirdir-Kovada Graben yapısı, Isparta Açısını doğu ve batı olmak üzere simetrik iki bölüme ayırır. Batıda yer alan karbonat platformu, Beydağları otokton istifini oluştururken, doğu bölümünü ise Akseki-Anamas otokton istifini oluşturur (Poisson vd., 1984; 2003). Isparta açısını, birbiriyle kesişen ve neotektonik dönem ürünü olan KD ve KB gidişli, bölgesel makaslama fayı karakterindeki, batıdan Fethiye-Burdur fay zonuna ait bileşenler ile doğudan Akşehir-Simav fay zonuna ait bileşenler sınırlandırır (Şekil 2).



**Şekil 2:** Yalvaç-Yarıkkaya Neojen havzasının jeolojik konumu ile çevreleyen Neojen öncesi kaya birlikleri ve bölgesel ölçekli önemli kırık sistemleri (Poisson vd., 1984 ile Özgül, 1984'den değiştirilerek alınmıştır). (1) Peleozoyik yaşlı metamorfik kayalar, (2) Mesozoyik yaşlı karbonatlı kayalar, (3) Antalya napları, (4) Likya napları, (5) Beyşehir-Hoyran napları, (6) Denizel Tersiyer tortulları, (7) Karasal Neojen tortulları, (8) Neojen volkanitleri, (9) Antalya travertenleri, (10) Normal faylar, (11) Bindirme fayları.

Isparta açısının iç kısmında yer alan Neojen yaşlı Yalvaç havzası, doğudan ve kuzeyden Ordovisiyen-Permiyen yaşlı düşük dereceli metamorfik kayalardan oluşan litolojiler ile karbonat kökenli birimler tarafından çevrilmiştir.

Havzanın güneyinde, büyük bölümüyle Akseki-Anamas karbonat istifini oluşturan Mesozoyik otokton kayalarından oluşan Anamas Dağları yer alırken, Yalvaç ve Beyşehir havzalarını birbirinden ayıran önemli bir paleomorfolojik temel yükseltisi özelliği sunana ve Beyşehir-Hoyran naplarını oluşturan ofiyolit karmaşığı, havzayı batıdan, kuzeye doğru sınırlar.

### 3. STRATİGRAFİ

İnceleme alanının içinde bulunduğu Miyosen-Pliyosen zaman aralığı içinde çökelen tortulların oluşturduğu Yalvaç Neojen havzasında, düşük dereceli metamorfikler, karbonat kayalar ve ofiyolit karmaşığından türemiş Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı temel kayalar ile Neojen yaşlı tortullar yer alır (Şekil 3).

YAŞ		FORMASYON	LİTOLOJİ	LİTOLOJİ TANIMI	
SENOZOYİK	KUVATERNER			Alüvyon Yamaç molozu	
	NEOJEN	GÖKSÖĞÜT		Kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn, kilitaşı, çakiltası, kömür	
				Kilitaşı, silttaşı, kumtaşı, çamurtaşı, çakiltası	
		ÜST MIYOSEN	AYVALI		Kireçtaşı, tüfit, aglomera
		MIYOSEN	YARIKKAYA		Çakiltası, marn, kilitaşı, çamurtaşı ardalanması, üstte killi kireçtaşı, marn, kireçtaşı ile kömür damarı
MESOZOYİK PALEOZOYİK	TEMEL KAYALAR			Şist, kireçtaşı, ultrabazik kayalar	

Şekil 3: Yarıkkaya Neojen havzasının genelleştirilmiş stratigrafik kesiti (Bulut, 1989 ve Yağmurlu, 1990'dan değiştirilerek).

## TEMEL KAYALAR

Sultandağları ve çevresinde yayılım gösteren Üst Kambriyen-Alt Ordovisiyen yaşlı Seydişehir formasyonu ile Jura-Triyas yaşlı Hacılabaz Kireçtaşı, Geyikdağı Birliği adı verilen (Özgül, 1976), otokton konumlu kayalardan oluşur.

Seydişehir formasyonu (Dean ve Monod, 1970; Özgül 1976), sarımsı-yeşil ile kahverengimsi-yeşil, yeşilimsi-mor renklerde şist, fillit, sleyt ile meta-kumtaşı ve meta-çakiltası ardalanmasından oluşur.

Hacılabaz kireçtaşı da, çoğunlukla altta koyu grimsi- siyahımsı, boz, yersel olarak sarımsı-grimsi renklerde olabilen, bol çatlaklı, orta-

kalın tabakalı dolomit, dolomitik kireçtaşı ile başlamakta, üstte doğru kalın-çok kalın olabilen yersel masif görünümlü dolomitik kireçtaşı ve kireçtaşı ile devam etmektedir. Demirkol (1981) tarafından adlandırılan ve Sultandağları ile çevresindeki yörede geniş yayılım gösteren Hacıalabaz kireçtaşları, Seydişehir formasyonunun açısız bir uyumsuzlukla üstler (Şekil 4). Bununla birlikte, inceleme alanı Ayvalı-Yarıkkaya kuzeyindeki bölümlerde ise Seydişehir formasyonuna ait litolojilerin, Hacıalabaz kireçtaşını tektonik olarak üzerlediği gözlenir.



**Şekil 4:** Hacıalabaz kireçtaşlarının genel görünümü.

Yalvaç havzasının GB'sında, KB-GD uzanımlı yayılım gösteren, çoğunlukla serpantin, diyabaz, çört ve farklı boyutlarda bloklar ve olistrostromal birimlerden meydana gelen ofiyolit karmaşığın, Beyşehir-Hoyran napı (Poisson vd,1984; Özgül, 1984), İç Toros Ofiyolitli Karışığı Napı (Koçyiğit, 1983) gibi isimler verilmiştir.

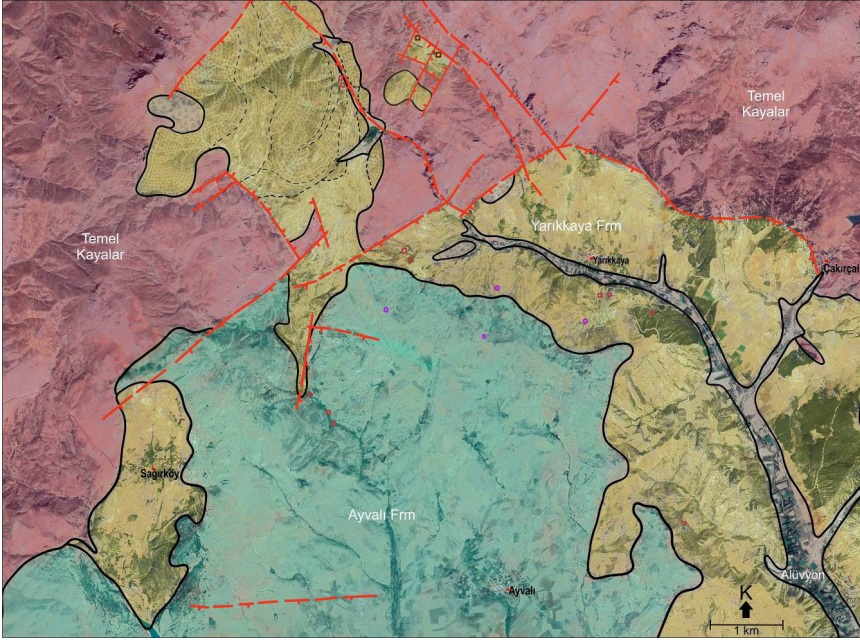
### **NEOJEN TORTULLAR**

Yalvaç havzasının Neojen stratigrafisini, yörede geniş yayılım gösteren karbonatlı ve kırıntılı tortul kayalar oluşturur. Miyosen-Pliyosen yaş aralığı içinde yer alan havza tortulları, hem yanal hem de düşey yönlerde birbirleriyle girik olan, litofasiyes sınırları ile birbirlerinden ayrılmışlardır (Şekil 5).

#### ***Yarıkkaya Formasyonu***

Demirkol (1984) tarafından ayrırtedilen ve yöredeki Neojen istifinin tabanını oluşturan formasyon, tabanda egemen olarak, zayıf pekleşmiş, soluk yeşilimsi sarımsı renklerde olabilen, düzensiz laminalanmalı, yersel kumtaşı ara katkılı, konglomera, kıltaşı, çamurtaşı ardalmasıyla başlar (Şekil 6). Yarıkkaya yakınlarında en fazla 70 metre kalınlıkta ölçülen birim, güneye doğru gidildikçe killi kireçtaşı ve marna derecelenme gösterir. Yarıkkaya formasyonuna ait bileşen tanelerin yansıttığı sedimantolojik özellikler, birimin tatlı su-göl ortamında çökelmiş olduğunu gösterir.





Şekil 5: İnceleme alanı, Sağırköy-Yarıkkaya havzasının GoogleEarthPro altlıklı uydu görüntüsü üzerindeki yalın jeoloji haritası.

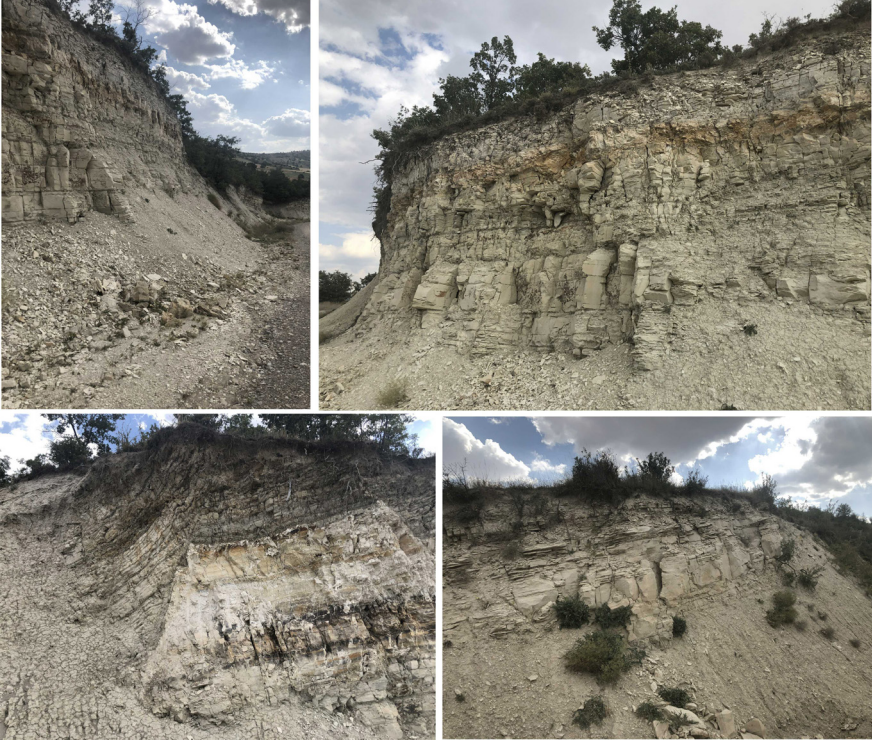


Şekil 6: Yarıkkaya formasyonuna ait litolojilerin görünümü.

### **Ayvalı Formasyonu**

Yarıkkaya formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelen, Üst Miyosen yaşlı formasyon, çoğunlukla grimsi-beyazımsı renklerde, tüfit, aglomera, kireçtaşı ardalanması şeklinde gözlemlenmiştir (Şekil 7). Gastropod ve tatlısu alg fosillerinin yoğun olarak yer aldığı formasyon, akarsu ve sığ göl ortamında çökelmiş olmalıdır (Bulut, 1989).





**Şekil 7:** Ayvalı formasyonuna ait litolojilerin genel saha görünümü.

### **Bağkonak formasyonu**

Altta birimleri uyumsuz olarak örten, kırmızımsı-pembe renklerde olabilen, zayıf pekleşmiş, kötü boylanmalı, çakıltaşı, çamurtaşı, siltaşı ve kiltaşından oluşan birim, yersel olarak kumtaşı ve kumlu kireçtaşı litolojilerini de içerir (Şekil 8). Yöredeki kalınlığı yaklaşık 250 metre olan Alt Pliyosen yaşlı formasyonun egemen litolojisi ve yanal stratigrafik özellikleri, birimin taşkın ovası ortamında çökelmiş olabileceğini gösterir.

### **Göksöğüt Formasyonu**

Demirkol (1984) tarafından, Yarıkkaya havzasının güneyinde yer alan tortullar için tanımlanan formasyon, açık renkli çakıltaşı, çamurtaşı, kiltası, marn, killi kireçtaşı ve kireçtaşı ardalanmasından oluşur (Şekil 9). Altta Bağkonak formasyonu ile yanal ve düşey yönlerde geçişli olan birim, kireçtaşı seviyelerinde bol miktarda tatlısu Gastropodları içerir. Formasyonun taban bölümünde gözlenen çakılların varlığı, gösel koşullara doğru açılım gösterebilen alüvyal yelpaze ortamını yansıtırken, kireçtaşının yansıttığı stratigrafik ve litolojik özellikler, birimin tatlısu- göl ortamında çökelmiş olabileceğini gösterir.



**Şekil 8:** Bağkonak formasyonuna ait litolojilerin görünümü.



**Şekil 9:** Göksöğüt formasyonuna ait litolojilerin görünümü.

Sahada gözlenebilen toplam kalınlığı 300 metreye ulaşan birim, havzanın kuzey ve doğu bölümlerinde Bağkonak formasyonu ile güney bölümlerinde ise Madenli formasyonu ile yanıl yönde giriklilik gösterir. Yörede bulunan ekonomik nitelikteki linyit düzeyi, Yarık kaya Formasyonunun alt bölümündeki kıltaşı üyesi içinde yer alır.

Göksöğüt formasyonu alttan üste doğru çakıltaşı ve bol gözenekli travertenimsi gölsel kireçtaşlarından yapıldır. Kalkerli çamurtaşı, siltli linyit ve çamurtaşı arakatmanları, Göksöğüt traverten kesiti içinde yaygın olarak bulunur. Yarık kaya formasyonunu uyumlu bir dokanakla üstleyen birim, havza güneyinde en fazla 150 m kalınlığa ulaşır. Kırkkbaş formasyonu alüvyal yelpaze ortamını simgeleyen kırmızımsı, kötü boylanmalı çakıltaşı ile çamurtaşı ara katkılarından oluşur. Havzanın kuzey bölümünde geniş



yayımlı gösteren birim, tüm yaşlı birimleri uyumsuz olarak üstler.

#### 4. KÖMÜR JEOLJİSİ

Sağırköy-Yarıkkaya Neojen havzasındaki ekonomik sayılabilecek nitelikteki kömür oluşukları Yarıkkaya Köyü'nün batı-kuzeybatısında yer alır. Yarıkkaya'nın batısında halen faaliyette olan ve diğeri ise terk edilmiş olan iki adet açık kömür ocağı bulunmaktadır. Açık ocaklarda yer alan linyit oluşukları ortalama 130-160 cm kalınlıktadır. Önceki yıllarda MTA tarafından yapılan sondaj sonuçlarına göre bu yöredeki kömür kalınlığı havzanın kuzeyine doğru giderek incelmektedir (Wedding, 1954; Wedding ve Inoue, 1967).

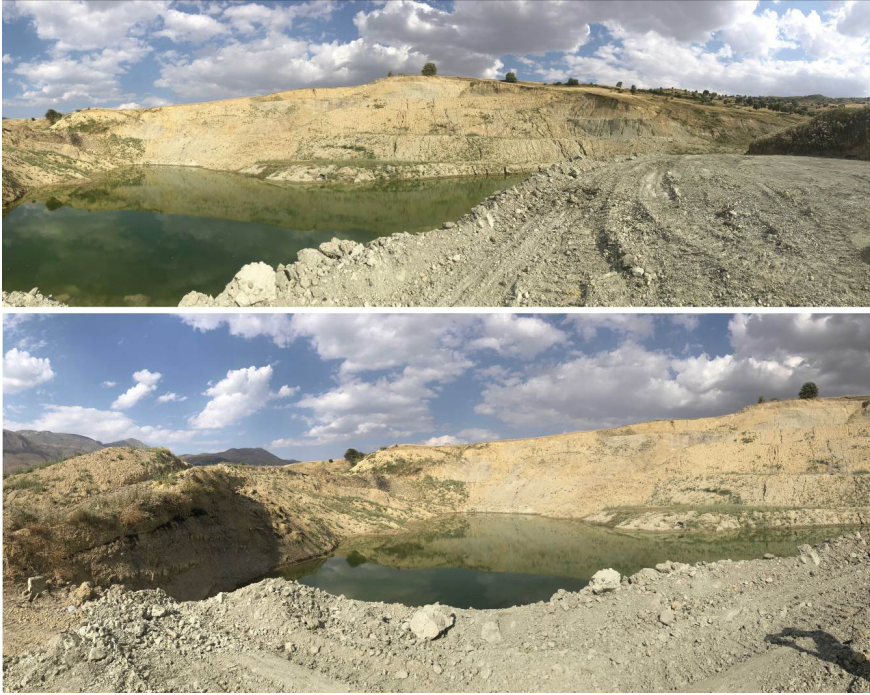
Görsel ortamda çökelmiş olan Yarıkkaya Formasyonunun en alt bölümündeki kiltaş ve marnlar içerisinde yer alan kömür oluşukları, koyu kahve ile siyahımsı renkte ince-düzgün laminalı olup, yumuşak killi linyit arasında değişen kömürleşme derecesine sahiptir (Şekil 10,11,12).



**Şekil 10:** Yarıkkaya formasyonunun üst bölümlerinde yer alan kömür damarlarının, Aktepe doğusundaki saha görünümü.



**Şekil 11:** *Ayvalı formasyonunun üst bölümlerinde yer alan kömür damarlarının, Güzyaka Tepe doğusundaki saha görünümü.*



**Şekil 12:** *Yarıkkaya formasyonunun üst bölümlerinde yer alan kömür damarlarının, Yarıkkaya ilçesi güneyindeki Küllüce Sırtındaki saha görünümleri.*

Kiltaşı ve çamurtaşı arakatıkları ile *Planorbis* sp.'den oluşan organizma kalıntıları kömür düzeyi içinde olağan olarak gözlenir. Kömür düzeyinin alt bölümünde yer alan kömürlü kiltaşı ve çamurtaşları genellikle koyu grimsi, bol kömürleşmiş bitki kalıntılı ve çok yaygın *Planorbis* sp. fosillidir.

Yarıkkaya Köyünün güneyinde ve batısında yer alan kömür düzeyleri, yeşilimsi masif görünümlü çamurtaşları tarafından üstlenir.

Yarıkkaya'nın yaklaşık 3 km kuzeybatısında Köçekkaya Mevkiinde bulunan kömür düzeyleri, yöreyi etkileyen faylarla sınırlandırılmış olup, kömür kalınlığı bu yöredeki faylanmaların ve kıvrımlanmaların etkisiyle yersel olarak 250 cm'ye kadar ulaşması mümkündür. Bu alandaki kömür düzeyleri, 15-20 metreyi geçmeyen bir taban çakıltaşı ile birlikte doğrudan temeli oluşturan Ordovisiyen yaşlı metasedimenter kayalar üzerinde oturur. Yarıkkaya'nın kuzeyinde Köçekkaya Mevkii batısında kalan kesimlerde, açılan yeni yol yarmalarında (Yarıkkaya-Çay yolu) çakıltaşı içinde yer alan ve toplam kalınlığı 20-40 cm'ye ulaşan linyit katmanları da bulunur.

İnceleme alanı ve çevresindeki kömür mostralarından alınan örneklerden elde edilen kimyasal analiz sonuçları, bu kömürlerin alt ısıl değerinin 3500 kcal/kg, nem oranının %17-20, kül miktarının % 18-23 ve kükürt değerinin de % 3-7 civarında olduğunu, siyah mat renkli ve orta kalitede sayılabilecek kömür özelliklerine sahip olduğunu gösterir.

Kömür düzeyi içinde kıltaşı ve çamurtaşı ara katkılarının yanı sıra, alt ve üst bölümlerinde üste doğru kabalaşmalı ve iyi tutturulmuş, kötü boylanmalı polijenik çakıltaşı yer alır. Alttaki çakıltaşı ile kömür düzeyi arasında ince bir çamurtaşı ve marn seviyesi bulunurken, üstteki çakıltaşı bazı kesimlerde, alttaki kömür katmanını aşındırarak, doğrudan alttaki çamurtaşları üzerine oturmaktadır. Yarıkkaya'nın kuzeybatısındaki, Köçekkayası Mevkiinde alüvyonal yelpaze oluşuğu çakıltaşı içinde bulunan kömürler, havza kenarında gelişen geçici bataklık ortamlarının varlığını yansıtır. Bu tür ortamlarda oluşan kömür katmanları yanal yönde sürekli olmayıp, kısa uzaklıklar içinde çakıltaşı gibi kaba taneli tortullara derecelenir (Şekil 10).

Yörede, önceki yıllarda MTA tarafından yapılan sondajlar, Sağırköy-Yarıkkaya havzasındaki kömürlerin, havzanın kuzeyine doğru giderek inceldiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, kömüre eşlik eden gölsel birimlerin kuzeyden güneye doğru yansıttıkları litofasiyes özellikleri, Orta Miyosen dönemindeki gölsel ortamın, havza ortasına doğru giderek derinleştiğini gösterir. Yöredeki kömür yatakları bu nedenle havzanın orta-güney bölümünde gelişen bataklık ortamlarında depolanmış olmalıdır. İnceleme alanındaki mostralar ve yarmalar ile önceki yıllarda araştırma amaçlı yapılan sondajlardan elde edilen verilere göre, Sağırköy-Yarıkkaya arasında havzasında, yaklaşık 6 milyon ton muhtemel bir rezervin olduğunu gösterir. Bununla birlikte, inceleme alanı dışında güney de yer alan Göksöğüt formasyonu içerisinde, düzgün ve geniş bir yayılım sunan kömür oluşum zonu, yanal olarak uzun mesafeler boyunca takip edilebilmektedir.



## SONUÇ

Sağırköy-Yarıkkaya Neojen havzasını dolduran tortul istif, egemen olarak alüvyal yelpaze, akarsu ve gölsel tortullardan oluşur. Havzayı çevreleyen Neojen öncesi temel kayaları, düşük dereceli metamorfitten karbonat kayalardan ve ofiyolit karmaşığında yapıldır.

Yörede, yer alan ekonomik kömür düzeyleri, gölsel tortul istifin tabanını oluşturan Göksöğüt formasyonu ile inceleme alanı Yarıkkaya Formasyonunun alt bölümünde gözlenen kilitaşı ve marnlar ait olan litolojiler içerisinde yer alır.

Kömürlerin yöredeki kalınlığı 1,30-1,60 metre arasında değişir. Önceki yıllarda MTA tarafından yapılan kimyasal analiz sonuçlarına göre, bölgedeki kömürlerin ortalama nem oranı % 17-20, kül % 18-23, toplam karbon % 25-30, uçucu madde % 28-33, kükürt % 2-3 ve alt ısı değeri 3500 kcal/kg mertebesindedir. Bu değerlere göre Sağırköy-Yalvaç havzasındaki kömürler, daha çok yumuşak kahverengi kömür (soft lignite) özelliğine sahiptir. İnceleme alanındaki mostralar ve yarmalar ile önceki yıllarda araştırma amaçlı yapılan sondajlardan elde edilen veriler, Sağırköy-Yarıkkaya arasında havzasında, yaklaşık 6 milyon ton muhtemel bir rezervin olduğunu gösterir. Yalvaç havzasında yer alan kömürlerin oldukça iyi sayılabilecek bir kalori değerine sahip olmaları, bunların ısınma amaçlı olarak konutlarda ve sanayi tesislerinde yakıt kaynağı olarak kullanılmasına imkan verebilecektir.

**KAYNAKÇA**

- Blumenthal, M. (1963), Le systeme structurel du Taurus sud-anatolien, *Memoire de la Societe Geoloque de France* 2, 611-662.
- Bulut, Y. (1989), Yalvaç-Şarkikaraağaç-Gelendost (Isparta) ve dolaylı Neojen havzasının detay jeolojik prospeksiyonu ve kömür olanakları, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Dean, W. T. ve Monod, O. (1970), The Lower Paleozoic stratigraphy and faunas of the Taurus Mountains near Beyşehir, Turkey: *Bull. Brit. Mus. Nat. His. Geol.*, c.19-8, s. 414-426.
- Demirkol, C. (1981), Sultandağ kuzeybatısının jeolojisi ve Beyşehir-Hoyran napı ile ilişkileri: Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, *Temel Bilimler Araştırma Grubu, Proje no. TBAG-382*, s.56, Ankara (yayımlanmamış).
- Demirkol, C. (1984), Geology and tectonics of the region south of Çay (Afyon): *International Symposium on the geology of the Taurus belt.*, 1983, 69-75, Ankara.
- Helvacı, C. Ve Yağmurlu, F. (1995), Geological setting and economic potential of the lignite and evaporite-bearing Neogene basins of Western Anatolia, Turkey, *Israel Journal of Earth Science*, 44,2, p.91-105.
- Koçyiğit, A. (1983), Hoyran Gölü (Isparta büklümü) dolayının tektoniği: *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, 26,1-10. Ankara.
- Özgül, N. (1976), Torosların bazı temel jeoloji özellikleri, *Bull. Geol. Soc.*, Turkey, 19, 65-78.
- Özgül, N. (1984). Stratigraphy and tectonic evolution of the central Taurides: Tekeli, O. ve Göncüoğlu. M.C. ed., *Geology of the Taurus Belt.*, MTA Yayl., 77-90, Ankara.
- Poisson, A., Akay, E., Dumont, J.F. ve Uysal, Ş. (1984), The Isparta Angle; a Mesozoic paleorift in the Westem Taurides: eds. Tekeli, O. and Göncüoğlu. M.C., *Geology of the Taurus Belt.*, MTA Yayınları, p.11-26, Ankara.
- Poisson, A., Yağmurlu, F., Bozcu, M. and Şentürk, M. (2003), New insights on the tectonic setting and evolution around the apex of the Isparta Angle (SW Turkey): *Geol. Journal*, 38: 257-282.
- Wedding, H. (1954), Yalvaç Şimaündeki Yarikkaya Linyit Zuhuru Hakkında Tetkikat Raporu, *MTA Raporu*, Derleme No: 2200, Ankara.
- Wedding, H. ve Inoue, E. (1967), Isparta-Gelendost sahasındaki linyitli Pliyosen tabaka hakkında rapor, *MTA Raporu*, No. 3920 (yayımlanmamış), Ankara.
- Yağmurlu, F. (1991), Yalvaç-Yarikkaya Neojen havzasının stratigrafisi ve depolanma ortamları: *Türkiye Jeol. Kur. Bült.*, c. 34, s.9-19, Ankara.





# Bölüm 3

## **BİR OTOMOTİV YAN SANAYİ İŞLETMESİNDE HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMİ TASARIMI VE ÇOK AMAÇLI ÇİZELGELEME PROBLEMİ ÇÖZÜMÜ<sup>1</sup>**



*Sena AYDOĞAN<sup>2</sup>  
Şafak KIRIŞ<sup>3</sup>*

---

1 Bu makale, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Prof. Dr. Şafak Kırış danışmanlığında Sena Aydoğan'ın aynı başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

2 Sena Aydoğan, Nursan Kablo Donanımları Ar-Ge Merkezi, Kütahya, Türkiye; Email: saydogan@nursankd.com

3 Şafak Kırış, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye; Email: safak.kiris@dpu.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Global dünyadaki işletmeler, hızla değişen müşteri isteklerine cevap verebilmek, bilgi, malzeme ve işgücü akışını iyileştirmek, kaynakları daha verimli kullanmak ve işgücü motivasyonunu artırmak amacıyla, kullandıkları üretim sistemi ve tesis yerleşim düzenini değiştirmek zorunda kalabilmektedirler. Böyle durumlarda, işletme ve çalışılan müşteriler için en uygun olan üretim sistemi tasarımı uygulanmalı ve tüm yönetim kademeleri ile birlikte yeni uygulanan sistem benimsenmelidir.

Hücresele üretim sistemi, benzer parçaları ve makineleri, hücreler halinde gruplar ve her hücreyi yalnızca bir parça ailesini üretecek şekilde organize eder. Böylece verimlilik artışı, taşıma sürelerinde kısalma, süreç içi stoklarda azalma gibi avantajlar elde edilir. Sonuç olarak, israflar ortadan kaldırılır ve daha kısa sürede, daha az maliyetli ve kaliteli ürünler üretilir.

Bu çalışmada, sürece göre yerleşimin uygulandığı bir üretim bölümünde, hücresele üretim sistemi tasarımı yapılmıştır. Öncelikle parça makine matrisi oluşturulmuş ve Derece Sıralamasıyla Kümelendirme Yöntemi (ROC algoritması) ile hücreler belirlenmiştir. Daha sonra oluşturulan hücrelere yönelik çizelgeleme problemi tanımlanarak, toplam gecikme ve ortalama tamamlanma zamanı amaçları en iyilenmeye çalışılmıştır. Önerilen çizelgeleme modeli, sıra bağımlı hazırlık süresini dikkate almaktadır ve çok amaçlı olarak kurulmuştur. Çok amaçlı ve karma tam sayılı programlama modelini çözmek için, epsilon kısıt yöntemi ve ağırlık toplam yöntemi kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ele alınan problem ve sektör, yapısı gereği dinamik bir yapıya sahiptir. İşletme için kalıcı çözümlerin sağlanması amacıyla, kullanıcı kolaylığı sağlayan bir bilgi sistemi önerisi yapılmıştır.

## 2. YÖNTEM

İşletme yöneticileri; kaliteli, müşterilerin isteklerine istedikleri an cevap verebilen, maliyetleri düşük ve doğaya duyarlı bir tesis istemektedirler. Bunu sağlayabilmenin yollarından biri ise, geleneksel üretim sistemlerinin yerine, teknolojiye ayak uydurarak, yeni üretim stratejilerini hayata geçirmektir.

Grup teknolojisi, üretimde benzer özellikler taşıyan ürünlerin bir araya getirilip gruplandırılması ile yüksek derecede ekonomik fayda sağlayan ve verimliliği artıran bir kavramdır (Yozgat ve Atmaca, 2018). Hücresele üretim ise grup teknolojisi prensiplerinin üretim sistemi tasarımı ve yönetimine uygulanmasıdır (Özkırım ve Durmuşoğlu, 2007). Hücresele üretim oluşturulurken amaç; üretim maliyetini, işlem süresini ve/veya alan kaybını azaltmaktır (Cömert vd., 2016).

Yapılan çalışmanın adımları, aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1.Çalışma yapılan üretim bölümünün incelenmesi ve problemlerin belirlenmesi
- 2.İlgili bölümde kullanılan makinelerin ve üretilen parçaların incelenmesi
- 3.Uygulama yapılan bölüm için en uygun üretim sistemine karar verilmesi
- 4.Üretilen ürünlerin üretim akışlarının belirlenmesi
- 5.Parça makine matrisinin oluşturulması
- 6.Hücre oluşturmak için ROC algoritması kullanılması
- 7.Oluşturulan hücrelere çizelgeleme probleminin tanımlanması ve modellenmesi
- 8.Çizelgeleme probleminin, amaçlarının, kısıtlarının ve karar değişkenlerinin, işletme öncelikleri doğrultusunda belirlenmesi
- 9.Kurulan çok amaçlı karma tam sayılı matematiksel modelin çözümü için epsilon kısıt ve ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminin kullanılması ve sonuçların değerlendirilmesi
- 10.İşletme için kullanım kolaylığı sağlması ve dinamik yapıya cevap verebilmesi amacıyla bilgi sistemi tasarımının yapılması

Hücreyel üretim sistemi ile ilgili literatürde birçok araştırma ve uygulama mevcuttur. Ele alınan konu ile ilgili özellikle son yıllarda yapılan uygulama çalışmaları ve literatür taramaları ele alınmaya çalışılmıştır. Xue ve Offodile (2020), çalışmalarında, dinamik hücre oluşturma ve hiyerarşik üretim planlama problemlerini ele alan, doğrusal olmayan karma tam sayılı programlama modeli kullanmışlardır. Danilovic ve Ilic (2019), hücre oluşum probleminin çözümü için yeni bir algoritma önermişlerdir. Karmaşık ve çok amaçlı hücre oluşum problemlerinin çözümü için geliştirilen hibrit algortma, literatürde bilinen problemlerle kıyaslanmış ve daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Mejia-Moncayo ve Battaia (2019), hücreyel üretim sistemindeki üç temel problem olan hücre oluşumu, iş yükü dengeleme ve hücre yerleşimine çözüm getirmek amacıyla, kesikli genetik bakteri algoritması adında melez bir algoritma geliştirmişlerdir. Bortolini vd. (2019), yaptıkları çalışmada, hücreyel üretim sisteminde makine yerleşimi, üretim alanı optimizasyonu ve hücreler arası akışın azaltılması üzerine çalışmışlardır. Bychkov ve Batsyn (2018), hücreyel üretim sisteminde hücrelerin oluşumu için değişken sayıda hücre içeren bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Papaioannou ve Wilson (2010), 1997-2008 yılları arasında, hücreyel üretim sisteminde hücre oluşturma problemlerine getirilen çözüm yaklaşımlarını incelemişlerdir.

Çizelgeleme problemleri, araştırmacılar ve uygulayıcılar tarafından sıklıkla kullanılan bir çalışma alanıdır. Gerçek hayat problemlerinde genellikle birden fazla amaç en iyilenmek istenmektedir. Bu sebeple çok amaçlı problemler öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, özellikle son yıllarda üretim çizelgeleme alanında yapılan çok amaçlı çizelgeleme çalışmaları ve çözüm yöntemleri incelenmeye çalışılmıştır. Mohammadi vd. (2020), üretim ve dağıtım kararlarının beraber ele alındığı bir esnek atölye çizelgeleme problemi üzerinde durmuşlardır. Saraç ve Sağır (2019), bir kağıt fabrikasında, toplam firenin ve kullanılacak bobin çeşitliliğinin azaltılmasıyla amacıyla, tam sayılı doğrusal matematiksel model geliştirmişlerdir. Zheng ve Sui (2019), atölye çizelgeleme probleminin bir çeşidi olan farklı rotalara sahip atölye çizelgeleme probleminde, tamamlanma zamanını ve seçilecek rotanın süreç sürelerini en küçükmeye çalıştıkları, iki amaçlı tam sayılı programlama modeli kurmuşlardır. Ceylan vd. (2019), beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren firmada, sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Zhang vd. (2019), çalışmalarında, tek makine partisi çizelgeleme problemini incelemektedirler. Deliktaş vd. (2019), esnek atölye tipi hücre çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Lee ve Asllani (2004), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin dikkate alındığı, toplam tamamlanma zamanını ve toplam gecikmeyi en küçükleyen bir karma tam sayılı doğrusal programlama modeli sunmuşlardır.

### 3. UYGULAMA

#### 3.1. Hücreyel Üretim Sistemi Tasarımında İzlenen Yol

Bu çalışmada, hücrelerin oluşturulması için ilk olarak King (1980) tarafından geliştirilen, “Derece Sıralamasıyla Kümelenendirme Yöntemi (ROC algoritması)” kullanılmıştır. Derece Sıralamasıyla Kümelenendirme Algoritması, makine satırlarını ve parça sütunlarını yeniden düzenleyerek blok diyagonal matris elde etmeye çalışan hiyerarşik olmayan bir kümelenendirme metodudur (Atamtürk, 2009).

Uygulama yapılan aile grubu incelendiğinde, 14 adet farklı parçadan oluştuğu ve toplamda 14 adet makine kullanımı olduğu görülmüştür. Hücrelerin oluşturulması için öncelikle olarak, makine-parça matrisi oluşturulmuştur. İşletme bilgilerinin gizliliği açısından, makine ve parça isimlerinde kodlamaya gidilmiştir.

Çizelge 3.1’deki parça-makine matrisinde, satırlar makineleri, sütunlar parçaları temsil etmektedir. Seçilen parçanın ilgili makinede işlem görme durumu “1” olarak belirtilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Parça-makine matrisi.

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14
m1	1		1								1		1	
m2				1		1								1
m3					1		1		1			1		
m4				1		1								1
m5					1		1		1			1		
m6		1						1		1				
m7					1		1		1			1		
m8		1						1		1				
m9					1		1		1			1		
m10				1		1								1
m11					1		1		1			1		
m12				1		1								1
m13	1		1								1		1	
m14	1		1								1		1	

Uygulamada hücre oluşturmak için kullanılan ROC algoritması, hesaplama kolaylığı sağlayan, hiyerarşik olmayan bir yöntemdir. 7 adımdan oluşan ROC algoritması adımları izleyen çizelgeler ile verilmiştir.

Çizelge 3.2 ile Adım 1 verilmiştir. Her sütun için bir öncekinin iki katı olacak şekilde değerler verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** ROC algoritmasının ilk matrisi.

8192 4096 2048 1024 512 256 128 64 32 16 8 4 2 1

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14
m1	1		1								1		1	
m2				1		1								1
m3					1		1		1			1		
m4				1		1								1
m5					1		1		1			1		
m6		1						1		1				
m7					1		1		1			1		
m8		1						1		1				
m9					1		1		1			1		
m10				1		1								1
m11					1		1		1			1		
m12				1		1								1
m13	1		1								1		1	
m14	1		1								1		1	

Çizelge 3.3 ile Adım 2 verilmiştir. Bu adımda, her satırdaki “1”lere karşılık gelen değerler, satırların yanlarına yazılarak toplanır.

**Çizelge 3.3.** ROC algoritmasının ikinci matrisi.

8192 4096 2048 1024 512 256 128 64 32 16 8 4 2 1

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	
m1	1		1								1		1		10250
m2				1		1								1	1280
m3					1		1		1			1			676
m4				1		1								1	1280
m5					1		1		1			1			676
m6		1						1		1					4176
m7					1		1		1			1			676
m8		1						1		1					4176
m9					1		1		1			1			676
m10				1		1								1	1280
m11					1		1		1			1			676
m12				1		1								1	1280
m13	1		1								1		1		10250
m14	1		1								1		1		10250

Çizelge 3.4 ile Adım 3 verilmiştir ve değerleri bulunan satırlar, azalan sıra ile sıralanmıştır.

**Çizelge 3.4.** ROC algoritmasının üçüncü matrisi.

8192 4096 2048 1024 512 256 128 64 32 16 8 4 2 1

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	
m1	1		1								1		1		10250
m13	1		1								1		1		10250
m14	1		1								1		1		10250
m6		1						1		1					4176
m8		1						1		1					4176
m2				1		1								1	1280
m10				1		1								1	1280
m12				1		1								1	1280
m4				1		1								1	1280
m5					1		1		1			1			676
m3					1		1		1			1			676
m7					1		1		1			1			676
m9					1		1		1			1			676
m11					1		1		1			1			676

Çizelge 3.5 ile Adım 4 verilmiştir. Her satır için bir öncekinin iki katı olacak şekilde değerler verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** ROC algoritmasının dördüncü matrisi.

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	
m1	1		1								1		1		8192
m13	1		1								1		1		4096
m14	1		1								1		1		2048
m6		1						1		1					1024
m8		1						1		1					512
m2				1		1								1	256
m10				1		1								1	128
m12				1		1								1	64
m4				1		1								1	32
m5					1		1		1			1			16
m3					1		1		1			1			8
m7					1		1		1			1			4
m9					1		1		1			1			2
m11					1		1		1			1			1

Çizelge 3.6’da Adım 5 verilmiştir. Her sütundaki “1”lere karşılık gelen değerler, sütunların altlarına yazılarak toplanmıştır.

**Çizelge 3.6.** ROC algoritmasının beşinci matrisi.

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	p13	p14	
m1	1		1								1		1		8192
m13	1		1								1		1		4096
m14	1		1								1		1		2048
m6		1						1	1						1024
m8		1						1	1						512
m2				1		1								1	256
m10				1		1								1	128
m12				1		1								1	64
m4				1		1								1	32
m5					1		1		1			1			16
m3					1		1		1			1			8
m7					1		1		1			1			4
m9					1		1		1			1			2
m11					1		1		1			1			1

14336 1536 14336 480 31 480 31 1536 31 1536 14336 31 14336 480

Çizelge 3.7 ile Adım 6 verilmiş, değerleri bulunan sütunlar, azalan sıra ile sıralanmıştır.

**Çizelge 3.7.** ROC algoritmasının altıncı matrisi.

	p1	p3	p11	p13	p2	p8	p10	p4	p6	p14	p5	p7	p9	p12	
m1	1	1	1	1											8192
m13	1	1	1	1											4096
m14	1	1	1	1											2048
m6					1	1	1								1024
m8					1	1	1								512
m2								1	1	1					256
m10								1	1	1					128
m12								1	1	1					64
m4								1	1	1					32
m5											1	1	1	1	16
m3											1	1	1	1	8
m7											1	1	1	1	4
m9											1	1	1	1	2
m11											1	1	1	1	1

14336 14336 14336 14336 1536 1536 1536 480 480 480 31 31 31 31

Çizelge 3.8’de Adım 7 verilmiş ve köşegen yapı oluşma durumu incelenmiştir. Eğer köşegen yapı oluşmadıysa Adım 1’e dönlür. Bu algoritmanın ikinci tekrarının da aynı sonucu verdiği görüldüğünden, algoritma durdurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre dört hücrenin oluştuğu görülmüştür.



**Çizelge 3.8.** ROC algoritmasının yedinci matrisi.

	p1	p3	p11	p13	p2	p8	p10	p4	p6	p14	p5	p7	p9	p12
m1	1	1	1	1										
m13	1	1	1	1										
m14	1	1	1	1										
m6					1	1	1							
m8					1	1	1							
m2								1	1	1				
m10								1	1	1				
m12								1	1	1				
m4								1	1	1				
m5											1	1	1	1
m3											1	1	1	1
m7											1	1	1	1
m9											1	1	1	1
m11											1	1	1	1

Birinci hücre; p1, p3, p11 ve p13 parçalarından ve m1, m13 ve m14 makinelerinden oluşmaktadır. İkinci hücre; p2, p8 ve p10 parçalarından ve m6 ve m8 makinelerinden oluşmaktadır. Üçüncü hücre; p4, p6 ve p14 parçalarından ve m2, m10, m12 ve m4 makinelerinden oluşmaktadır. Dördüncü hücre ise, p5, p7, p9 ve p12 parçalarından ve m5, m3, m7, m9 ve m11 makinelerinden oluşmaktadır.

### 3.2. Hücre İçi Akış Tipi Çizelgeleme Problemi için Çok Amaçlı Karma Tam Sayılı Programlama Modeli Önerisi

Bu bölümde, oluşturulan hücreler için, hücre içi akış tipi çizelgeleme amaçlı bir model ele alınacaktır. Oluşturulan hücreler, iç müşteri olan montaj bölümünün motor tesisatlarının üretildiği üretim hatlarını besleyeceklerdir. Nihai müşteri çevrim süresi 2,15 dakika olarak hesaplanan projede, stok ise 3 saattir, bu da 83 ürüne ve 178,45 dakikaya karşılık gelmektedir. Bu sebeple, yapılan tüm çizelgelenmeler, bu kısıtları sağlamak üzerine kurulmak zorundadır.

Oluşturulan hücrelerde akış tipi üretim gerçekleşmekte olup, her parçanın işlem süresi için hücredeki tüm makinelerin işlem sürelerinin toplamı kullanılmıştır. Parçaların hazırlık süreleri ise her hücrenin ilk makinesinde mevcut olup, diğer makinelerde hazırlık süresi yoktur. Hücrelere atanan her parça, aynı akış sırasına ve farklı hazırlık süresine sahiptir. Nihai müşterinin uygulama yapılan işletmeden talep ettiği ürünler değişmemektedir fakat ürünleri istedikleri zamanlar değişmektedir. Bu sebeple, işlem süreleri sabit, teslim süreleri değişkendir.

Kurulacak matematiksel model, nihai müşterinin her gün siparişlerini değiştirdiği için günlük çizelgeleme yapılacak şekilde kurulmuştur. Çok amaçlı olarak kurulan modelin amaçları, işletme yöneticilerinin fikirleri ve öncelikleri doğrultusunda belirlenmiştir. İlk amaç, toplam gecikmenin (*TG*) en küçüklenmesi, ikinci amaç ise, ortalama tamamlanma zamanının (*OTZ*) en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. Kurulan matematiksel

model, Lee ve Asllani'nin 2004 yılında önerdikleri, sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme probleminden uyarlanmıştır.

### 3.2.1. Epsilon ( $\epsilon$ ) kısıt yöntemi ile çok amaçlı karma tam sayılı programlama problemi çözümü

Önerilen modelde iki amaçlı bir çizelgeleme hedeflenmiştir. Epsilon kısıt yöntemi ile problem tek amaçlı hale getirilmiştir. İlk olarak, her amaç en iyilenerek, sonuç tablosu oluşturulmuştur. Daha sonra, uygulama yapılan işletme yöneticilerinin fikir ve önerileri doğrultusunda, kriter amaç fonksiyonu, toplam gecikmenin en küçüklenmesi olarak seçilmiştir. Ortalama tamamlanma zamanının en küçüklenmesi amaç fonksiyonu ise kısıt olarak yazılarak uzlaşık çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Karma tam sayılı ve çok amaçlı olarak önerilen çizelgeleme modeli izleyen şekilde verilmiştir.

#### İndisler

$$i = j = \text{işler} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$k = \text{sıra} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

#### Karar Değişkenleri

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ işi } k. \text{ sıraya atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & j \text{ işi } k. \text{ sıraya atanırsa ve } i \text{ işinden sonra çizelgenecekse} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$$T(k) = k. \text{ sıradaki işin tamamlanma zamanı}$$

$$A(k) = k. \text{ sıradaki işin hazırlık süresi}$$

$$B(k) = k. \text{ sıradaki işin işlem süresi}$$

$$C(k) = k. \text{ sıradaki işin teslim süresi}$$

$$g_j = j \text{ işinin gecikmesi}$$

$$TG = \text{toplam gecikme}$$

$$OTZ = \text{ortalama tamamlanma zamanı}$$

#### Parametreler

$$p_j = j \text{ işinin işlem süresi}$$

$$d_j = j \text{ işinin teslim süresi}$$

$$h_j = \text{ilk sıradaki işin hazırlık süresi}$$

$$s_{ij} = i \text{ işi } j \text{ işinden önce sıralandığında, } j \text{ işinin hazırlık süresi}$$

$$n = \text{iş sayısı}$$

Amac fonksiyonu

$$\text{Min } N1 = TG \quad (3.1)$$

$$\text{Min } N2 = OTZ \quad (3.2)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^n x_{jk} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{jk} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ijk} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (3.5)$$

$$x_{jk} + x_{ik-1} - 1 \leq y_{ijk} \\ i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, k = 2, \dots, n, i \neq j \quad (3.6)$$

$$A1 = \sum_{j=1}^n h_j x_{j1} \quad (3.7)$$

$$A(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n s_{ij} y_{ijk} \quad k = 2, \dots, n, i \neq j \quad (3.8)$$

$$B(k) = \sum_{j=1}^n x_{jk} p_j \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.9)$$

$$t(1) = A(1) + B(1) \quad (3.10)$$

$$t(k) = t(k-1) + A(k) + B(k) \quad k = 2, \dots, n \quad (3.11)$$

$$C(k) = \sum_{j=1}^n h_{jk} d_j \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

$$g_j \geq t_j - C_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

$$\sum g_j = TG \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

$$(\sum t_j)/n = OTZ \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\} \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 2, \dots, n \quad (3.16)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\}$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, n \quad (3.17)$$

$$t_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.18)$$

$$g_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.19)$$

$$A_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.20)$$

$$B_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.21)$$

$$C_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.22)$$

Eşitlik (3.1) ve (3.2) amaç fonksiyonlarıdır. Eşitlik (3.1), ürünlerin toplam gecikmesinin en küçüklenmesini hedeflemektedir. Eşitlik (3.2) ise, ortalama tamamlanma zamanlarının en küçüklenmesini hedeflemektedir. Kısıt (3.3) her sıraya yalnızca bir işin atanabilmesini sağlar. Kısıt (3.4) her işin yalnızca bir sıraya atanabilmesini sağlar. Kısıt (3.5) ve kısıt (3.6) ile  $i$  işini takip eden yalnızca bir  $j$  işi olmasını sağlar. Kısıt (3.7), ilk sıradaki işin hazırlık süresini temsil eder. Kısıt (3.8),  $k$ . sıradaki işin hazırlık süresini temsil eder. Kısıt (3.9),  $k$ . sıradaki işin işlem süresini temsil eder. Kısıt (3.10) ile ilk işin tamamlanma zamanı hesaplanır. Kısıt (3.11) ile  $k$ . sıradaki işin tamamlanma zamanı hesaplanır. Kısıt (3.12) ile  $k$ . sıradaki işin teslim süresi hesaplanır. Kısıt (3.13) ile  $j$  işinin gecikmesi bulunur. Kısıt (3.14) ile toplam gecikmenin, tüm  $j$  işlerinin gecikmelerinin toplamı olduğu gösterilir. Kısıt (3.15) ile ortalama tamamlanma zamanı hesaplanır. Kısıt (3.16) – (3.22), karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarını temsil etmektedir.

Ürünlerin teslim süreleri, nihai müşteri tarafından günlük olarak değiştirildiğinden, dinamik bir çizelgeleme amaçlanmıştır. Bu sebeple bu değerler, müşteriden gönderilen zamanlar doğrultusunda Lingo 11.0 programına Excel dosyasından çekilmiş ve en iyi değerler bulunmuştur. Karar verici için anlaşılmasının kolay olması nedeniyle, her hücrenin en iyilenen değerleri ve parça sıralamaları Excel dosyasına raporlanmıştır.

**TG** değişkenimiz, 83 ürüne karşılık gelen 178,45 dakikanın altında olmak zorundadır. Bu değer altında kalan tüm gecikmeler stok ile telafi edilebilmektedir. Tüm hücreler için işletme yöneticileri tarafından yapılan seçimler, bu doğrultuda yapılmıştır.

Hücre 1 için parametre değerleri olan işlem süresi ve hazırlık süresi değerleri Çizelge 3.9’da verilmiştir. Bu hücreye tanımlanan 4 adet ürün vardır. Bunlar p1, p3, p11 ve p13’tür.

**Çizelge 3.9.** Hücre 1 için parametre değerleri.

	İşlem Süresi(dk)	Hazırlık Süresi(dk)
p1	74,29	3,20
p3	82,68	2,70
p11	101,40	3,20
p13	83,20	1,99

Nihai müşteri çevrim süresi olan 2,15 dakika değeri baz alınarak, **OTZ** değişkeni en iyi değerine kadar çalıştırılmıştır. Sonuç tablosu ve iterasyon tablosu sırasıyla Çizelge 3.10 ve 3.11’de verilmiştir.

**Çizelge 3.10.** Hücre 1 için sonuç tablosu.

	TG	OTZ
F1	84,63	220,10
F2	203,40	210,22

1. hücre için 6 iterasyon yapılmıştır. 5. ve 6. iterasyonda nihai müşteri stoğu koşulu sağlanamamaktadır. 4. iterasyonda **TG** değişkeni 129,46 ve **OTZ** değişkeni 213,65 değerini almaktadır. Bu iterasyonda **OTZ** değişkeninin en iyi çözümüyle arasında 3,43 dakika fark vardır. **TG** değişkeni ise en iyi çözüme göre 44,83 dakika artmıştır fakat nihai müşteri stoğu değerini karşılamaından dolayı olurlu bir çözüm olarak görülmüştür. Bu sebeple 4. iterasyon seçilmiştir. Bu durumda parçaların sıralaması p13, p3, p1, p11 şeklindedir.

**Çizelge 5.11.** Hücre 1 için iterasyon sonuçları.

	TG	OTZ
1	84,63	220,10
2	129,46	217,95
3	129,46	215,80
4	129,46	213,65
5	203,40	211,50
6	203,40	210,22

Hücre 1 sonuçlarının kullanıcı ve yöneticiler için anlaşılabilir olması amacıyla Lingo 11.0 programından Excel dosyasına raporlama yapılmıştır. Oluşturulan rapor, her çizelgeleme döneminde Lingo programından güncel verileri almaktadır. Şekil 3.1'de mevcut çizelgeleme dönemindeki sonuçlar verilmiştir.

HÜCRE 1	
x11	0
x12	0
x13	1
x14	0
x21	0
x22	1
x23	0
x24	0
x31	0
x32	0
x33	0
x34	1
x41	1
x42	0
x43	0
x44	0

TG	129,46
OTZ	213,32

ÜRETİM SIRALAMASI	
1	PARÇA 13
2	PARÇA 3
3	PARÇA 1
4	PARÇA 11

**Şekil 3.1.** Hücre 1 için epsilon kısıt yöntemine göre çizelgeleme raporu.

Hücre 2 için parametre değerleri olan işlem süresi ve hazırlık süresi değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir. Bu hücreye tanımlanan 3 adet ürün vardır. Bunlar p2, p10 ve p8’dir.

**Çizelge 3.12.** Hücre 2 için parametre değerleri

	İşlem Süresi(dk)	Hazırlık Süresi(dk)
p2	154,70	2,50
p10	124,50	2,70
p8	142,40	2,50

Sonuç tablosu ve iterasyon tablosu sırasıyla Çizelge 3.13 ve 3.14’de verilmiştir.

**Çizelge 3.13.** Hücre 2 için sonuç tablosu.

	TG	OTZ
F1	26,80	294,53
F2	196,80	275,37

2.hücre için 10 iterasyon yapılmıştır. 8. ve sonraki iterasyonlarda, nihai müşteri stoğu koşulu sağlanamamaktadır. 7. iterasyonda **TG** değişkeni 131,2 ve **OTZ** değişkeni 281,43 değerini almaktadır. Bu iterasyonda **OTZ** değişkeninin en iyi çözümüyle arasında 6,06 dakika fark vardır. **TG** değişkeni ise en iyi çözüme göre 104,40 dakika artmıştır fakat nihai müşteri stoğunu karşılayabileceğinden, olurlu bir çözüm olarak görülmüştür. Bu sebeple 7. iterasyon seçilmiştir. Bu durumda parçaların sıralaması p10, p2 ve p8 şeklindedir.

**Çizelge 3.14.** Hücre 2 için iterasyon sonuçları.

	TG	OTZ
1	26,80	294,33
2	79,30	292,18
3	131,20	290,03
4	131,20	287,88
5	131,20	285,73
6	131,20	283,58
7	131,20	281,43
8	196,80	279,28
9	196,80	277,13
10	196,80	275,37

Hücre 3 için parametre değerleri olan işlem süresi ve hazırlık süresi değerleri Çizelge 3.15’de verilmiştir. Bu hücreye tanımlanan 3 adet ürün vardır. Bunlar p14, p4 ve p6’dır.

**Çizelge 3.15.** Hücre 3 için parametre değerleri.

	İşlem Süresi(dk)	Hazırlık Süresi(dk)
p14	114,00	2,45
p4	134,31	2,45
p6	97,00	2,87

Sonuç tablosu ve iterasyon tablosu sırasıyla Çizelge 3.16 ve 3.17’de verilmiştir.

**Çizelge 3.16.** Hücre 3 için sonuç tablosu.

	TG	OTZ
F1	11,32	228,60
F2	46,32	222,27

3.hücre için 4 iterasyon yapılmıştır. Bu hücrede nihai müşteri stoğunu etkileyen bir iterasyon yoktur. Yani, **TG** değişkeni her durumda müşteri stoğu değerinin altında kalmaktadır. Bu sebeple **OTZ** değişkeninin en iyi değeri olan 4. iterasyon seçilmiştir. Bu iterasyonda **TG** değişkeni en iyi çözüme göre 35 dakika artmıştır fakat nihai müşteri stoğu değerini karşılayabileceğinden olurlu bir çözümdür. Bu durumda parçaların sıralaması p6, p14 ve p4 olmuştur.

**Çizelge 3.17.** Hücre 3 için iterasyon sonuçları.

	TG	OTZ
1	11,32	228,60
2	46,32	226,45
3	46,32	224,30
4	46,32	222,27

Hücre 4 için parametre değerleri olan işlem süresi ve hazırlık süresi değerleri Çizelge 3.18’de verilmiştir. Bu hücreye tanımlanan 4 adet ürün vardır. Bunlar p7, p9, p12 ve p5’tir.

**Çizelge 3.18.** Hücre 4 için parametre değerleri

	İşlem Süresi(dk)	Hazırlık Süresi(dk)
p7	124,13	2,30
p9	115,65	2,80
p12	136,73	3,10
p5	32,40	2,30

Sonuç tablosu ve iterasyon tablosu sırasıyla Çizelge 3.19 ve 3.20’de verilmiştir.

**Çizelge 3.19.** Hücre 4 için sonuç tablosu.

	TG	OTZ
F1	19,40	232,40
F2	169,41	221,71

4.hücre için 6 iterasyon yapılmıştır. Bu hücrede nihai müşteri stoğunu etkileyen bir iterasyon yoktur. Yani **TG** değişkeni her durumda müşteri stoğu değerinin altında kalmaktadır. Bu sebeple **OTZ** değişkeninin en iyi değeri olan 6. iterasyon seçilmiştir. Bu iterasyonda **TG** değişkeni en iyi çözüme göre 150,01 dakika artmıştır fakat nihai müşteri stoğu değerini karşılamasından dolayı olurlu bir çözümdür. Bu durumda parçaların sıralaması p5, p9, p7 ve p12 olmuştur.

**Çizelge 3.20.** *Hücre 4 için iterasyon sonuçları.*

	TG	OTZ
1	19,40	232,40
2	65,76	230,25
3	65,76	228,10
4	112,38	225,95
5	167,11	223,80
6	169,41	221,71

### 3.2.2. Ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile çok amaçlı karma tam sayılı programlama problemi çözümü

Ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile tek amaçlı hale döndürülen matematiksel model ile uzlaşık çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının amacı, karar vericiye, amaç fonksiyonları arasındaki tercihlerini belirtme imkanı vermesi ve amaçların bir arada değerlendirilmesinin sağlanmasıdır. İlk olarak, her amaç fonksiyonuna normalleştirme işlemi yapılmıştır. Daha sonra karar vericiden, amaç fonksiyonu ağırlık değerleri ve teslim süreleri istenmiştir. Girilen değerler, Lingo 11.0 programına aktarılmış ve en iyi değerler elde edilmiştir. Karar verici için anlaşılmasının kolay olması nedeniyle, her hücrenin en iyilenen değerleri, ağırlıklar ve parça sıralamaları Excel dosyasına aktarılmıştır. Karma tam sayılı ve çok amaçlı olarak önerilen çizelgeleme modeli için epsilon kısıt yöntemi çözümünde kurulan matematiksel modele izleyen ifadeler eklenmiştir.

İndisler

$$l = \text{amaç fonksiyonları} \quad l = 1,2$$

Karar Değişkenleri

$$Z = \text{ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonu}$$

Parametreler

$$w_l = l. \text{amaç fonksiyonu ağırlığı}$$

Amaç fonksiyonu

$$\text{Min } N1 = Z \quad (3.23)$$

Kısıtlar

$$Z = w_l * TG + w_{l+1} * OTZ \quad l = 1,2 \quad (3.24)$$

Eşitlik (3.23) kurulan modelin amaç fonksiyonudur ve kısıt (3.24) ile ağırlıklandırılmış amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır. Hücre 1 için mevcut parametre değerleri, ağırlıklar ve teslim sürelerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.21’de verilmiştir.



**Çizelge 3.21.** Hücre 1 için ağırlıklı toplam skalerleştirme sonuçları.

	TG Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	OTZ Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	Z Amaç Fonksiyonu Değeri	TG Değeri	OTZ Değeri
1	0,60	0,40	0,57	84,63	220,10

Hücre 1 için duyarlılık analizi ile verilen ağırlıkların amaç fonksiyonlarına olan etkisi incelenmiştir. Çizelge 3.22 ile duyarlılık analizi sonuçları verilmiştir. Hücre 1 için kullanıcı tarafından belirlenen ağırlıklar ve teslim süreleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, **TG** değişkeni ve **OTZ** değişkeni, epsilon kısıt yönteminde kullanılan, **TG** değişkeninin en iyilendiği sonuçlar ile aynı çıktığı görülmüştür. Parçaların sıralaması ise, p13, p3, p11 ve p1 şeklinde olmaktadır. Duyarlılık analizi sonuçlarına göre ise, **TG** değişkenine 0,10 ve 0,00 değerleri dışındaki verilen tüm ağırlıklarda, sonuçların etkilenmediği görülmüştür. **TG** değişkenine 0,10 ağırlık değeri ve **OTZ** değişkenine 0,90 verildiğinde, **TG** değerinin, en iyi çözümüne göre 44,83 dakika, **OTZ** değişkeninin ise en iyi çözümüne göre 3,10 dakika arttığı görülmüştür. Epsilon kısıt yöntemi ile çözülen problem sonuçlarına göre yapılan karşılaştırmada, **TG** değerinin 44,83 dakika azaldığı, **OTZ** değişkeninin ise 6,45 dakika arttığı tespit edilmiştir.

**Çizelge 3.22.** Hücre 1 için duyarlılık analizi sonuçları.

	TG Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	OTZ Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	Z Amaç Fonksiyonu Değeri	TG Değeri	OTZ Değeri
1	1,00	0,00	0,31	84,63	220,10
2	0,90	0,10	0,37	84,63	220,10
3	0,80	0,20	0,44	84,63	220,10
4	0,70	0,30	0,50	84,63	220,10
5	0,60	0,40	0,57	84,63	220,10
6	0,50	0,50	0,63	84,63	220,10
7	0,40	0,60	0,70	84,63	220,10
8	0,30	0,70	0,76	84,63	220,10
9	0,20	0,80	0,83	84,63	220,10
10	0,10	0,90	0,88	129,46	213,32
11	0,00	1,00	0,91	203,40	210,22

Hücre 1 sonuçlarının kullanıcı ve yöneticiler için anlaşılabilir olması amacıyla Lingo 11.0 programından Excel dosyasına raporlama yapılmıştır. Oluşturulan rapor, her çizelgeleme döneminde Lingo programından güncel verileri almaktadır. Şekil 3.2’de mevcut çizelgeleme dönemindeki sonuçlar verilmiştir.

HÜCRE 1	
x11	0
x12	0
x13	0
x14	1
x21	0
x22	1
x23	0
x24	0
x31	0
x32	0
x33	1
x34	0
x41	1
x42	0
x43	0
x44	0

w1	0,60
w2	0,40
TG	84,63
OTZ	220,10
Z	0,57

ÜRETİM SIRALAMASI	
1	PARÇA 13
2	PARÇA 3
3	PARÇA 11
4	PARÇA 1

Şekil 3.2. Hücre 1 için ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemine göre çizelgeleme raporu.

Hücre 2 için mevcut parametre değerleri, ağırlıklar ve teslim sürelerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.23’de verilmiştir. Hücre 2 için kullanıcı tarafından belirlenen ağırlıklar ve teslim süreleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, **TG** değişkeni ve **OTZ** değişkeni; epsilon kısıt yönteminde kullanılan, **TG** değişkeninin en iyilendiği sonuçlar ile aynı çıktığı görülmüştür. Parçaların sıralaması ise, p2, p8 ve p10 şeklinde olmaktadır.

Çizelge 3.23. Hücre 2 için ağırlıklı toplam skalerleştirme sonuçları.

	TG Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	OTZ Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	Z Amaç Fonksiyonu Değeri	TG Değeri	OTZ Değeri
1	0,60	0,40	0,50	26,80	294,53

Hücre 3 için mevcut parametre değerleri, ağırlıklar ve teslim sürelerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.24’de verilmiştir. Hücre 3 için kullanıcı tarafından belirlenen ağırlıklar ve teslim süreleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, **TG** değişkeni ve **OTZ** değişkeni; epsilon kısıt yönteminde kullanılan, **TG** değişkeninin en iyilendiği sonuçlar ile aynı çıktığı görülmüştür. Parçaların sıralaması ise, p14, p6 ve p4 şeklinde olmaktadır.

Çizelge 3.24. Hücre 3 için ağırlıklı toplam skalerleştirme sonuçları.

	TG Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	OTZ Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	Z Amaç Fonksiyonu Değeri	TG Değeri	OTZ Değeri
1	0,60	0,40	0,40	11,32	228,62

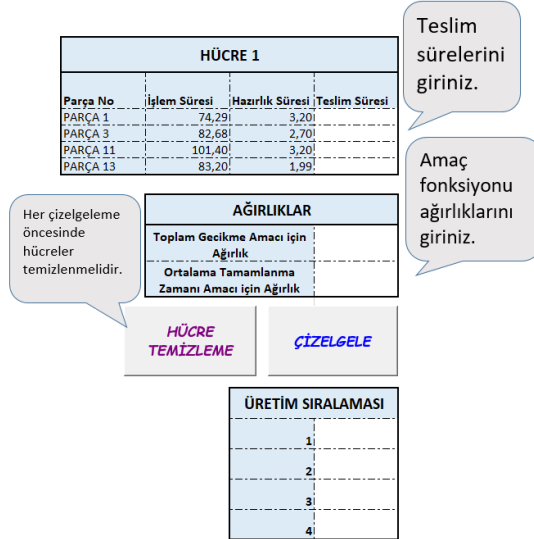
Hücre 4 için mevcut parametre değerleri, ağırlıklar ve teslim sürelerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.25’de verilmiştir. Hücre 4 için

kullanıcı tarafından belirlenen ağırlıklar ve teslim süreleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, **TG** değişkeni ve **OTZ** değişkeni; epsilon kısıt yönteminde kullanılan, **TG** değişkeninin en iyileştiği sonuçlar ile aynı çıktığı görülmüştür. Parçaların sıralaması ise, p5, p12, p7 ve p9 şeklinde olmaktadır.

**Çizelge 3.25.** Hücre 4 için ağırlıklı toplam skalerleştirme sonuçları.

	TG Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	OTZ Amaç Fonksiyonu Ağırlığı	Z Amaç Fonksiyonu Değeri	TG Değeri	OTZ Değeri
1	0,60	0,40	0,34	19,41	232,40

Uygulamanın yapıldığı üretim bölümünde, üretilecek parçalar hürelere atanmıştır. Atanan parçalara çizelgeleme problemi tanımlanmış ve modellenmiştir. Ele alınan problem dinamik bir yapıya sahiptir. Nihai müşterinin sipariş ettiği ürünler değişmemekte fakat her parçayı talep ettiği zamanlar değişmektedir. Üretim bölümündeki kullanıcıların kullanım kolaylığı sağlaması, dinamik yapıya kalıcı çözüm getirmesi ve yeni yazılım maliyetleri yaratmaması amacıyla Excel çözücü üzerinde bir bilgi sistemi önerilmiştir. Çözücü tasarlanırken, işletme öncelikleri ve talepleri değerlendirilmiştir. Değişken teslim sürelerinin varlığı ve amaç fonksiyonları arasındaki önem ağırlıklarının zamanla değişme durumu göz önüne alındığında, ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminin kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Hücre 1 için kullanıcının elle giriş yaptığı kullanıcı sayfası Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Hücre 1 için kullanıcı giriş sayfası.

Ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminde, amaç fonksiyonlarının normalleştirme işleminin yapılması gerekmektedir. Normalleştirme işleminde, her amaç fonksiyonu, maliyet yapılı problemlerde en büyük değerine, kazanç problemlerinde en küçük değerine bölünür. Ele alınan problem, maliyet yapılı bir problem olmasından dolayı, her amaç fonksiyonu en büyük değerine bölünmelidir. Çözücüde, **TG** ve **OTZ** amaç fonksiyonlarının en büyük değerlerinin bulunması amacıyla, iki ayrı Excel çözücü sekmesi oluşturulmuştur. Kullanıcının, parça sıralamasını elde edebilmesi için öncelikle **TG** ve **OTZ** sekmelerindeki çözücüleri çalıştırması gerekmektedir. Bu sekmelerde, ilgili hücrelere atanan parçaların, parametre değerleri olan işlem süresi ve hazırlık süresi değerleri ve her çizelgeleme döneminde değişecek olan teslim süresi değerleri mevcuttur. Teslim süreleri, kullanıcının elle giriş yaptığı hücrelerden dinamik olarak çekilmektedir. İşlem süresi ve hazırlık süresi değerleri, hücrelere atanan parçaların değişmemesinden dolayı sabittir. Bu hücrelere kullanıcı müdahalesi engellenmiştir. Hücre 1 için **TG** ve **OTZ** amaç fonksiyonlarının en büyük değerlerinin hesaplandığı sekmeler Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

HÜCRE 1			
Parça No	İşlem Süresi	Hazırlık Süresi	Teslim Süresi
PARÇA 1	74,29	3,20	320
PARÇA 3	82,68	2,70	180
PARÇA 11	101,40	3,20	220
PARÇA 13	83,20	1,99	160

Her çözüm öncesinde hücreler temizlenmelidir.

**HÜCRE TEMİZLEME**

**EN BÜYÜK TG HESAPLA**

Şekil 3.4. Hücre 1 için TG amaç fonksiyonu çözüm sayfası.

HÜCRE 1			
Parça No	İşlem Süresi	Hazırlık Süresi	Teslim Süresi
PARÇA 1	74,29	3,20	320
PARÇA 3	82,68	2,70	180
PARÇA 11	101,40	3,20	220
PARÇA 13	83,20	1,99	160

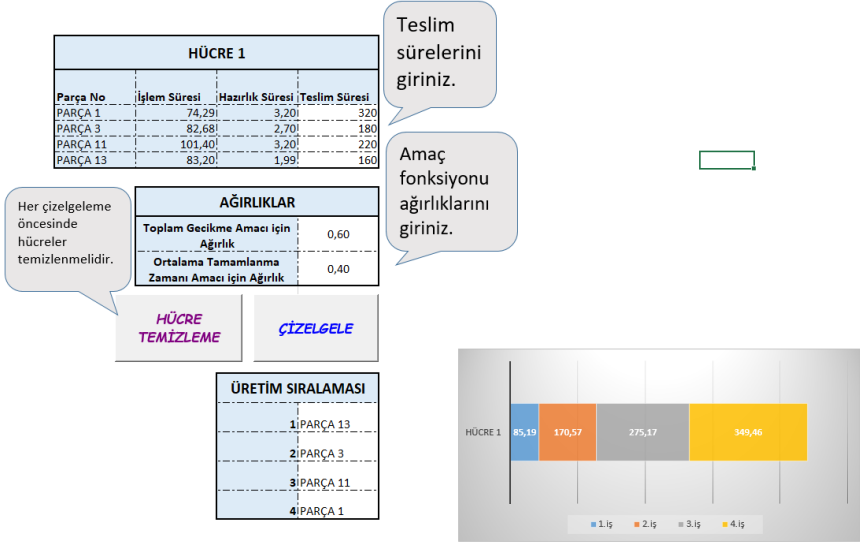
Her çözüm öncesinde hücreler temizlenmelidir.

**HÜCRE TEMİZLEME**

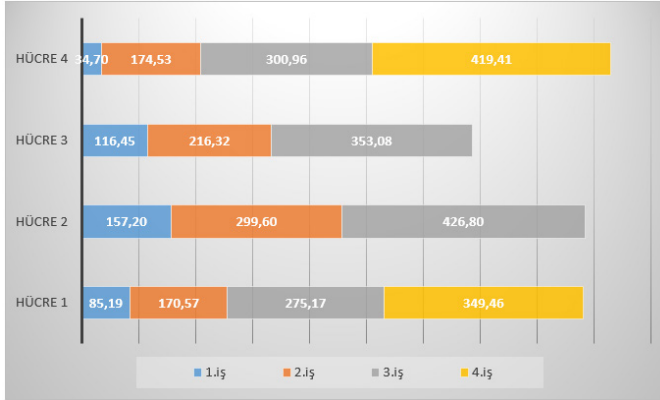
**EN BÜYÜK OTZ HESAPLA**

Şekil 3.5. Hücre 1 için OTZ amaç fonksiyonu çözüm sayfası.

Hücre 1 için çizelgeleme sonuçları, iş sıralamaları ve tamamlanma zamanları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Hücre 1 için çizelgeleme sonuçları.



Şekil 3.7. İş sıralamaları ve tamamlanma zamanları.

Ele alınan problemdeki amaç fonksiyonu, kısıtlar ve karar değişkenlerinin yer aldığı çözücü ekranı Şekil 3.8’de verilmiştir.

Şekil 3.8. Hücre 1 için çözücü ekranı.

Çalışma yapılan her hücreye ayrı olarak modellenen çizelgeleme problemi için, ayrı Excel sekmelerine çözücüler tanıtılmış ve dinamik bir yapı sağlanmıştır. Çözücü içerikleri aynı olup, işlem süresi ve hazırlık süresi her hücreye atanan parçaların parametre değerleridir. Teslim sürelerini ve amaç fonksiyonu ağırlıklarını kullanıcı elle giriş yapacak ve her amaç fonksiyonunun en büyük sürelerini bulmak için **TG** ve **OTZ** sekmelerindeki butonlardan çözücülerini çalıştıracaktır.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rekabetin her geçen gün arttığı günümüz dünyasında işletmeler, hem karlılığını hem de müşteri memnuniyetini artırıcı hamleler yapmak zorundadırlar. Bu amaçlar doğrultusunda, her işletme, problemlerini belirleyerek çözüm yolları arar fakat istenilen sonuçların elde edilebilmesi için birden çok amacın en iyilenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, çok amaçlı programlama giderek önem kazanmaktadır.

Ağırlıklı toplam skalerleştirme ve epsilon kısıt yöntemi, skalerleştirme yöntemlerindedir. Her iki yöntemde de çok amaçlı olarak ele alınan problem, uzlaşık çözüm elde edilmesi amacıyla, tek amaçlı hale döndürülerek karar vericiye tatmin edici sonuçlar sunmaktadır. Ağırlıklı toplam skalerleştirme yönteminde karar verici, amaç fonksiyonları arasındaki önem ağırlıklarını kendi belirleyerek, problemin çözüm uzayını istediği yönde hareket ettirebilir. Epsilon kısıt yönteminde ise karar verici, amaçlardan birini en iyilerken, diğer amaçları kısıt olarak problemine ekler. Epsilon kısıt yöntemi, kullanıcı kararlarını dikkate almadığı için, daha çok analiz tabanlı bir yöntemdir.

Bu çalışmada, otomotiv yan sanayinde faaliyet gösteren bir işletmede, sürece göre yerleşimin uygulandığı bir üretim bölümüne, iç müşteri

konumundaki üretim bölümünden gelen şikayetler doğrultusunda incelemeler yapılmıştır. İlgili bölümde, herhangi bir çizelgeleme yöntemi veya teknik analiz olmadan, yalnızca sorumluların tecrübelerine dayanarak üretim gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Bu sebeple, iç müşterilerin siparişlerinde gecikme, bitmiş ürün stok seviyelerinde ve süreç içi stoklarda artış, taşıma ve bekleme sürelerinde artış sebebiyle, parçaların tamamlanma zamanlarında gecikme meydana geldiği görülmüştür. Tespit edilen problemlerin çözümü için, öncelikli olarak, üretim sistemi değişikliği yapılmasının gerekliliği tespit edilmiştir.

Hücresele üretim sistemi, parçaları ve makineleri, hücreler halinde bir araya getirerek, yalnızca ilgili hücreye atanan parçaların üretilmesine imkan vermesi nedeniyle, süreç içi stok seviyelerinde düşüş, tamamlanma zamanlarında azalma ve israfların ortadan kaldırılmasında etkin rol oynar.

Çalışma yapılan üretim bölümündeki problemlerin ve israfların ortadan kaldırılması amacıyla, hücresele üretim sistemi tasarımı yapılmış, oluşturulan hücrelere atanan parçaların çizelgelenmesi amacıyla çok amaçlı çizelgeleme modeli önerilmiştir. Önerilen model, toplam gecikmenin ve ortalama tamamlanma zamanının en küçüklenmesini hedeflemektedir. Kurulan çok amaçlı matematiksel modelin çözümü için, ağırlıklı toplam skalerleştirme ve epsilon kısıt yöntemi kullanılmış, çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir ve en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ele alınan problem, gerçek hayat problemi olması sebebiyle, dinamik bir yapıya sahiptir. İşletme için kalıcı çözüm getirmesi amacıyla, Excel çözücü üzerinde bir bilgi sistemi önerilmiştir.

Oluşturulan bilgi sisteminde, çok amaçlı olarak ele alınan problemin tek amaçlı hale getirilip en iyi çözümünün elde edilmesi amacıyla, ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, karar vericinin amaç fonksiyonları arasındaki ağırlıkları, değişen koşulları göz önünde bulundurarak değiştirebilmesi ve her iki amacın da beraber değerlendirilerek uzlaşık çözüm elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Ele alınan problem için, hücre oluşturma yöntemi olarak, diğer dizi tabanlı yöntemler de kullanılabilir. Problem boyutu büyüdüğünde, matris tabanlı yöntemler, matematiksel programlama yöntemleri veya sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak sonuçlar değerlendirilebilir.

Modellenen çizelgeleme problemi, gelişen sektörde işletme önceliklerinin değişmesi durumunda, amaçların artırılması veya değiştirilmesi ile karar vericiye farklı çözümler sunabilir. Aynı zamanda, çok amaçlı olarak oluşturulan problemin çözüm yöntemi olarak farklı skalerleştirme yöntemleri ile çözümler incelenerek sonuçlar karşılaştırılabilir. İncelenecek problemin yapısına bağlı olarak, hem epsilon kısıt hem de ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemlerini beraber

kullanan melez yöntem kullanılabilir. Hücre içi akış tipi çizelgeleme probleminde hücreler arası istisnai veya artık parçaların varlığı söz konusu olması durumunda, bu durumları göz önünde bulunduracak çizelgeleme problemleri modellenmelidir. Problem boyutunun büyümesi durumunda, polinom zamanda olurlu çözümlerin elde edilmesi için sezgisel veya meta-sezgisel algoritmalara başvurmak daha uygun olur.

### **Teşekkür**

Bu çalışmada yer alan Nursan Kablo Donanımları A.Ş.'ye katkıları ve desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.



**KAYNAKLAR**

- Atamtürk, A. (2009). Hücresel imalat sisteminde hücre ve yerleşim düzeni tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 158s.
- Bortolini, M., Ferrari, E., Galizia, F. G., Mora, C., Pilati, F. (2019). Optimal redesign of Cellular Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*. 81, 1435-1440.
- Bychkov, I., Batsyn, M. (2018). An efficient exact model for the cell formation problem with a variable number of production cells. *Computers and Operations Research*. 91, 112-120.
- Ceylan, Z., Karan, R. E., Bakırcı, Ç., Sabuncu, S. (2019). Sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi: beyaz eşya sektöründe bir uygulama. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*. 1(3), 14-21.
- Cömert, S. E., Gökler, S. H., Yazgan, H. R. (2016). Hücresel imalat sistemlerinin k-means algoritması ve genetik algoritma ile tasarlanması: bir uygulama. *Apjes*, iv-iii, 41-47.
- Danilovic, M., Ilic, O. (2019). A novel hybrid algorithm for manufacturing cell formation problem. *Expert Systems With Applications*. 135, 327-350.
- Deliktaş, D., Torkul, O., Ustun, O. (2019). A flexible job shop cell scheduling with sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times using conic scalarization method. *International Transactions in Operational Research*. 26, 2410-2431.
- King, J. R. (1980). Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm. *International Journal of Production Research*. 18:2, 213-232.
- Lee, S. M., Asllani, A. A., Job scheduling with dual criteria and sequence-dependent setups: mathematical versus genetic programming. *Omega The International Journal of Management Science*. 32, 145-153.
- Mejia-Moncayo, C., Battaia, O. (2019). A hybrid optimization algorithm with genetic and bacterial operators for the design of cellular manufacturing systems. *IFAC PapersOnLine*. 52(13), 1409-1414.
- Mohammedi, S., Al-e-Hashem, S. M. J. M., Rekik, Y. (2020). An integrated production scheduling and delivery route planning with multi-purpose machines: A case study from a furniture manufacturing company. *International Journal of Production Economics*. 219, 347-359.
- Özkırım M., Durmuşoğlu, M. B. (2007). Dışsal rota esnekliğine sahip hücresel üretim sistemlerinin benzetim analizi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2(6), 41-52.

- Papaioannou, G., Wilson, J.M. (2010). The Evolution of Cell Formation Problem Methodologies Based on Recent Studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research*. 206(3), 509-521.
- Saraç, T., Sağır, M. (2019). Bir Oluklu Mukavva Kutu Fabrikasında Standart Bobin Enlerinin Belirlenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 27(1), 47-59.
- Xue, G., Offodile, F. (2020). Integrated optimization of dynamic cell formation and hierarchical production planning problems. *Computers & Industrial Engineering*. 139.
- Yozgat, S., Atmaca, E. (2018). Bir Mobilya Fabrikasında Hücre Tasarımı ve Hücre Etkinliğinin Belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 2(22), 377-390.
- Zhang, E., Liu, M., Zheng, F., Xu, Y. (2019). Single machine lot scheduling to minimize the total weighted (discounted) completion time. *Information Processing Letters*. 18, 1-16.
- Zheng, F, Sui, Y. (2019). Bi-objective Optimization of Multiple-route Job Shop Scheduling with Route Cost. *IFAC-PapersOnLine*. 52(13), 881-886.

# Bölüm 4

## **ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLER VE UZAY HARMONİKLERİ**



*Adem DALCALI<sup>1</sup>*

*Serhat Berat EFE<sup>2</sup>*

---

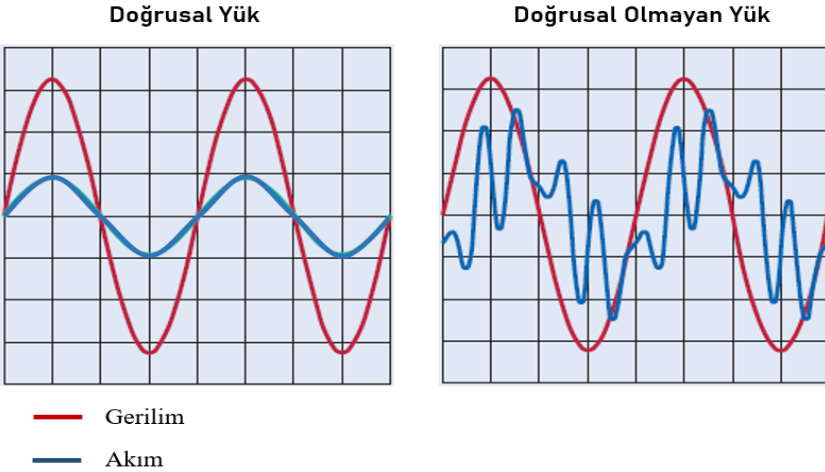
1 Adem DALCALI / Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bandırma.

2 Serhat Berat EFE / Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Bandırma.



## Harmonikler

Elektrik enerjisi bir ürün olarak tanımlanabilir ve her ürün gibi belirli kalite koşullarını taşımalıdır. Bu sistemlerinde akımlar ile gerilimlerin dalga şekilleri sinüzoidal biçimde olmalıdır. Bu şart, elektrik enerjisinde kaliteyi belirleyen ana etmenlerden biri ve kalitenin en temel tanımıdır. Söz konusu dalga biçimlerinin istenen koşulları taşıması için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve doğrusal yükler ile yüklenmesi gerekir. Doğrusal sistem elemanlarında akım ve gerilim uyumludur. Ancak güç sistemlerinden beslenen güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüzoidal yapısının bozulmasına, yani harmonik bozulmaya neden olabilirler. Doğrusal olmayan yükler, güçleri düşük değerde olsa dahi akım ve gerilim dalga şekillerini bozarlar (Efe vd., 2018). Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin akım ve gerilim büyüklüklerine ait dalga biçimleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Doğrusal ve doğrusal olmayan yükler için dalga biçimleri.

Harmonik bozulma elektriksel kirliliği ifade eder. Toplam harmonik bozulmanın (THB) belirli sınırların üzerinde olması birçok elektriksel probleme yol açar. Örneğin akım harmoniklerinin yüksek olması nedeniyle kablolar aşırı ısınarak zarar görebilir ya da elektrik makinalarında aşırı ısı ve salınım oluşur. Bunun yanı sıra hassas elektronik sistemler de harmonik bozunumlardan etkilenmektedir (Efe, 2010, Özer vd. 2018).

Harmoniklerin detaylı analizi için matematiksel modellerinin doğru biçimde tanımlanması gerekir. Bir akım sinyalinin harmonik bozunumunun matematiksel ifadesi

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (1)$$

Şeklinde verilir. Burada  $I_n = n$ . harmoniğin RMS değeridir.  $I_0$  sinyalin temel bileşeninin RMS değeri olmak üzere THB

$$THB = \frac{I_H}{I_0} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanabilir. THB'nin yüzde olarak ifadesi ise

$$THB(\%) = \frac{I_H}{I_0} \cdot 100 \quad (3)$$

olur.

Bir işletmede harmonikler, arıza olmadığı durumlarda da ortaya çıkarlar. Bunun çeşitli nedenleri vardır. Bu nedenlerin başında doğrusal olmayan elemanların sisteme dâhil olması gelmektedir. Ark fırınlarının çalışma prensibi benzeri normal işletme gereği koşullar elektrik devrelerinde doğrusal olmayan çalışmalara örnek verilebilir.

### **Harmoniklerin güç sistemi elemanları üzerindeki etkileri**

Harmonikler, elektrik güç sistemi elemanlarını olumsuz etkiler. Örneğin transformatörlerde ısınmayı ve kayıpları artırır. Gerilim harmonikleri demir kayıplarının artmasına ve yalıtım zorlanmalarına neden olurken, akım harmonikleri bakır ve kaçak akı kayıplarında artışa yol açar. Kayıplarda meydana gelen bu artışlar transformatörde ek ısınma meydana getirir (Karataş vd., 2005, Kocatepe vd., 2003).

Harmonik akımları ve gerilimlerinin diğer büyük bir etkisi, döner makinelerin ısısının demir ve bakır kayıplarının artışı ile artmasıdır. Bu yüzden harmonikler, elektrik makinelerinin veriminin düşmesine ve gürültülü çalışmalarına yol açar. Harmonik kaynaklı bozulmalarının neden olduğu diğer bir sorun motor ve generatör gibi elektrik makinelerinde sargıların aşırı ısınmasıdır. Her bir harmonik bileşeni statorda harmonik akım indükleyecek, ilave ısı meydana getirerek motorun ömrünü kısıltacaktır (Kocatepe vd., 2003).

Harmoniklerin güç elektroniği elemanlarının çalışması üzerinde de bozucu etkileri olmaktadır. Söz konusu elemanların temel çalışma mantığı gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesi üzerine kuruludur. Harmonikler, gerilimin sıfır geçişlerinin kaymasına veya noktalar arası gerilim farklarına neden olabilirler. Kontrol devrelerinin çoğu oluşabilecek bu kayma nedeniyle yanlış tepki verebilirler. Örneğin tristör kontrollü devrelerde, harmonik bozulma tristörlerin ateşleme anlarını değiştirebilir (Karataş vd., 2005).

Harmonik bileşenli akım ve gerilimler, flüoresan lambalarda duyulabilecek gürültülere neden olmakta, LED lambaların ise kontrol kartlarına zarar vererek kullanım ömürlerini oldukça kısıltmaktadır (Moulahoum vd., 2013).

## Harmoniklerin eliminasyonu

Harmonikler nedeniyle oluşabilecek bozulmaların engellenmesi sadece tasarımda alınacak tedbirlerle mümkün olmamaktadır. Bunun yanı sıra harmonik bileşenlerin şebekeye geçmesini önlemek için ek koruma önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik bileşeninin giderilmesini sağlayan bu yapılara harmonik filtresi adı verilir (Zubi vd., 2010). Harmonik filtreleri, bir ya da daha fazla harmoniğin etkisini azaltmak amacıyla tasarlanan devrelerdir. Bu filtreler harmonik kaynağı cihazlardan enerjilenen yüklerin gerilim dalga şeklini düzeltir, alternatif akım (AA) iletim ya da dağıtım sistemlerine katılan istenmeyen harmonik bileşenleri önler (Karataş vd., 2005; Demirören vd., 2004 & Kocatepe vd., 2003).

Yapısal olarak harmonik filtreler iki temel grupta incelenebilir;

- Yapısında kontrollü akım ya da gerilim kaynağı barındıran aktif filtreler
- Bileşenlerini direnç, kapasitör ve indüktans gibi pasif elemanların oluşturduğu pasif filtreler

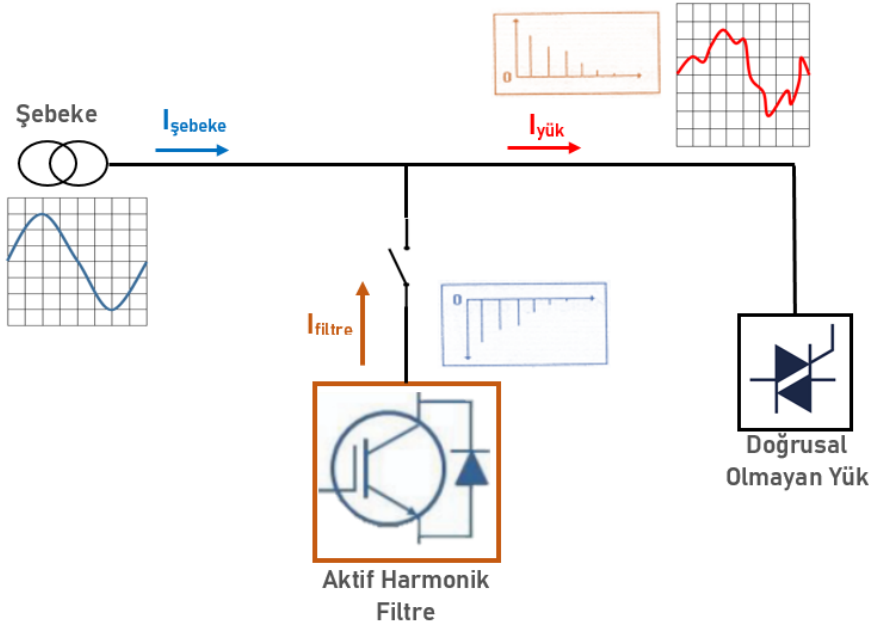
### Aktif filtreler

Harmonik etkinin giderilmesi için geliştirilmiş dinamik sistemlerdir (Tan vd., 2017). Aktif filtreler ileri güç elektroniği mantığına dayanır ve maliyetleri pasif filtrelere göre oldukça yüksektir. Aktif filtreler birden fazla harmoniğin eliminasyonu için ayarlanabilir ve enerji kalitesini etkileyen problemleri daha etkin biçimde ortadan kaldıracaktır (Rüstemli vd., 2015). Bunun yanında diğer önemli üstünlükleri, mevcut sistem yapısında değişiklikler yapıldığında bile etkili biçimde çalışmaya devam edebilmeleridir.

Aktif filtrenin çalışma prensibi, doğrusal olmayan yükün çekeceği ana bileşen dışındaki bileşenleri karşılamaktır (Rüstemli vd., 2013). Buna göre, bu filtreler yapıları gereği yük tarafından çekilen harmoniklerin analizini yaparak uygun bir fazda yüke uygularlar (Hrbac vd., 2017).

Şekil 2’de paralel aktif filtrenin uygulama şeması gösterilmiştir.



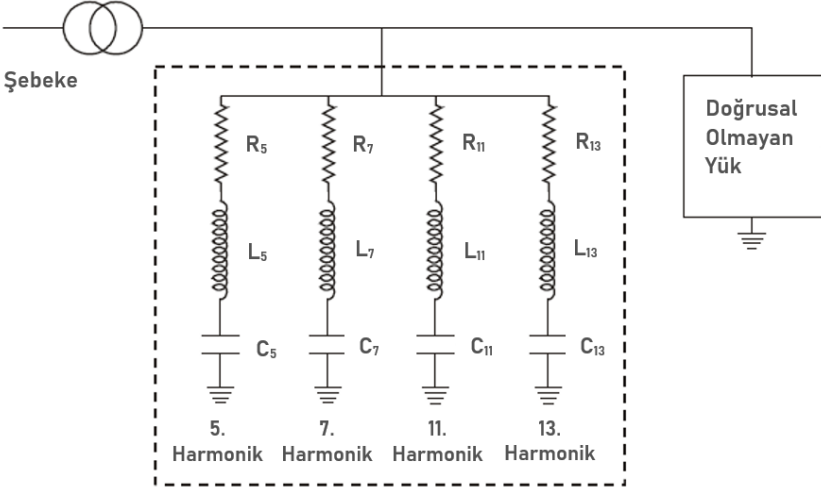


Şekil 2. Paralel aktif filtre uygulama şeması

### Pasif filtreler

Pasif filtreler, üreteç ile yük arasında konulan, temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör ve indüktans bileşimlerinden oluşmakta, bazı durumlarda direnç de ilave edilebilmektedir (Efe vd., 2019). Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir (Motta vd., 2016). Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu gereklidir (Efe, 2015). Pasif filtreler, güç sistemine bağlanma şekline göre seri ve paralel filtreler olarak sınıflandırılabilirler.

Paralel pasif filtrenin bir güç şebekesine bağlanması Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dört kademeli paralel pasif filtre (Efe, 2006).

Paralel filtreler şebeke ile harmonik kaynağı arasında şönt olarak bağlanırlar. Burada amaç, düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen bileşenlerin filtre üzerinden geçirilmesidir.

Seri filtreler, şebeke ile harmonik kaynağı arasında seri olarak bağlanırlar ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler.

Aktif ve pasif filtrelerin yanında, yaygın olarak kullanılmaya başlanan hibrit filtre yapıları da mevcuttur. Bu filtreler yapısal olarak aktif ve pasif harmonik filtrelerin birleştirilmesi ile oluşturulur. Bu tip filtreler, aktif ve pasif filtrelerde olduğu gibi, güç kayıplarını en aza indirmek ve harmoniklerin en yüksek performansla giderilmesini sağlamada kullanılırlar.

Aktif ve pasif filtreler, belirli hususlar bakımından Tablo 1'de karşılaştırılmışlardır.

Tablo 1. Aktif-pasif harmonik filtrelerin karşılaştırılması (Efe, 2010).

KONU	PASIF FİLTRE	AKTİF FİLTRE
Harmonikli akımların kontrolü	Her harmonik seviyesi için bir filtre kolu gerekli	Aynı anda birçok harmonik akımı kontrol edilebilir
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Filtrenin etkinliği azalır	Etkilenmez
Empedans etkisi	Rezonans riski vardır	Etkilenmez
Sisteme yeni yük ilavesi	Filtrenin değiştirilmesi durumu oluşabilir.	Sorun oluşturmaz.
Ebat ve ağırlık	Uygulama yapılan harmonik seviyelerine göre değişken	Hafif ve modüler
Maliyet	İlk maliyet düşük, bakım maliyeti yüksek	İlk maliyet yüksek, bakım masrafı düşük

### Ara-harmonikler

Alçak gerilim seviyelerinden ultra yüksek gerilim seviyelerine kadar tüm güç sistemlerinde en büyük sorunlardan biri güç kalitesi bozulmalarıdır. Gerilim ve akım için istenen dalga biçimleri düzgün sinüs iken, güç elektroniği cihazları, dönüştürücüler ve yüksek güçlü endüksiyon motorları gibi harmonik kaynaklar bu dalga biçimleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Doğrusal olmayan yüklerin güç kalitesi üzerindeki etkilerini önlemek için harmonik çalışmaları ve harmonik filtreleme yeterli değildir. Modern dünyada kullanılan cihaz ve donanımların çok daha hassas hale gelmesi, harmonik analizin yanı sıra ara-harmonik ve alt-harmonikleri içeren daha detaylı bir çalışma yapılması gerekliliğini doğurmuştur (Karimi vd., 2005).

Ara-harmonikler, sistemin temel frekansının tamsayı olmayan çarpanlarından oluşurlar. Daha detaylı tanımlar IEC-61000-2-2 ve IEC 61000-4-7’de yapılmıştır. IEC-61000-2-2’ye göre ara-harmonikler “temel frekansın tam sayı katı olmayan herhangi bir frekans” biçiminde tanımlanmıştır (IEC, 2000). IEC 61000-4-7’de ise “temel frekansın tam sayı katları olmayan frekanslara ara-harmonik denir, harmonikler ise temel frekansın tam sayı katlarındaki frekanslardır” ifadesi mevcuttur (IEC, 2005).

Harmonikler, ara-harmonikler ve alt-harmonikler, matematiksel olarak Tablo 2’de verildiği şekliyle tanımlanır.

**Tablo 2.** Harmoniklerin matematiksel tanımları

Harmonik	$f = nf_0$ (n sıfırdan büyük bir tamsayı)
Ara-harmonik	$f \neq nf_0$ (n sıfırdan büyük bir tamsayı)
Alt-harmonik	$f > 0 \text{ Hz}$ ve $f < f_0$
Doğru akım (DA) bileşen	$f = nf_0$ ; $n = 0$ için

Burada  $f_0$  temel frekans,  $f$  ise sinyalin spektral bileşen frekansıdır.

Ara-harmonikler, harmonikler gibi birçok problemi beraberinde getirmekle kalmamış, aynı zamanda ek problemler de yaratmıştır (Lin, 2014). Bu yüzden sistemlerde tespit edilmeleri çok önemlidir. Ara-harmoniklerin tespiti ve analizi ile ilgili çalışmalar günden güne artmaktadır. Bu çalışmalarda özellikle son yıllarda akıllı sistem uygulamaları göze çarpmaktadır. Köse ve ekibinin çalışması, Kalman filtrelemesi kullanılarak güç sinyallerinin analizine dayanmaktadır (Köse vd., 2010). Bunun yanı sıra bir başka çalışmada, güç sinyallerinin ara-harmonik analizi için spektral düzeltme tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir (Salor, 2009). (Valenzuela, 2009) ‘da tanımlandığı gibi, harmonik analizinin temelini Fourier analizi

oluşturmaktadır. Bu kapsamdan bakılacak olursa,  $x(t)$  periyodu T olan ve Dirichlet koşullarını sağlayan periyodik bir sinyal olmak üzere, Fourier serisi gösterimi

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(kf_0) e^{jkf_0 t} \quad (4)$$

Formülü ile verilir. Burada  $X(kf_0)$   $k$ 'nci harmonikteki Fourier sabiti,  $f_0 = 2\pi / T$  ise temel frekanstır. Bu ifadeden, sinüzoidal olmayan bir periyodik sinyalin, temel frekansın tam sayı katları olan frekanslara sahip bir dizi sinüzoidal bileşene ayrılabilceği anlamı çıkarılabilir.

Bilgisayar tabanlı Fourier analizi gerçekleştirmek için, hem zaman hem de frekanstaki sinyalin ayırık olması ve sonlu uzunluğa sahip olması gerekir. Bu analiz Ayırık Fourier Analizi olarak adlandırılır ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$X(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

Burada  $x(n)$ , döngü başına N nokta oranıyla örnekleme yapılarak kabul edilir. Bununla birlikte  $f_k = (2\pi/T)k$  olarak ifade edilir.  $X(f_k)$  ise  $x(n)$ 'in spektrumudur. Spektrumun açısal frekans çözünürlüğü,  $x(n)$  periyodik bir sinyalin bir döngüsü olduğu varsayılırsa,  $\Delta f = 2\pi/T$  olarak sinyalin uzunluğu ile belirlenir. Böylece, eğer T,  $x(n)$ 'in bir periyodu olarak seçilirse, temel frekansın yalnızca tamsayı çarpanlarından oluşan ve harmonik olarak adlandırılan bileşenler gösterilecektir.

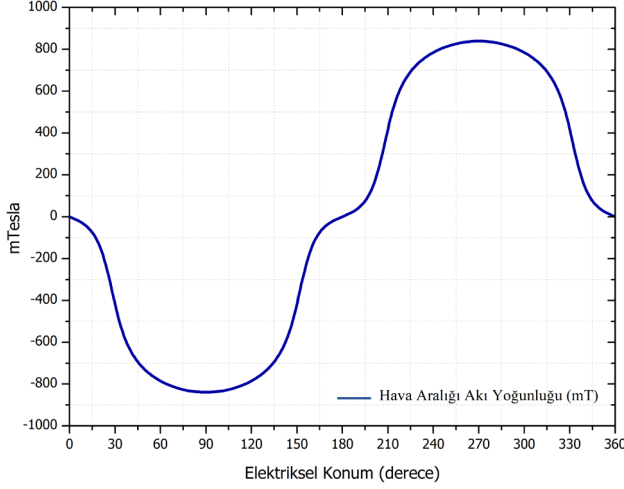
Temel frekansın q döngüleri ( $q > 1$  ve tamsayı) için hesaplama yapılırsa, frekans çözünürlüğü  $\Delta f = 2\pi/q$  ve buna bağlı olarak  $T = f_0/q$  şeklinde değişecektir. İşte bu tamsayı olmayan dizi elemanları ara-harmonikler olarak adlandırılmaktadır.

### Uzay Harmonikleri

Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, elektrik enerji sistemlerinde harmonikler, temel frekansın ya da üretilen frekansın tam katları olup gerilimde ve yük akımında bozulmalara neden olurlar. Güç sistemlerinde, elektrik enerjisinin sürekli ve kaliteli olması beklenmektedir. Elektrik makinelerinde iki tür harmonik kavramı tanımlanmaktadır. Bunlardan ilki, kaynağın sinüs biçiminden uzak olmasından kaynaklanan zaman harmoniği iken, diğeri ise elektrik makinasının geometrisinin sebep olduğu uzay harmonikleridir. Uzay harmonikleri makinanın geometrisi ile ilgili olup makine sinüzoidal gerilimle beslense dahi manyetomotor kuvvette farklı frekans bileşenleri gözlemlenir. Uzay harmonikleri, makinada ek harmonik reaktanslara, pozitif ve negatif moment oluşumuna neden olmaktadır. Meydana gelen bu harmonikler motorun kalkışı sırasında

titreşim, sese ve nüvede kısmi doyuma neden olabilirler. Uzay harmonikleri motorun verim, güç faktörü, tork gibi önemli performans parametrelerini de olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Kocabaş & Mergen, 2006; Dalcalı & Akbaba, 2017a). Bununla birlikte uzay harmoniklerinin elektrik makinalarında varlığı hem geçici hal hem kararlı hal durumunda vuru torku ve titreşimlere neden tork dalgalanmalarının oluşumuna neden olur (Toliat & Sargolzaei, 1998). Sabit mıknatıslı makinalarda ise, girdap akımı kayıplarına sebep olmaktadır (Patel vd., 2013). Dolayısıyla, elektrik makinalarında uzay harmoniklerinin analizlerinin yapılması ve sonuçlarının gözlemlenmesi sistemin arzu edilen şekilde çalışması için önemlidir. Bu amaçla çalışmalarda klasik eşdeğer devrelere uzay harmoniklerini içeren eşdeğer devre modelleri önerilmiştir. Dalcalı çalışmasında, gölge kutuplu asenkron motorda öncelikle stator-rotor, stator-gölge kutup, rotor-gölge kutup ve rotor gözlerinin ortak endüktansları ve rotor konumuna bağlı değişimleri elde edilmiştir. Harmonikli büyüklüklerin belirlenmesi için ortak endüktansların ve rotor akımının harmonik dereceleri arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Çıkarılan denklemler yardımıyla empedans ve akım matrisleri çıkarılmıştır. Kaymanın bir fonksiyonu olarak toplam momenti, sargı akımları ve bakır kayıpları elde edilmiştir ve klasik eşdeğer devre kullanarak uzay harmoniklerinin etkisini barındıran yeni bir devre önerilmiştir (Dalcalı, 2017).

Elektrik makinalarında, stator sargılarına saf sinüs şeklinde bir gerilim uygulansa dahi, sargıların makine içerisindeki dağılımının sinüs şeklini oluşturamamasından ve nüvenin geometrik yapısından dolayı hava aralığında oluşan sinüsten farklı bir dalga şekline sahip olacaktır. Şekil 4'te 16 kutuplu sabit mıknatıslı senkron motorun hava aralığında elde edilen manyetik akı yoğunluğunun dalga formu verilmiştir. Stator sargısına uygulanan gerilim zamana bağlı olarak değiştiğinden hava aralığında oluşan akı dağılımı hem zamana hem de konuma bağlı olarak değişecektir. Bu durumdan da anlaşılacağı üzere, zaman ve uzay harmoniğini birlikte değerlendirmek analizin doğru gerçekleştirilmesi için önemlidir (Bayram, 2009).



**Şekil 4.** Hava aralığı akı yoğunluğu dalga formu.

Şekil 4'ten görülen dalga formu sinüzoidal olmayan bir dalga formudur. Bu dalga şekilleri Fourier serileri ile ifade edilebilir. Bu dalga şekline ait fonksiyon Fourier serisine açıldığında uzay harmonikleri elde edilmektedir. Periyodik sinyaller, farklı frekanstaki sinüs bileşenlerinin toplamı şeklinde ifade edilebilirler. Bu sinüslü ifadelerin her biri Fourier bileşenleri olarak adlandırılırken bu seri de Fourier serisi olarak adlandırılır. Fourier serisinin katsayıları ölçme yöntemi, grafiksel yöntem ve analitik yöntemlerle elde edilebilir. Grafiksel yöntem ile analiz yapılır iken, sinüzoidal olmayan dalga eşit aralıklı dikey parçalara bölünerek her bir parçanın ortalama değeri belirlenir. Bu yöntemde, dalga şeklinin parça sayısı ile hesaplama yükü arasında bir tercih yapılması gerekmektedir. Dalga şeklini fazla sayıda bölmek hesaplama yükünün artmasına neden olmasına karşın analizin doğruluğunu arttırmaktadır. Makinanın hava aralığında elde edilen akı yoğunluğu dalga şekli matematiksel olarak Fourier serisi ile Denklem 6'daki şekilde ifade edilebilir (Dalcı, 2017).

$$B(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (6)$$

Denklemden B hava aralığı akı yoğunluğunun değerini,  $\theta$  elektriksel derece olarak uzay açısı,  $A_0$  manyetik akı yoğunluğu değerinin ortalama değeri,  $n$  harmonik derecesini ve  $A_n$  ile  $B_n$  Fourier katsayılarıdır. Fourier katsayıları Denklem 7 ve Denklem 8 kullanılarak ifade edilebilir.

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^{\infty} (y_k \cos(n\theta_k)) \quad (7)$$

ve

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^{\infty} (y_k \sin(n\theta_k)) \quad (8)$$

Verilen denklemlerde,  $m$  dalga şeklinin örnekleme (dikey bölünme) sayısı,  $\theta_k$  her bir parçanın ortasındaki yatay eksenine ait değeri ( $k = 1, 2, 3, \dots, m$ ),  $n$  harmonik derecesi ve  $y_k$  her  $\theta_k$  değerine karşılık gelen akı yoğunluğu değerini ifade etmektedir. Belirlenen Fourier katsayıları ile manyetik akı yoğunluğunun fonksiyonu Denklem 9'daki şekilde ifade edilebilir (Liang vd., 2016).

$$B(\theta) = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin \left[ \theta + \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{A_1} \right) \right] + \dots + \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin \left[ \theta + \tan^{-1} \left( \frac{B_n}{A_n} \right) \right] \quad (9)$$

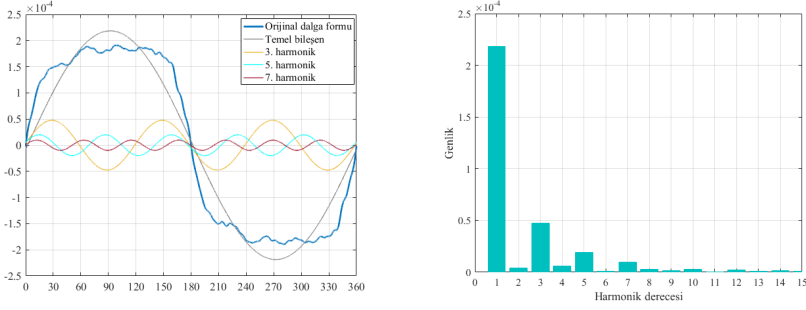
Uzay harmoniklerinin tespitinde hava aralığı akı yoğunluğu dalga şekline alternatif olarak stator-rotor ortak endüktansı da kullanılabilir (Dalcalı, 2017). Uzay harmoniklerinin analizinde, fonksiyonun Fourier serisine ait bileşenleri elde edilirken terimlerin hepsi bulunmayabilir. İşlem kolaylığının sağlanması için eğri incelenerek seriyi oluşturan terimler tespit edilebilir. Örneğin, gölge kutuplu bir asenkron motorun stator-rotor ortak endüktansı incelendiğinde, endüktans dalga şeklinin yatay eksene göre simetrik olmasından dolayı, tek harmoniklerin oluşacağı söylenebilir. Rotor gözleri ortak endüktansları dikey eksene göre simetrik olmasından dolayı çift harmoniklere sahip olacaktırlar. Uzay harmonikleri için üç fazlı makinalarda üç ve üçün katı olan harmonik bileşenleri makina içerisinde döner manyetik oluşturmadığından bu harmonikler dikkate alınmazlar (Dalcalı, 2017; Kocabaş & Mergen, 2006).

Uzay harmoniklerinin analizinde, Fourier dönüşümüne bir alternatif olarak Ayrık Hartley Dönüşümü (AHD) kullanılabilir. Bu dönüşümde Fourier dönüşümünde olduğu gibi sanal bileşenlere ihtiyaç bulunmamaktadır. AHD hızlı ve hesap karmaşası içermeyen gerçek bir dönüşüm yöntemidir. AHD  $N$  uzunluğunda gerçek değerli bir dizi için Denklem 10'daki gibi tanımlanabilir (Bouguezel vd., 2013; Pyrgas vd., 2016).

$$B = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \left( \cos \frac{(2\pi nk)}{N} + \sin \frac{(2\pi nk)}{N} \right) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n(n) \cos \left( \frac{(2\pi nk)}{N} \right) \quad (10)$$

Denklemden,  $X(n)$  gerçek zamanlı işareti,  $n$  işaretten alınan örnek sayısını,  $k$  harmonik derecesini ve  $N$  toplam örnek sayısını ifade etmektedir (Bouguezel vd., 2013; Pyrgas vd., 2016). Şekil 5'te bir fazlı motorun stator-rotor arasındaki ortak endüktansına ait dalga şekli ve bu motorun AHD ile yapılan analizi sonucunda elde edilen uzay harmoniklerine ait spektrumu örnek olarak verilmiştir (Dalcalı & Akbaba, 2017b).





Şekil 5. Harmonik dalga şekilleri ve spektrum.

Diğer bir alternatif olarak uzay fazörleri teorisi, uzay harmoniklerinin analizinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, makinanın elektromanyetik parametreleri fazörler şeklinde kompleks sayılar ile ifade edilebilir (Deniz, 2011).

### Uzay Harmoniklerini Giderme Yöntemleri

Uzay harmoniği, hava aralığında meydana gelen akının bir etkisi olduğundan hava aralığı relüktansının değişimi ve dolayısıyla hava aralığı dalga formunun değişimi harmoniklerin genliklerini üzerinde etkili olmaktadır. Oluk sayısı, oluk geometrisi, mıknatıs yapısı, sargı özellikleri, statik ve/veya dinamik rotor eksantrikliği, stator-rotor oluk sayısı gibi parametreler uzay harmoniğini etkileyen değişkenlerdir (Kindl vd., 2015). Bu değişkenler üzerinde yapılacak çalışmalar ile harmonikler optimize edilebilir. Uzay harmoniklerinin genliği ve faz açıları elektrik makinalarının hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dikkate alınarak 2B ve 3B sonlu elemanlar analizleri ve Fourier analizleri ile gerçekleştirilebilir (Liang vd., 2016).

Bilindiği üzere elektrik makinalarında adım kısaltma yapılmadığında bir bobinin bir kenarı N kutbunda iken diğer kenarı S kutbunda bulunur ve elektriksel açı olarak  $180^\circ$  mesafe bulunur. Ancak sargı belirli bir açı kadar kısaltılarak kısa adımlı olarak sarılabilir. Bu durumda indüklenen gerilim arasında oluşan faz farkı  $180^\circ$  elektriki açıdan daha küçük olacaktır. Bu prensipten yararlanarak uzay harmonikleri belirli oranda adım kısaltma yapılarak yok edilebilir. Bobinin adımında  $20^\circ$  kısaltma yapıldığında 9. harmonikte  $9 \times 20^\circ = 180^\circ$  kısaltma olacak ve 9. harmoniğin değeri sıfır olacaktır. Bu şekilde kısaltma açısı değiştirilerek yok edilmek istenen harmonik giderilebilir. Uzay harmoniklerinin etkisi stator veya rotor kısmındaki oluk geometrisi değiştirilerek azaltılabilir. Mollaeian ve ark. asenkron makinanın uzay harmoniklerini geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu ile rotor oluklarının kayk (skew) miktarını belirleyerek azaltmışlardır (Mollaeian vd., 2016). Stator kısmında yapılan optimizasyon çalışmasında, asenkron, sabit mıknatıslı, rotoru sargılı senkron ve senkron relüktans makinalara uygulanabilen yeni bir kesirli oluklu sargı tekniği ile uzay harmoniklerinin etkisi azaltılabildiği (Wang, 2012). Çok katmanlı sargı tasarımı uzay harmoniklerinin özellikle alt-harmoniklerin

giderilmesinde başarılı bir yöntemdir (Abdel-Khalik vd., 2016). Oluk sayısının etkisinin incelendiği çalışmada 24, 36, 48 ve 60 oluk sayısına sahip asenkron motorda, oluk sayısı arttıkça yok edilen uzay harmoniklerinin sayısının da arttığı belirlenmiştir (Kocabaş & Mergen, 2008). Mıknatıslı makinalarda ise mıknatısın geometrisi üzerinde yapılacak yapısal değişiklikler ile harmoniklerin etkileri azaltılabilir. Kutup yayının kutup adımına oranı, kutup yay ofseti, mıknatıs kalınlığı, parçalı mıknatıslar ile kaykırı verme gibi yöntemler kullanılabilir. Bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında, Pop ve ark. aksel sabit mıknatıslı makinada ardışıl karesel programlama optimizasyon algoritması ile mıknatısın uzunluğu minimum THB için optimize edilmiştir (Pop vd., 2013). Sabit mıknatıslı senkron generatörün kutup yay ofseti ile kutuplar arası açıklık değerinin birlikte değişimi ile % THB miktarı düşürülmüştür (Dalcalı & Akbaba, 2017c). Bir fazlı asenkron makinalar uzay harmoniği bakımından oldukça zengindir. Özellikle gölge kutuplu asenkron makinalarda değişken hava aralığının bulunması bu tip makinaların harmonik bakımından zengin olmasına neden olmaktadır. Bu durumu stator ve rotor sayısının konfigürasyonu ile optimize edilebilir (Toliat & Sargolzaei, 1998).

### **Sonuç ve Öneriler**

Yukarıda belirtilen bilgiler doğrultusunda harmonikler konusunun dikkatli bir biçimde ele alınmasında ve bir takım önleyici tedbirlerin getirilmesinde fayda olduğu aşikârdır. Bu kapsamda, harmonikler ve etkilerini en düşük seviyeye indirmeye yönelik çeşitli öneriler sunulabilir. Örneğin, harmonikli yüke sahip tüketicilerin THB oranlarına reaktif güç kompanzasyonuna benzer şekilde sınırlamalar getirilebilir. Bunun yanı sıra sistem üzerindeki doğrusal olmayan yüklerin olabildiğince sınırlı bölgede tutulmasına ve günlük operasyon süresinin en düşük seviyeye getirilmesine çalışılabilir.

Sanayi kuruluşlarının harmonikler konusunda oluşacak teknik sorunlarına danışmanlık sunmak ve çözüm üretmek üzere reaktif güç kompanzasyonunda yapıldığı gibi kuruluşlar oluşturulabilir. Reaktif güç kompanzasyonunda tasarım ve montaj çalışmalarında gelinen noktaya harmonik filtre tasarımı ve donanımı konusunda da gelinmesi, harmonik probleminin çözümüne büyük katkı sağlayacaktır. Bunların yanı sıra, sanayi tesislerinde filtre kullanımının teşvik edilmesi ve tüketici kaynaklı THB ölçüsünde fiyatlandırılması gibi tedbirler alınması önerilir.

Uzay harmonikleri, zaman harmoniklerinden bağımsız olarak makinanın geometrisine bağlı olan ve makine üretildiği andan itibaren var olan bir büyüklüktür. Makinanın yapısına bağlı olduğundan özellikle makine tasarımcıları tarafından irdelenirler. Makinanın verim, tork, güç faktörü gibi önemli karakteristiklerini etkilediğinden analizlerinin yapılarak giderilmesi gerekmektedir. Makinanın stator, rotor veya mıknatıslı makinalarda mıknatıs bölümünde yapılacak tasarım optimizasyonu ile uzay harmoniklerinin etkisi giderilebilir.

**KAYNAKLAR**

- Abdel-Khalik, A.S., Ahmed, S. & Massoud, A.M. (2016). A Six-Phase 24-Slot/10-Pole Permanent-Magnet Machine With Low Space Harmonics for Electric Vehicle Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(6).
- Bayram, D. (2009). Zaman Harmonikli Gerilimlerin Kafesli Asenkron Makinada Yarattığı Etkilerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*.
- Bouguezal, S., Ahmad, M.O. & Swamy, M.N.S. (2013). Binary Discrete Cosine and Hartley Transforms. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 60(4), 989-1002.
- Dalcalı, A. (2017). Gölge kutuplu asenkron motorların yeni bir matematiksel modeli ve uzay harmonikli eşdeğer devresi. *Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*.
- Dalcalı, A. & Akbaba, M. (2017a). Detection of the space harmonics of the shaded pole induction motor. *Journal of Engineering Research*, 5(4), 95-102.
- Dalcalı, A. & Akbaba, M. (2017b). Analysis of Space Harmonics in Shaded Pole Induction Motor by Discrete Hartley Transform. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 5(9), 1-4.
- Dalcalı, A. & Akbaba, M. (2017c). Optimum pole arc o set in permanent magnet synchronous generators for obtaining lowest voltage harmonics. *Scientia Iranica D*, 24(6), 3223-3230.
- Demirören, A. & Zeynelgil, L. (2004). Elektrik enerji sistemlerinin kararlılığı, kontrolü ve çalışması, *Birsen Yayınevi, İstanbul*.
- Deniz, D. (2011). Yuvarlak Rotorlu Senkron Generatörde Uzay Harmoniklerinin Uzay Fazörleri ile Analizi. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*.
- Efe, S. B. (2006). Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi. *Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*.
- Efe, S. B. (2010). Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin engellenmesi. *Elektrik Mühendisleri Odası Diyarbakır Şubesi haber bülteni*, 15, 19-23.
- Efe, S. B. (2015). Harmonic filter application for an industrial installation. *13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems*, 31-34.
- Efe, S. B., & Kocaman, B. (2018). Harmonic analysis of a wind energy conversion system with small-scale wind turbine. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 5(4), 168-173.
- Efe, S. B., Özbay, H. & Özer, İ. (2019). Dynamic voltage restorer application to eliminate power system harmonics. *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2019) Proceedings*, 705-709.

- IEC 61000-2-2. (2000). Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low- voltage power supply systems, 2nd ed.
- IEC 61000-4-7. (2005). Testing and measurement techniques—general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto5.
- Hrbac, R., Mlcak, T., Kolar, V., Science, C., & Republic, C. (2017). Improving power quality with the use of a new method of serial active power filter ( SAPF ) control. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 23(1), 15–20.
- Karakaş, A., Kocatepe, C., Baysal, M. & Çakır, H. (2005). Harmonikli sistemlerde filtre uygulamasının karşılaştırılması. *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 17-18 Mayıs*.
- Karimi, G. M. & Iravani, M. R. (2005). Measurement of harmonics/interharmonics of time-varying frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 23-31.
- Kindl, V., Hruska, K., Pechanek, R., Sobra, J. & Skala, B. (2015). The Effect of Space Harmonic Components in the Air Gap Magnetic Flux Density on Torque Characteristic of a Squirrel-Cage Induction Machine. *17th European Conference on Power Electronics and Applications*, Switzerland
- Kocabaş, D.A. & Mergen, A.F. (2006). Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin etkilerini azaltmaya katkılar. *İTÜDERGİSİ/D*, 4(2), 25-36.
- Kocabaş, D.A. & Mergen, A.F. (2008). A Novel Method to Reduce the Effects of Space Harmonics in Alternating Current Machines. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 692-697, Cambridge, UK.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., & Arıkan, O. (2003). Elektrik tesislerinde harmonikler, *Birsen Yayınevi, İstanbul*.
- Köse, N., Salor, Ö., & Leblebicioğlu, K. (2010). Interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation using Kalman filtering. *Electric Power Systems Research*, 80 (9), 1145–1153.
- Liang, X., Faried, S. & El-Serafi, A. (2016). Space harmonics of synchronous machines calculated by finite-element method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2), 1193–1203.
- Lin, H. C. (2014). Sources, effects, and modelling of interharmonics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-10.
- Mollacian, A., Sangdehi, S.M., Balamurali, A., Feng, G., Tjong, J. & Kar, N.C. (2016). Reduction of space harmonics in induction machines incorporating rotor bar optimization through a coupled IPSO and 3-D FEA algorithm. *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, 557-563
- Motta, L., Faúndes, N. (2016). Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends. *International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, 16-19 Oct., Belo Horizonte, Brazil, 657-662.

- Moulahoum, S., Houassine, H. & Kabache, N. (2013). Parallel active filter to eliminate harmonics generated by compact fluorescent lamps. *21st Mediterranean Conference on Control and Automation Proceedings*, 143–148.
- Ozer, I., Ozer, Z., & Findik, O. (2018). Noise robust sound event classification with convolutional neural network. *Neurocomputing*, 272, 505–512.
- Patel, V.I., Wang, J., Wang, W. & Chen, X. (2013). Analysis and Design of 6-phase Fractional Slot per Pole per Phase Permanent Magnet Machines with Low Space Harmonics. *International Electric Machines & Drives Conference*, 386- 393, USA.
- Pop, A.A., Radulescu, M. & Balan, H. (2013). Flux-density space-harmonics minimization for an axial-flux permanent-magnet machine. *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*, Romania.
- Pyrgas, L., Kitsos, P. & Skodras, A.N. (2016). An FPGA Design for the Two-Band Fast Discrete Hartley Transform. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 295-299.
- Rüstemli, S., & Cengiz, M. S. (2015). Active filter solutions in energy systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23, 1587–1607.
- Rüstemli, S., Cengiz, M. S. & Dinçer, F . (2013). Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1) ,30-38.
- Salor, Ö. (2009). Spectral correction-based method for interharmonics analysis of power signals with fundamental frequency deviation. *Electric Power Systems Research*, 79 (7), 1025–1031.
- Tan, A., Bayındır, K. Ç., Cuma, M. U., & Tümay, M. (2017). Multiple harmonic elimination-based feedback controller for Shunt Hybrid Active Power Filter. *IET Power Electronics*, 10(8), 945–956.
- Toliyat, H.A. & Sargolzaei, N. (1998). Comprehensive Method for Transient Modeling of Single-Phase Induction Motors Including the Space Harmonics. *Electric Machines & Power Systems*, 26(3), 221-234.
- Valenzuela, J., & Pontt, J. (2009). Real-time interharmonics detection and measurement based on FFT algorithm. *IEEE International Conference on Applied Electronics, Pilsen, Czech Republic*.
- Wang, J. (2012). An electric machine. *UK Patent 12216354*, Filed on 30th Nov., 2012.
- Zubi, H. M., Dunn, R. W. & Robinson, F. V. P. (2010). Comparison of different common passive filter topologies for harmonic mitigation. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 1-6.



# Bölüm 5

## HAVA SÜRÜKLEYİCİ VE UÇUCU KÜL KATKILARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİNE VE BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ<sup>1</sup>



*İbrahim KODAK<sup>2</sup>*  
*Abdullah DEMİR<sup>3</sup>*

---

1 Bu makale, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Demir danışmanlığında İbrahim Kodak'ın aynı başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

2 İbrahim Kodak, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye; Email: ikodak11@gmail.com

3 Abdullah Demir, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye; Email: abdullah.demir@dpu.edu.tr





## 1. GİRİŞ

Beton; çimento, su, agrega ve kimyasal veya mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan ilk olarak plastik kıvamda görülen, şekillendirilebilen, zamanla katılaşır sertleşerek dayanım kazanan bir yapı malzemesi olarak tanımlanır (İMO, 2019).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayacak kohezyonu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür (Felekoğlu, 2003).

KYB'ler ilk olarak 1988 yılında Japonya'da betonarme yapılar oluşturmak amacı ile geliştirilmiştir. KYB üzerine ilk çalışma Profesör Hajime Okamura tarafından yapılmıştır. KYB üzerine yazılan ilk bildiri 1989'da Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansında sunulmuştur. Aynı bildirinin 1992'de İstanbul'daki CANMET & ACI Uluslararası Konferansında sunulması KYB kavramının dünyaya yayılmasını hızlandırmıştır. 1994'de Bangkok'daki ACI çalıştayından sonra KYB, dünyadaki araştırmacıların ve mühendislerin ilgi odağı haline gelmiştir. 1996'da New Orleans'da ACI Sonbahar Kongresinde KYB, Amerika ve Kanada'da da iyice yaygın hale gelmiştir. 1997 yılından sonra Avrupa Birliği de KYB kullanımını arttırmayı hedefleyen çalışmalar başlatmıştır; sonuç olarak KYB üzerine dünya ölçeğinde araştırmalar başlamış olmuştur (Okamura ve Ouchi, 2003; Bouzouba ve Laclemi 2001; Walraven, 2003).

KYB ve geleneksel beton tasarımı içerisinde kullanılan malzemeler temelde aynı olarak görülmektedir. İki betonun da üretiminde kullanılan malzemelerin miktarları (iri ve ince agrega) hacimce bazı farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Geleneksel beton üretiminde agrega hacmi, toplam beton hacminin %75-80'lerine ulaştığı görülmektedir. KYB'de yüksek akış kabiliyetinin sağlanması amacıyla agrega hacminin azaldığı görülmektedir. Hamur hacminin farklı toz maddelerinin ilavesi ile artırıldığı tespit edilmiştir. Bu durumda agregaların birbirine temas etmesi yoluyla sıklaşma özelliğinin azaldığı görülmektedir (Türkel ve Felekoğlu, 2012).

Kendiliğinden yerleşen betonda geleneksel betondan farklı olarak kum oranının arttığı buna karşılıkta iri agrega miktarının azaltıldığı görülmektedir. 0,125 mm elek altında kalan agregaların ince malzeme miktarına ilave edildiği görülmektedir (Sağlam vd., 2004). Kendiliğinden yerleşen beton içerisinde kullanılacak agrega gradasyonu mümkün olduğunca ince seçilmesi gerekmektedir.

Kendiliğinden yerleşen beton; akışkanlık özelliği yüksek olan ve yerleşme özelliği çok iyi olan beton olarak kısaca açıklanabilir. Üniform beton dayanımını garanti eder ve minimum beton boşlukları olacak şekilde

özelliği bilinmektedir. Kendiliğinden yerleşen beton; genellikle erken yaşta yüksek dayanım sağlamaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları şu şekilde sıralanmaktadır. Bunlar;

- Daha az su/çimento oranı ile üretilmesi,
- Daha kısa sürede kalıbın sökülmesi,
- Yapıların daha hızlı kullanımına imkan sağlanmasıdır.

Kendiliğinden yerleşen beton, geleneksel beton ile karşılaştırması yapılarak farklılıklar şu şekilde belirlenmiştir. Bunlar;

- Kendiliğinden yerleşen betonların akıcı olma özelliği bulunmaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar minimum işçilik gerektirmektedir.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar, normal betonlara göre ekonomiktir.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar; normal betonlara göre hızlı bir şekilde uygulanmaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar, normal betonlara göre gürültü kirliliğine engel olmaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar; normal betona göre çok daha sık donatı aralarında ayrışma oluşmadan kalıpta dolumu sağlamaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlar, hiçbir vibrasyona ihtiyaç duymadan bütün kalıp çeşitlerine kendi ile doldurma ve yerleşme sağlamaktadır.
- Kendiliğinden yerleşen betonlarda daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Güçlendirme projelerinde kendiliğinden yerleşen betonun kullanılmasının avantajlı olduğu görülmektedir. Dar kalıplarda ulaşılması zor bölgelere betonun eşit bir şekilde yayılabilmesinden dolayı bu tip betonların kullanılması avantaj sağlamaktadır.

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde yeni nesil kimyasal katkıların kullanılmakta olduğu görülmektedir. Kimyasal katkı içeriği ve taze beton sıcaklığı en uygun seviyede kullanılmadığı takdirde, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin etkileneceği görülmektedir.

Dayanım ve dayanıklılığı daha yüksek, aynı zamanda daha düzgün yüzeyli bir beton elde edebilmek için vibrasyon uygulanması gerekir. Vibrasyon uygulanmayan betonların basınç dayanımı boşluklu bir yapı oluşacağı için vibrasyon uygulanmış olan betonlara göre daha düşük olacaktır. Yeterli vibrasyon yapılmayan beton elemanların yüzeyinin de düzgün olmadığı görülmektedir. Yapıların depreme karşı güçlendirilebilmesi için yapılmış olan projelerde tüm bu etkenlere dar beton kesitleri ve sık donatı eklenince vibrasyon uygulamasının daha zor bazı durumlarda da imkansız hale geldiği görülmektedir. Kendiliğinden yerleşen beton kendiliğinden sıkışma yeteneğinden dolayı vibrasyon

gerektirmemektedir. Vibrasyonla yaşanan tüm olumsuz etkenlerin ortadan kalkmasını sağlamaktadır. Bu şekilde işçilik ve zamandan tasarruf sağlamaktadır. Bunun yanında çevrede meydana gelen gürültü kirliliğinde azalma olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonların kullanım alanları aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır. Bunlar;

- Güçlendirme projeleri,
- Sık donatı elemanları,
- Estetik kalıp tasarımları,
- Zor ve ulaşılmaz kalıplar,
- Vibratör kullanımının imkansız olduğu yerler (Kılınç, 2012).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kullanıcıya hem dayanım hem de dayanıklılık açısından avantajlar sağlamakta, sıkıştırma işçiliğinin yetersizliğinden veya kalitesizliğinden kaynaklanan problemleri tümüyle ortadan kaldırmaktadır. KYB kullanımı inşaat süresini kısaltmakta ve iş yükünü azaltmakta, dolayısıyla maliyetten önemli tasarruflar sağlamaktadır. Tüm bu avantajları dikkate alındığında KYB pek çok araştırmacının ortak görüşüyle geleceğin betonu olarak kabul edilmektedir (Türkel ve Felekoğlu, 2005).

İlk olarak dünyada kendiliğinden yerleşen beton imalatı 1980'lerin başında İtalya'nın San Marco da sualtı temel betonu olarak yapılmıştır (Collepardi, 2001).

KYB'nin ilk kullanım alanı donatıların fazla olduğu ve vibratörün uzanamadığı yerler için üretimi düşünülmüştür. Daha sonra yüksekliğin çokça fazla olduğu betonarme perde imalatında ve güçlendirme yapılması gereken yerlerde kullanılmaya başlanmıştır (Özkul vd., 2002).

KYB'de taze betonu sıkıştırma uygulaması yok olacak, böylece vibratör kullanırken geçen zaman ve enerji kayıplarından tasarruf edilmiş olup ortadan kalkmış olacaktır. Vibratör kullanırken çevreye verdiği yüksek ses önlenecektir. KYB'nin en önemli avantajlarından bir diğeri de işçilik azalırken beton imalat hızı arttırmasıdır. Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların imalatının yapılması geleneksel betonla üretimine göre KYB kullanıldığında % 20 oranında daha kısa sürede tamamlandığı belirtilmiştir. KYB'de kimyasal katkı maddelerinin kullanılmasıyla, özellikle prefabrike sektöründe erken kalıp alınabilmesi için buhar kürü uygulaması söz konusu olmayacaktır (Walraven, 2003; Semioli, 2002; Corradi vd., 2002).

KYB'de amaç; sınırlı iri agrega miktarı, hiperakışkanlaştırıcı ile birlikte akıcılık özelliği çok iyi olacak şekilde gerçekleştirilirken, sınırlı iri agrega ile ayrışma direnci olanağı sağlayan bir beton üretmektir (Skarendahl ve Petersson, 2000).

Kendiliğinden yerleşen betonun bileşenleri normal betondan ayırt edici farkı daha ince malzemedir. Bu ince malzemeler genel olarak betonda kullanımı ispatlanmış olan uçucu kül, silis dumanı ve mermer tozu gibi atık malzemelerdir (Sahmaran vd., 2006; Topçu vd., 2006).

Bir betona KYB söylenebilmesi için bazı özelliklerin ölçülmesi ve yapılan ölçümlerin belirli aralıklarda olması gerekir. Bu özellikler; doldurma kabiliyeti, geçme kabiliyeti ve ayrışmaya karşı dirençtir (Topçu, 2006).

Taze haldeki betonların işlenebilirlik açısından incelenmesinde, klasik işlenebilirlik özelliğinin inceleyen deneyler yetersiz kalmaktadır. İşlenebilirliği ölçmek için farklı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu deney yöntemleri; çökme-yayılma (Slump-Flow) deneyi, V hunisi deneyi, U kutusu deneyi, L kutusu deneyi, doldurma kutusu, J halkası ve elek ayrışma deneyidir.

EFNARC (2002) KYB’de taze beton özelliklerini belirleme yöntemlerini Çizelge 1.1’ de verilmiştir. EFNARC (2002)’a göre tavsiye edilen KYB deney sınır değerleri ise Çizelge 1.2’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1.** KYB’de taze beton özelliklerini belirleme yöntemleri (EFNARC, 2002).

Ölçülecek Özellik	Deneyler
Doldurma Yeteneği	Çökmede yayılma
	T500 çapa ulaşma süresi
	V-kutusu akış süresi
Geçebilme Yeteneği	L-kutusu
	U-kutusu
	Doldurma kutusu
	J-halkası
Ayrışmaya Karşı Direnç	T 5dk da V-kutusu akış süresi
	Elek ayrışma deneyi (GTM)

**Çizelge 1.2.** EFNARC (2002) ’a göre önerilen KYB deney sınır değerleri (EFNARC 2002).

No	Yöntem	Birim	Sınır Değer	
			En küçük	En Büyük
1	Çökme ve yayılma	mm	650	800
2	T500	sn	2	5
3	J-halkası	mm	0	10
4	V-hunisi	sn	6	12
5	5 dk. Sonra V-hunisi	sn	0	3
6	L-kutusu	h2/h1	0,8	1
7	U-kutusu	(h2-h1)mm	0	30
8	GTM Stabilite	%	0	15
9	Orimet	sn	0	5

Beton içerisinde kullanılmakta olan uçucu küller mineral katkı olarak kullanılan bir puzolan olarak tanımlanır. Uçucu küller çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olarak görülmemektedir ve sönmüş kireç ile hidrasyon sonucunda reaksiyona giderek suda sertleşmektedir. Elektrik üretimi yapılan termik santrallerden uçucu küller sağlanmaktadır. Genellikle endüstride kullanılmamakta olup düşük kalorili olan kömürlerin çok ince şekilde öğütülmesi sonucunda termik santral fırın içerisinde yakılması sırasında yukarıya yükselen uçucu küller, bacaların üst kısmında bulunan elektro filtreler ya da siklon adı verilen toz tutucular içerisinde elektrostatik ya da mekanik yöntemlerle tutularak depolanmaktadır. Küllerin parçacıklarının küresel olarak çaplarının 1-300 mikrometre olarak görülmektedir (Kocataşkın, 1987).

Beton teknolojisinde uçucu küller doğrudan çimento ile birlikte betona katılarak veya betondaki kum ile yer değiştirme yapılarak da kullanılabilir. Çimento üretimi yapılırken uçucu kül klinkere eklenip öğütme işlemi yapılarak uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilir. Çimento üretiminde uçucu küller kum yerine kullanıldığında özgül yüzey de artma meydana gelirse kum malzemesinden çok az tasarruf edilmiş olur. Uçucu küllerin özelliklerinden dolayı bunların çimento yerine kullanılması daha fazla yararlı ve avantajlı olacağı görülmektedir. Uçucu küller büyük bir özgül yüzey ve daha inceliğe sahip oldukları için bağlayıcı hacminin artmasını sağlamaktadır. Literatürde incelenen araştırmalarda ağırlıkça %20 oranında uçucu kül kullanımının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir (Sümer, 1994). Beton üretiminde uçucu kül kullanılması sonucunda betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımlarının düştüğü, bunun sonucunda da prizinin geciktiği sonucuna ulaşılmaktadır (Li, vd., 2002).

Uçucu kül katkılı olan beton küçük danelerden oluştuğu için düzgün bir yüzeye sahiptir. Uçucu küllerin birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığında azalmaya neden olmaktadır. Uçucu kül katkılı olan betonlarda hidrasyon ısı düşük olmasından dolayı termik rötire ve çatlama oluşmamaktadır. Dolayısıyla bu betonların kütle betonlar için uygun olduğu görülmektedir (Naik, vd., 2002).

Uçucu küller küresel bir yapıya sahiptir. Bu nedenle uçucu küller su gereksinimini arttırmamaktadır. Beton içerisinde kullanılan uçucu kül katkı malzemesi sulu ortam içerisinde kireci bağlamaktadır. Bu nedenle betonu dış etkilere karşı daha dayanıklı yapmaktadır, betonun su geçirimsizliğini de azaltmaktadır. Betonda katkı malzemesi olarak kullanılan uçucu kül, toprak stabilizasyonu, gaz beton üretimi ve tuğla üretiminde kullanılabilir (Temiz ve Yeğinobalı, 1995). Uçucu küllü betonlarda kür sıcaklığının artırılması sonucunda basınç dayanımının iyileştiği, birim ağırlıklarının düştüğü buna bağlı olarak da hacimce su emmelerde artışa neden olduğu görülmektedir.

Hava sürükleyiciler bu sektör de uzun yıllardır kullanılmakta olup katkı maddesi olarak tanımlanmış ve beton üretimi esnasında karışıma eklenmektedir. Bu katkıların yüzey gerilimini azaltarak, beton içerisindeki hava boşluklarının birbirleriyle birleşmesini engeller. Böylelikle beton içerisindeki daha ufak hava boşlukları beton içerisinde kalmış olur ve bunu sağlar. Bahsedilen bu ufak boşlukların boyutu 1mm'den küçük olduğu bilinmektedir.

Hava sürükleyici katkı maddelerinin bir kimyasal grup olan sürfaktantın içerisinde yer almaktadır. Moleküllerin bir ucunun hidrofil olduğu, diğeri ya da eksi elektrik yükü taşıdığı belirlenmiştir. Diğer ucunun suyla karışmadığı ve hidrofobik olduğu görülmektedir. Hava sürükleyicilerin katkıları değişik hammaddelerin birleşmesinden meydana gelmektedir. Burada kullanılan başlıca hammaddeler;

- Ağaç reçinesi tuzları,
- Sentetik deterjan,
- Linyosülfonatlar,
- Asitli tuzlar,
- Proteinli tuzlar,
- Yağlı ve reçineli tuzlar,
- Sülfonatlı hidrokarbon tuzları (Kevorkian, 2006).

Bu katkı maddelerinin hava boşlukları üzerinde farklı etkileri görülmektedir. Örnek olarak katkı maddelerinin isimleri, cinsleri, karışımdaki miktarları, karışımdaki farklı katkı maddelerle olan senkronu ve karışma zamanı, yayılımı ve boşlukların tane boyutunu, belirlemektedir. Asıl olması istenen bahsedilen ufak boşlukların homojen bir dağılıma ile beton içerisinde kalmasıdır.

Hava sürükleyiciler, dairesel şekillerinden dolayı hava sürükleyiciler betonun işlenebilirliğini yükseltmektedir. Bu sebeple belirlenenden daha az s/ç oranı elde edilmiş olur. Bu durum sağlanıldığında daha büyük mukavemet dayanımı ve durabilite sağlanmış olur. Oluşan reaksiyonlar sonucu genişleme oluşarak betonun sülfata karşı direnci arttırmaktadır (Kosmatka vd., 2002).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMANIN AMACI**

KYB'nin sahip olduğu özelliklerden en önemlileri ayrışmaya karşı direnci ve doldurma yeteneğidir. Bu özellikleri sağlamak amacıyla mineral katkısı olarak uçucu kül malzemesinin iyi bir seçim olduğu düşünülmüştür. Uçucu kül, dairesel tanecikli yapısı ile doldurma özelliğini ve yerleşebilmeyi artırarak dayanıma olumlu katkı sağlamaktadır.

Günümüzde KYB kullanımını hızla yaygınlaştırmaktadır. KYB'nin taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerinde akademik çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada KYB'nin taze haldeki özellikleri incelemek ve iyileştirmek amacı ile %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün dayanıma etkisini incelemek için kür süreleri 7 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Hava sürükleyici katkısı %0.1 oranında kullanılmış olup beton üzerindeki etkileri incelenmiş ve nasıl avantajlar sağlayacağı irdelenmiştir.

Bu amaçla uçucu kül ve hava sürükleyici içeren numuneler yapılan deneyler sonucunda kontrol numunesine göre dayanım ve işlenebilirlik açısından incelenmiştir.

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 3.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler

Kendiliğinden Yerleşen Beton üretiminde çimento, agregalar, su, uçucu kül, hava sürükleyici ve hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Çimento

Deneyisel çalışmaların tümünde, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Çimsa Çimento ve TS EN 197-1:2012 standardına uygun CEM I 42.5 çimentosu kullanılmıştır. İlgili çimentonun kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1.'de görülmektedir.

##### 3.1.2. Su

Kendiliğinden yerleşen beton üretimi yapılırken karışımda, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Kütahya Belediyesi şebeke suyu kullanılmıştır.

##### 3.1.3. Agregalar

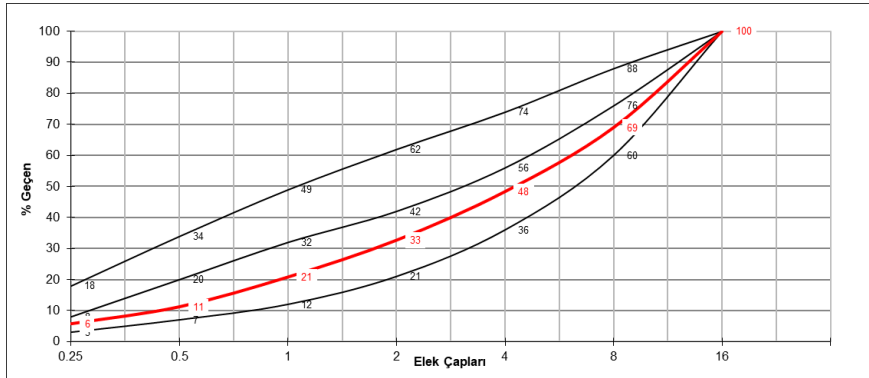
Beton üretiminde Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü laboratuvarından temin edilen 2 farklı boyuttaki (0-4 ve 4-12 mm) agregalar kullanılmıştır. Agregaların özelliklerinin ve granülometrisinin belirlendiği deneyler TS EN 1097-3 ve TS 706 EN 12620+A1'a uygun olarak yapılmış, agregaların granülometri eğrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan CEM I 42.5 çimentosunun özellikleri

Kimyasal Analiz			Kimyasal Analiz	
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	(%)	19.39	Özgül Ağırlık	3.06
Kalsiyum oksit (CaO)	(%)	62.95	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3370.00
Magnezyum oksit (MgO)	(%)	1.87	0,090 mm Elek kalıntısı (%)	1.91



Aliminyum oksit ( $Al_2O_3$ )	(%)	5.19	0,045 mm Elek kalıntısı (%)	12.2
Demir oksit ( $Fe_2O_3$ )	(%)	2.36	Standart Kıvam Su Miktarı (%)	27.00
Kükürt trioksit ( $SO_3$ )	(%)	2.85	Priz Başlama Süresi (dakika)	190.00
Kızdırma kaybı	(%)	3.69	Priz Sona Erme Süresi (dakika)	260.00
Sodyum Oksit ( $Na_2O$ )	(%)	0.21	Genleşme	1.00
Potasyum Oksit ( $K_2O$ )	(%)	0.64		
Klorür(Cl)smaller	(%)	0.009		
Toplam Alkali	(%)	0.61		
Toplam Katkı	(%)	4.39		
Çözülme kalıntı	(%)	0.60		
Serbest Kireç	(%)	1		
LSF	(%)	99.66		
$C_3S$	(%)	61.67		
$C_2S$	(%)	9.14		
$C_3A$	(%)	9.75		
$C_4AF$	(%)	7.23		



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan agreganın granulometri eğrisi

### 3.1.4. Uçucu kül

KYB karışımlarında normal betona göre çok daha fazla miktarda bağlayıcı maddeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışmalarımızda kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilen Kütahya Seyitömer Termik Santrali’nden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır.

Kütahya Seyitömer Termik Santrali’nden temin edilen uçucu kül, reaktif kireç miktarının %10’un altında olması nedeniyle ve reaktif silis miktarının % 25’in üzerinde olması nedeniyle TS EN 197-1:2012 standardında V sınıfı şartlarını tümüyle sağlamaktadır.  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  değerleri toplamı % 70 in üzerinde  $CaO$  nun % 10’un altına olması nedeniyle ASTM C 618 standartlarına göre F sınıfı şartlarını sağlamaktadır.

**Çizelge 3.2.** Deneyde kullanılan uçucu küllün kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal özellikler					
Standart Değer	Standart Değer	Standart Değer	Standart Değer	Standart No	Standart değer
Kızdırma kaybı	-	max. % 5	%7 ye kadar	EN 196-2	0,56
İncelik (45 mikron elek bakiyesi)	0,25	15-35	%+1 0,-10	EN 451-2	26,2
Klorür	-	max. % 0,1		EN 196-2	0,0088
Serbest kalsiyum oksit	-	max. % 1	% 1-2,5 ise genişleme deneyi uygulanır	EN 451-1	0,06
Reaktif kalsiyum oksit	-	max. % 10		EN 196-2	2,63
Kükürt trioksit	-	max. % 3		EN 196-2	0,41
Genleşme	-	max. 10 mm	%30 Küllü çimento karışımının genişmesi max. 10mm olabilir	EN 196-3	-
Aktivite endeksi	-	28 günlük aktivite min 75 90 günlük aktivite min 85		EN 196-1	7 Günlük akt. 71,7 28 Günlük akt. 82,6 90 Günlük akt. -
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2000-2400	+,- 200 kg/m <sup>3</sup>	EN 196-6	2280

### 3.1.5. Hava sürükleyiciler

Hava sürükleyiciler; betonun taze ve/veya sertleşmiş hâldeki özelliklerini geliştirmek için karıştırma işlemi sırasında betona, çimento kütlelerinin %0.1'ini geçmemek üzere eklenen malzemelerdir. Hava sürükleyici kimyasal katkı; karıştırma sırasında taze betona kontrollü miktarda küçük, düzgün dağılmış ve sertleşme sonrasında da kalıcı olan hava kabarcığı sürükleyen kimyasal katkıdır. Sentetik bazlı sıvı, düşük dozda dahi etkili olan hava sürükleyici beton katkısıdır. Betonun islenebilirliği ve dayanıklılığını artırmaktır.

KYB karışımında çimento dozajının %0.1 oranında hava sürükleyici kullanılmıştır. Deneyde kullanılan hava sürükleyici katkı malzemesi Kütahya Aragonit Yapı Kimyasalları'ndan temin edilmiş olup kimyasal bileşimi Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

### Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan hava sürükleyicinin özellikleri

Özellikleri	“Kabul Kriteri”
Bağıl yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	d > 1.10 ise d ± 0.03 d ≤ 1.10 ise d ± 0.02
pH Değeri (20 0 C)	Üreticinin belirttiği değer ± 1
Katı Madde (%)	T ≥ % 20 için 0.95 T ≤ X < 105 T T < % 20 için 0.90 T ≤ X < 1.10 T
Klor İçeriği (%)	Kütlece en çok % 0.10

#### 3.1.6. Hiperakışkanlaştırıcı

Erken ve nihai yüksek dayanım, yüksek performanslı beton üretimlerinde kullanılan yeni nesil hiperakışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Hazır beton sektörü için geliştirilmiş, dozaja bağlı olarak çok yüksek oranda su azaltan, işlenebilirlik süresi uzun, ayrışma ve terleme gibi problemler oluşturmaksızın, kendiliğinden yerleşen ve sıkışan beton elde edilmesini sağlar. Beton üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcının kimyasal teknik özellikleri Çizelge 3.4.’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan hiperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Özellikleri	Kabul Kriteri
Renk	Kahverengi
Bağıl Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	d > 1.10 ise d ± 0.03 d ≤ 1.10 ise d ± 0.02 d üreticinin beyan ettiği yoğunluk değeri.
pH Değeri (20 0 C)	Üreticinin belirttiği değer ± 1
Klor İçeriği (%)	Kütlece en çok % 0.10
Alkali Miktarı (%)	%3

#### 3.2. Numune Hazırlanması ve Yapılan Deneyler

Numune hazırlanması ve taze beton deneyleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü beton laboratuvarında yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, laboratuvarındaki kür havuzlarına bırakılarak standart kür koşullarına göre 7 ve 28 gün sonunda havuzdan alınarak numunelere sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde numune yapım süreci ve yapılan tüm deneyler anlatılacaktır.

##### 3.2.1. Karışım oranları

Bu çalışmada KYB şartlarını sağlamak için deneme karışımı yapılarak karışım oranları belirlenmiş, KYB özellikleri sağlandıktan sonrada 4 farklı deney karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan birinci karışımında uçucu kül oranı

%0, ikinci karışımda çimento ağırlığının %10 oranında uçucu kül, üçüncü karışımda ise çimento ağırlığının %20 oranında, dördüncü karışımda ise çimento ağırlığının %30 oranında uçucu kül kullanılmıştır. Daha sonrasında karışımda %0.1 hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Karışımdaki çimento dozajı 390 kg olup su/çimento oranı da 0,48 seçildiğinden karışımdaki su miktarı 190 litredir. Deneme çalışmasında kullanılan agrega karışım oranı (% 50 0-4, % 50 4-12) tüm deney karışımlarında sabit tutulmuştur.

KYB şartlarını sağlamak için yapılan karışımda toplam kullanılan malzeme miktarı oranları Çizelge 3.5’de görülmektedir.

**Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan 1 m<sup>3</sup> beton için toplam malzeme miktarı**

Kullanılan Malzemeler		%0 U.K	%10 U.K	%20 U.K	%30 U.K	%0.1 H.S
Çimento	(kg/m <sup>3</sup> )	390	390	390	390	390
Uçucu Kül	(kg/m <sup>3</sup> )	-	39	78	117	-
Hava sürükleyici	(kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	0,39
Su	(kg/m <sup>3</sup> )	190	190	190	190	190
İnce Agregası (0-4)	(kg/m <sup>3</sup> )	904,28	904,28	904,28	904,28	904,28
Orta Agregası (4-12)	(kg/m <sup>3</sup> )	904,28	904,28	904,28	904,28	904,28
Katkı	(kg/m <sup>3</sup> )	9,45	9,45	9,45	9,45	9,45
Toplam		2398,01	2437,01	2476,01	2515,01	2398,4

Çalışmanın bu kısmında yapılacak olan taze beton deneyleri dikkate alınarak gerekli hazırlıklar yapılmıştır. Kontrollü karışım için hassas (elektronik) terazi ile ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.2). Karışımda kullanılacak malzemeler elektronik terazi kullanarak tartılmış ve hazır hale getirilmiştir. Önce agregalar karıştırıcıya aktarılmış sonrasında bir süre karıştırıldıktan sonra çimento ilave edilmiştir. Karışımın homojen hale geldikten sonra (min. 2 dakika) karışım suyu ilave edilmiştir.

Betonun kendiliğinden yayılabilecek kıvama geldiği anlaşıldığında karıştırma işlemi sonlandırılmıştır. Şekil 3.3’de karışım hali gösterilmiştir. Toplam karıştırma süresi, agregalar ve tüm malzemelerin karıştırılma süresi ortalama 5 dakika olarak gözlemlenmiştir.

DeneySEL çalışma için toplamda 144 numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler küp, silindir ve prizma numuneleridir. Bu numuneler üzerinde sertleşmiş beton deney sonuçları incelenmiştir.



Şekil 3.2. Karışımında kullanılacak malzemelerin ölçümü



Şekil 3.3. Betonun karışma hali

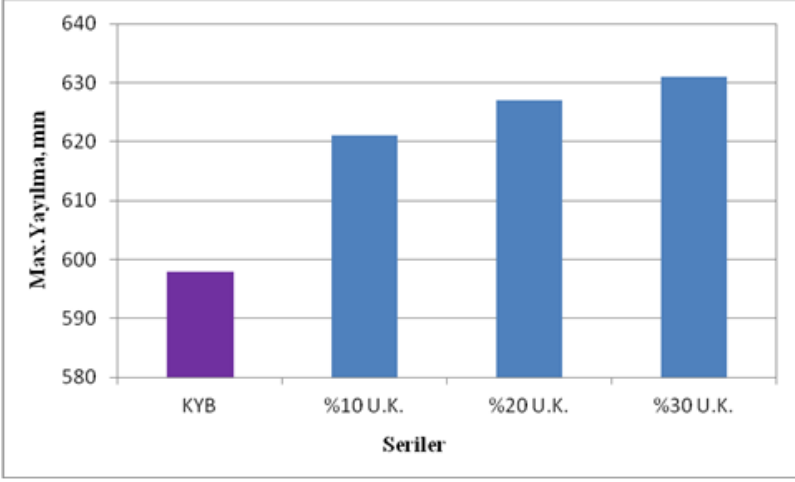
#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Uçucu kül ve hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımına ve işlenebilirliğine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, yapılan deney sonuçları değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

##### 4.1. Taze KYB Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Bu bölümde kendiliğinden yerleşen betonun doldurma özelliği, geçebilme özelliği, yayılma alanı ve hızı ve ayrışmaya karşı mukavemetine yönelik deney sonuçları değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

#### 4.1.1. Çökme-yayılma deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

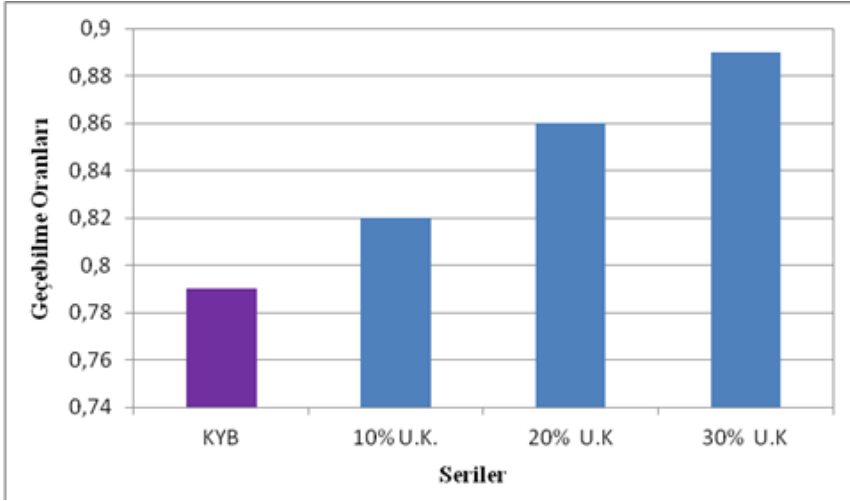


Şekil 4.1. Taze KYB’de çökmede yayılma deneyi yayılma çapları

Farklı yüzdelerde uçucu kül katılarak oluşturulan beton serilerinin ortalama son yayılma çapları (mm) Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1. incelendiğinde taze KYB’ de çökmede-yayılma deneyinde son yayılma çapları katkısız KYB kontrol ile yapıldığında 645 mm ölçülürken, %10 uçucu kül katkılı KYB karışımında yayılma çapı %3,01 artarak 664 mm ölçülmüştür. Uçucu kül oranı %20’ e çıktığında ise yayılmadaki artış %5.52 ile 680 mm olarak ölçülmüştür. Uçucu kül oranı %30’a çıkarıldığında ise yayılmadaki artış %7,25 ile 691 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde uçucu kül oranının artırılması ile yayılma çaplarında artma görülmüştür. Burada yayılma çaplarındaki artışın nedeni uçucu külün çok daha ince bir malzeme olup KYB’nin işlenebilirliğini artırdığı söylenebilir.

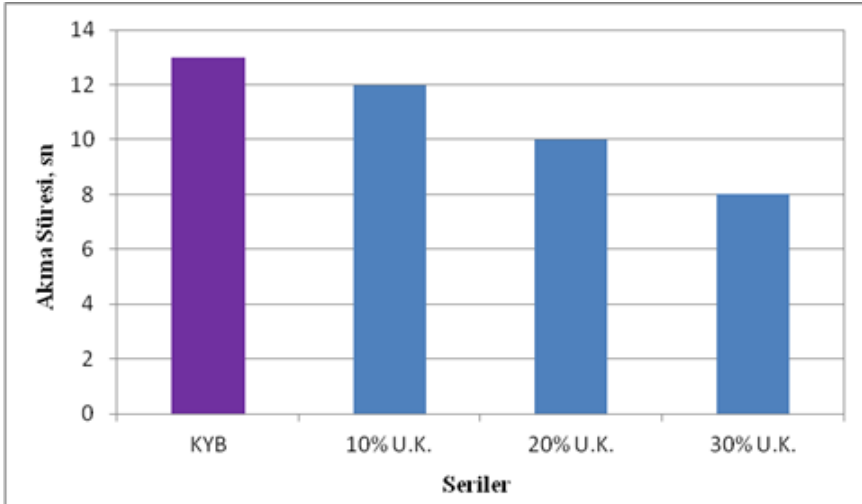
#### 4.1.2. L Kutusu deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

KYB’ nin geçebilme özelliğinin ölçülmesi için kullanılan yaygın deneylerden biri olan L kutusu deneyidir. Sonuçların ortalama değerleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. L kutusu deneyinden ölçülen KYB’ nin deney aleti içindeki yükseklik seviyelerinin oranlanması ile bulunan geçebilme oranıdır. KYB kontrol numunesinde oran 0,79, %10 uçucu kül katkılı olduğunda oran 0,82’ e yükselmiştir, %20 uçucu kül katkılı olduğunda oran 0,86’ a yükselmiştir, %30 uçucu kül katkılı olduğunda oran 0,89’ e yükselmiştir. Uçucu kül malzemesi daha ince ve özgül ağırlığı sebebiyle ince malzeme artışı nedeniyle KYB’ nin geçebilme oranını artırdığı ve boşlukları doldurduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Taze KYB’de  $L$  kutusu  $h_1/h_2$  oranları

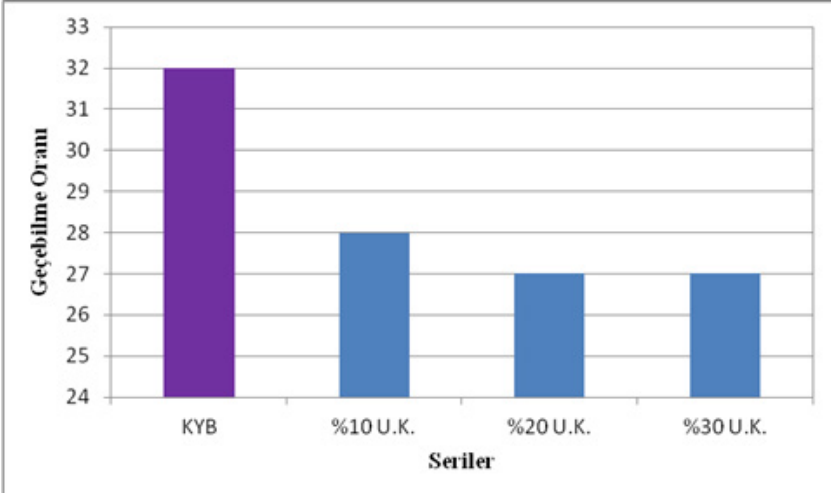
#### 4.1.3. V Hunisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.3. Taze KYB’de  $V$  hunisi akma süreleri

KYB’ un doldurma ve ayrışmaya karşı direncinin incelendiği deney yöntemi olan  $V$  hunisidir. Sonuçların ortalama değerleri Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Düzenegin alttaki kapağı açılmasıyla huninin içerisindeki beton tamamen boşalana kadar devam edilmiş olup, KYB kontrol betonunda akma süresi 13 sn olarak ölçülmüştür. %10 uçucu kül katkılı KYB’ de 11 sn, %20 uçucu kül katkılı KYB’ de 10 sn, %30 uçucu kül katkılı KYB’ de 9 sn olarak ölçüm yapılmıştır. KYB’ de uçucu kül katkısı parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur. İnce ve küresel tanecikli yapısından dolayı taze betonda işlenebilmeyi arttırdığı söylenebilir.

#### 4.1.4. U Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.4. Taze KYB’de U hunisi akma süreleri

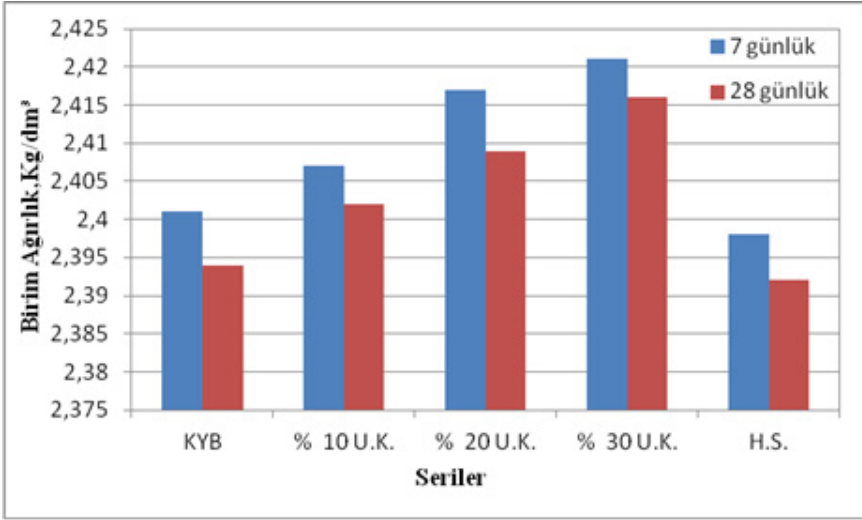
KYB’ nin geçebilme ve kendiliğinden yerleşme özelliğinin ölçülmesi için kullanılan U kutusu deneyi Şekil 4.4’de verilmiştir. U kutusu deneyinden ölçülen KYB’ nin deney aleti içindeki yükseklik seviyelerinin farkları ile bulunan geçebilme oranıdır. KYB kontrol numunesinde oran 32 cm, %10 uçucu kül katkılı olduğunda fark 28 cm düşmüştür, %20 ve %30 uçucu kül katkılı olduğunda fark 27 cm gerilemiştir. Uçucu kül katkılı malzemeler KYB’ nin geçebilme ve donatı arası geçebilme özelliğine olumlu tesir etmiştir.

#### 4.2. Sertleşmiş KYB Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Sertleşmiş KYB üzerinde yapılan deneylerin sonuçları, mineral katkı miktarı ve ilgili deneyin formülleri ile ortalama değerler hesaplanmış ve deney türlerine göre değerlendirilmiş ve incelenmiştir.

##### 4.2.1. Sertleşmiş KYB’de birim ağırlık deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

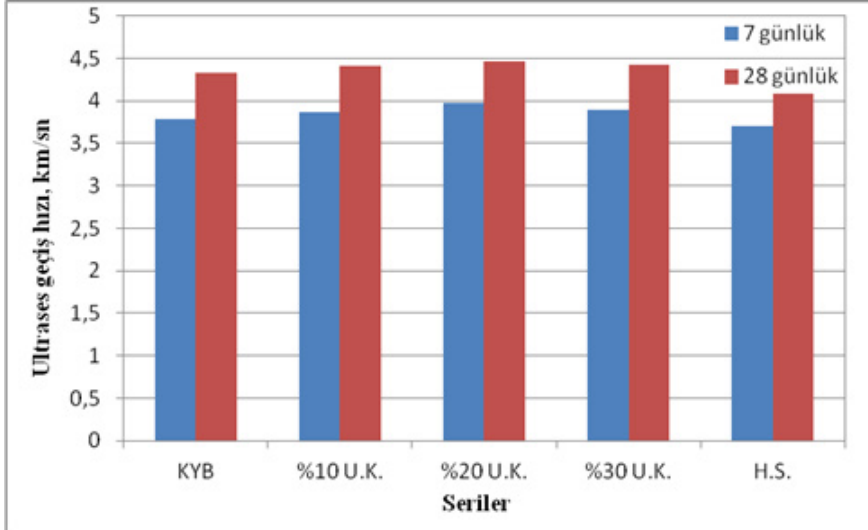




Şekil 4.5. Sertleşmiş KYB' de numune birim ağırlık deney sonuçları

Standart kür ortamında bekletilen KYB numunelerinde 7 ve 28 günlük yapılan birim ağırlık deney sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde 7 günlük kontrol numunelerinin ortalama birim ağırlıkları  $2,401 \text{ kg/dm}^3$  olurken, % 10 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,407 \text{ kg/dm}^3$ , % 20 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,417 \text{ kg/dm}^3$ , % 30 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,421 \text{ kg/dm}^3$ , hava sürükleyici katkılı numunelerde ise  $2,398 \text{ kg/dm}^3$  olarak hesaplanmıştır. 28 günlük kontrol numunelerinin ortalama birim ağırlıkları  $2,394 \text{ kg/dm}^3$  olurken, % 10 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,402 \text{ kg/dm}^3$ , % 20 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,409 \text{ kg/dm}^3$ , % 30 uçucu kül eklenildiğinde birim ağırlık  $2,416 \text{ kg/dm}^3$ , hava sürükleyici katkılı numunelerde ise  $2,392 \text{ kg/dm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül oranının dozaja ilave olarak artmasıyla birim ağırlıklarda beklendiği gibi artışlar görülmüştür. En yüksek birim ağırlık %30 uçucu kül içeren seride 7 günlük numunelerde görülmüştür.

#### 4.2.2. Sertleşmiş KYB’de ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

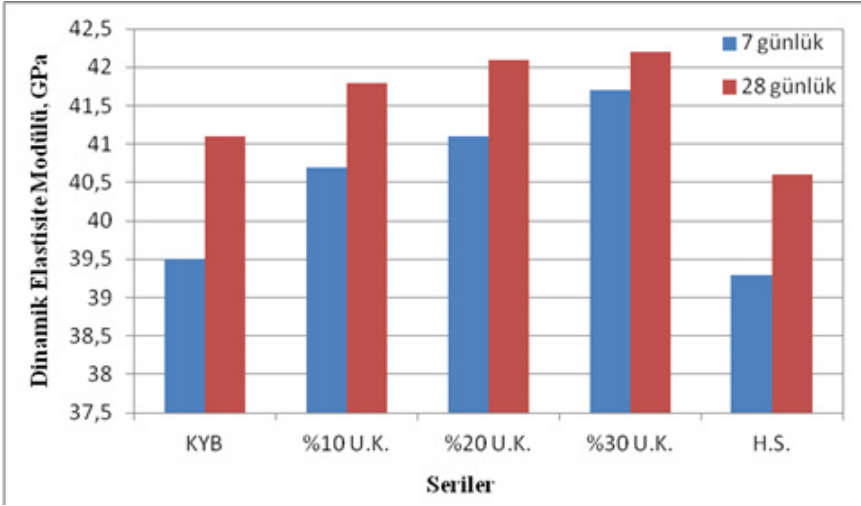


Şekil 4.6. Sertleşmiş KYB’de ultrases geçiş hızı deney sonuçları

7 ve 28 günlük KYB numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş süresi deneyinden elde edilen ultrases geçiş hızı sonuçları Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. 7 ve 28 günlük yapılan deneylerde kontrol karışımında ölçülen geçiş hızı(t), uçucu kül katkılı numunelerde arttığı gözlemlenmiştir. Hava sürükleyici katkı kullanıldığında tekrar ultrases geçiş hızında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan görüleceği üzere hava sürükleyici katkıların kullanılması sertleşmiş beton içerisindeki boşlukları artırdığı için ultrases geçiş hızları da düşmüştür. Uçucu kül ince tanecikli olması sebebiyle boşlukları iyi bir şekilde doldurduğu için ultrases geçiş hızını artırdığı söylenebilir. Geçiş hızı değerlerinin betonun yaşı arttıkça yükseldiği ve en yüksek geçiş hızı değerlerinin 28 günlük numunelerde yapılan deneylerde ölçülmüştür.

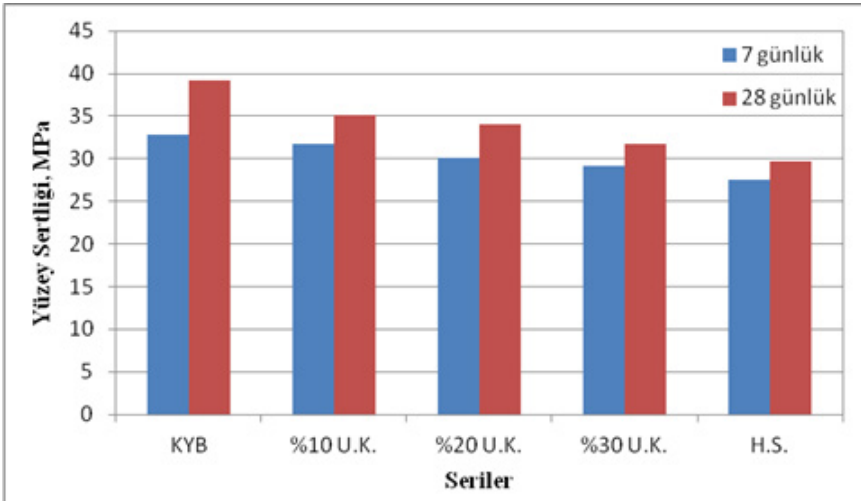
#### 4.2.3. Sertleşmiş KYB’de dinamik elastisite modülü sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

7 ve 28 günlük KYB numuneleri üzerinde yapılan birim ağırlık ve ultrases geçiş hızı sonuçlarına bağlı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülü sonuçları Şekil 4.7’de gösterilmiştir. 7 ve 28 günlük yapılan deneylerde uçucu kül katkılı numunelerde arttığı ve hava sürükleyici numunelerde düştüğü gözlemlenmiştir. Dinamik elastisite modülünün sonuçları betonun yaşı arttıkça yükseldiği ve ultrases geçiş hızı ile orantılıdır.



Şekil 4.7. Sertleşmiş KYB’de dinamik elastisite modülü deney sonuçları

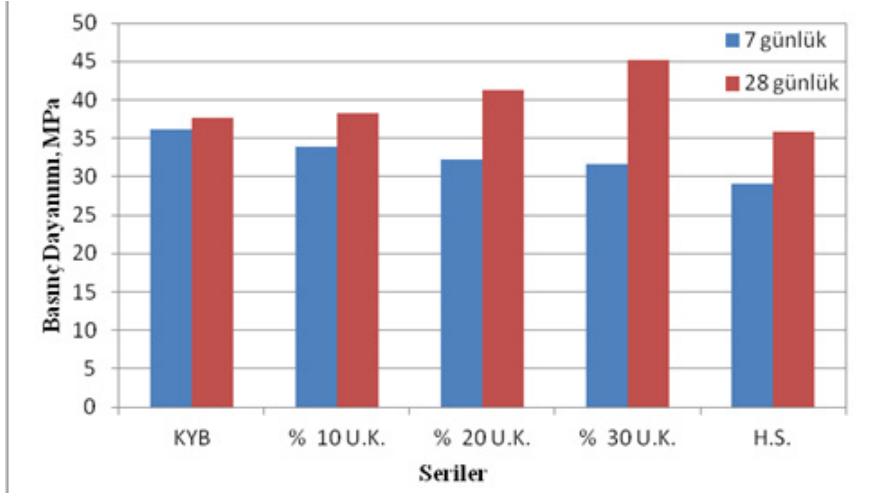
#### 4.2.4. Sertleşmiş KYB’de yüzey sertliği deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.8. Sertleşmiş KYB’de yüzey sertliği deney sonuçları

7 ve 28 günlük KYB küp numuneleri üzerinde yapılan yüzey sertliği deneylerinin sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. 7 ve 28 günlük yapılan deneylerde katkısız kontrol numunesinde hesaplanan yüzey sertlikleri uçucu kül oranı %10, %20, %30 ve hava sürükleyici katkılı numunelerde düşüş göstermiştir. Beton yaşı arttıkça, 28 günlük numuneler 7 günlük numunelere göre daha sert yüzeyli olduğu gözlemlenmiştir. Karışım içerisindeki uçucu kül oranı arttıkça, uçucu külün ince ve küresel taneleri ve agreganın özgül ağırlığından daha hafif olduğu için uçucu kül katkılı numuneler kontrol numunesine göre yüzey sertliği daha azdır.

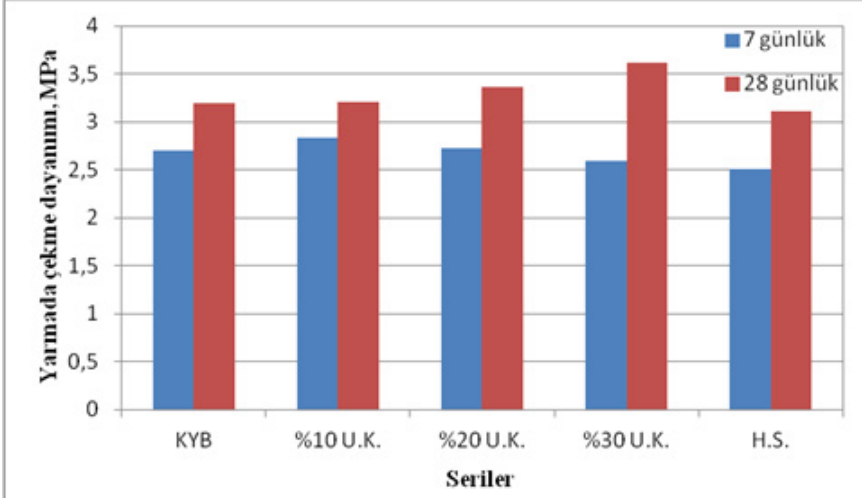
#### 4.2.5. Sertleşmiş KYB'de basınç dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.9. Sertleşmiş KYB'de basınç dayanımı deney sonuçları

7 ve 28 günlük KYB küp numuneleri üzerinde yapılan basınç dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 4.9' da gösterilmiştir. 7 günlük numunelerde yapılan deneylerde katkısız kontrol numunesinde hesaplanan basınç dayanımı (P) uçucu kül oranı %10, %20, %30 ve hava sürükleyici katkı numunelerde düşüş göstermiştir. Beton yaşı arttıkça, 28 günlük numuneler de %10, %20, %30 uçucu kül içeren numunelerde basınç dayanımı arttığı gözlenmiştir. En yüksek dayanım 28 günlük numunelerde %30 uçucu kül içeren serilerde hesaplanmıştır. Uçucu kül daha ince ve hafif bir malzeme olduğu için boşlukları daha iyi doldurduğu ve basınç dayanımına beton yaşı arttıkça yükselttiğini gözlenmiştir.

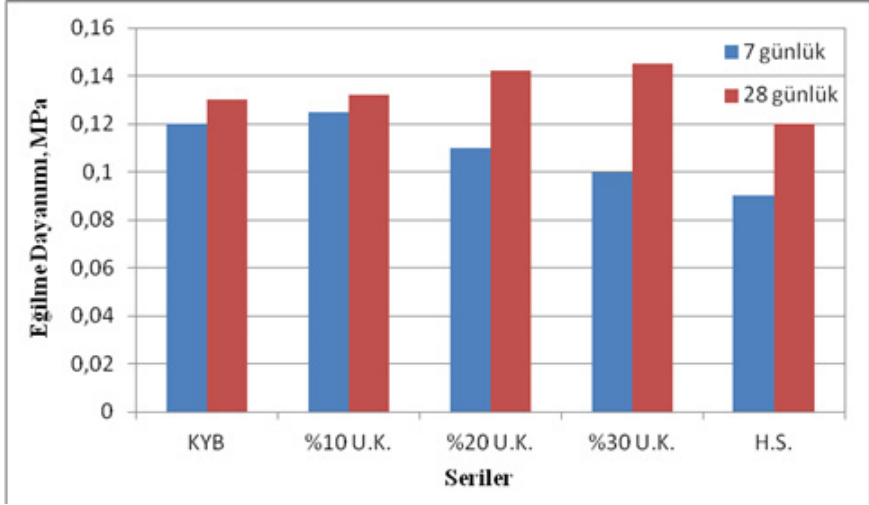
#### 4.2.6. Sertleşmiş KYB’de yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.10. Sertleşmiş KYB’de yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

7 ve 28 günlük KYB silindir numuneleri üzerinde yapılan yarmada çekme dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 4.10’ da gösterilmiştir. 7 günlük numunelerde yapılan deneylerde katkısız kontrol numunesinde hesaplanan yarmada çekme dayanımları, basınç dayanımında olduğu gibi uçucu kül oranı %10, %20, %30 ve hava sürükleyici katkı numunelerde düşüş göstermiştir. Beton yaşı arttıkça, 28 günlük numuneler %10, %20 ve %30 uçucu kül içeren serilerde yarmada çekme dayanımı arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek dayanım 28 günlük numunelerde %30 uçucu kül içeren serilerde hesaplanmıştır. Buradan uçucu kül katkıların olduğu karışımlarda yarmada çekme dayanımı, küp numunelerdeki gibi basınç dayanımla aynı özelliği gösterip uçucu kül katkıların olduğu numuneler beton yaşı arttıkça yarmada çekme dayanımını artırmıştır.

#### 4.2.7. Sertleşmiş KYB' de eğilme dayanımı deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi



Şekil 4.11. Sertleşmiş KYB' de eğilme dayanımı deney sonuçları

7 ve 28 günlük KYB prizma numuneleri üzerinde yapılan eğilme dayanımı deneylerinin sonuçları Şekil 4.11' de gösterilmiştir. 7 günlük numunelerde yapılan deneylerde katkısız kontrol numunesinde hesaplanan eğilme dayanımı, basınç dayanımında olduğu gibi uçucu kül oranı %10, %20, %30 katkılı numunelerde düştüğü fakat beton yaşı arttıkça, 28 günlük numuneler de %10, %20, %30 uçucu kül içeren serilerde eğilme dayanımı arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek dayanım 28 günlük numunelerde %30 uçucu kül içeren serilerde hesaplanmıştır. Ayrıca hava sürüklenmiş KYB eğilme dayanımı basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da hava sürükleyici numunelerde eğilme dayanımı düşmüştür. Buradan uçucu kül katkılı serilerde eğilme dayanımı beton yaşı arttıkça eğilme dayanımını artırmıştır.

### 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Taze KYB' de karışımlardaki uçucu kül miktarı artması ile doldurma, geçebilme, ayrışmaya karşı direnç, akma hızı, boşluk doldurma özelliği ve işlenebilirliğinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Karışımlardaki uçucu kül miktarı dozaja ilave olarak yapılması sebebiyle birim ağırlıklarda beklenildiği gibi artış olduğu görülmüştür.
- 28 günlük deneylerde uçucu kül katkılı serilerde ultrases geçiş hızının arttığı gözlemlenmiştir.

- Hava sürükleyici katkılı numunelerde ultrases geçiş hızında azalma olmuş, beton içerisindeki oluşan hava kabarcıklarının geçiş hızını engellediği gözlenmiştir.
- Sertleşmiş KYB’de 7 ve 28 günlük yapılan deneylerde hesaplanan dinamik elastisite modülleri uçucu kül katkısı olan numunelerde artmıştır. Ultrases geçiş hızı ile aynı özelliği göstermiştir.
- Sertleşmiş KYB’de uçucu kül katkılı numunelerde 7 günlük basınç dayanımlarda azalma olurken beton yaşı arttıkça uçucu küllü numunelerde basınç dayanımı artmıştır.
- Hava sürükleyici katkılı serilerde basınç dayanımında düşüş gözlemlenmiştir.
- 28 günlük numunelerde uçucu kül içeren serilerde yarmada çekme dayanımı arttığı gözlenmiştir.
- 28 günlük numunelerde uçucu kül içeren serilerde eğilme dayanımı arttığı gözlenmiştir.

Ortaya çıkan bu sonuçlara göre KYB’de dozaja ilave olarak eklenen uçucu kül katkısı ilerleyen zamanda basınç dayanımını, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını yükselttiği gözlemlenmiştir. KYB’nin taze haldeki özelliklerine ve işlenebilirliğine olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Birim ağırlıklarının, kullanılan katkılar ilave olarak kullanıldığı için arttığı görülmektedir. Uçucu kül pürüzsüz kürecik ve camsı yapıda olduğu için boşlukları çok iyi doldurma özelliği olduğu gözlemlenmiştir. Hava sürükleyicilerin betonun donma direncini arttırmasının yanında başka faydalarının da bulunduğu görülmektedir. Hava sürükleyiciler betonun işlenebilirliğini yükseltmektedirler. Uçucu kül kullanımı KYB’de işlenebilirlik ve beton yaşı ilerledikçe betonda dayanımına olumlu katkıda bulunduğu için %20 ile %30 arasında uçucu kül katkısı kullanımı yararlı olacağı söylenebilir. Ancak kullanılan uçucu kül ve hava sürükleyici katkılarının çimento ile yer değiştirme şeklinde kullanılarak oluşturulan serilerin sonuçları incelenmesi bu çalışmanın bir sonucu olarak önerilmektedir.

**KAYNAKÇA**

- American Society for Testing and Materials. (1985), *ASTM C 618-85, Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, Philadelphia,
- Bouzoubaa, N. Lacleme., M. (2001), Self-compacting concrete incorporating high volumes of class f fly ash preliminary results, *Cement and Concrete Research*, 31(3),413-420.
- Collepari M. (2001), A very close precursor of self-compacting concrete, *Symbosium on Sustainable Development and Concrete Technology, Proceeding of the Giornate AICAP*, Ravenna, Italy.
- Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R., Torresan, I. (2002), Zero energy system: An innovative approach for rationalized precast concrete production, *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, Istanbul, Turkey.
- EFNARC, (2002), Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*.
- Felekoğlu, B. (2003), *Kendiliğinden yerleşen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- İnşaat Mühendisleri Odası (İMO), (2019). *Beton*, Erişim Tarihi: 23.05.2019, [http://www.imo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/787a9fe2ee4fff1\\_ek.pdf?tipi=84&turu=X&sube=0](http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/787a9fe2ee4fff1_ek.pdf?tipi=84&turu=X&sube=0),
- Kevorkian, A. A. (2006), Air-entraining admixtures. ASTM STP 169D. *American Society for Testing ve Materials*, s.474-483.
- Kılınç, C. (2012), Kendiliğinden yerleşen beton, *Hazır Beton Dergisi*, Temmuz-Ağustos, s.69-75.
- Kocataşkın, F. (1987), *Yeni gelişen beton malzemeleri, İleri beton teknolojisi ders notları*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. (2002), Design ve Control of Concrete Mixtures, *14th ed. Portland Cement Association*, Skokie.
- Li, B., Liang, W., He, Z. (2002), Study on high-strength composite portland cement with a larger amount of industrial wastes”, *Cement ve Concrete Research*, C. 32, s. 1341-1344.
- Naik, T. R., Singh, S. S., Ramme B. W. (2002), Effect of source of fly ash on abrasion resistance of concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, s. 417-426, September-October.
- Okamura, H. ve Ozawa, K. (1995), *Mix-design for self-compacting concrete*, Tokyo: Concrete Library of JSCE.



- Okamura, H. ve Ouchi, M., (2003), Self-compacting concrete, *Journal of Advanced Concrete Technologies*.
- Özkul, M. H., Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, A., Mutlu, M. ve Manzak, O., (2002), The usage of self-compacting concrete in the precast industry, *17 th Int. Congress of the Precast Concrete Industry*, BIBM, İstanbul.
- Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, U.A., Ozkul, M. H., (2004), Kendiliğinden yerleşen beton ve katkı-cimento uyumu, *Beton 2004 Kongresi*, 10- 12 Haziran, İstanbul, s. 213-224.
- Sahmaran, M., Christianto, H. A., Yaman, I. O., (2006), The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars, *Cement Concrete Compacting*, 28(5), 432-440.
- Semioli, W. J., (2002), Self placing concrete, *Concrete International*, 23(12), 69-72.
- Skarendahl, A., Petersson, Ö., (2000), Self compacting concrete, *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, RILEM Publication.
- Sümer, M. (1994). Uçucu kül atıklarının beton üretiminde değerlendirilmesi, *I. Ulusal İnşaat ve Çevre Sempozyumu*, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 179-18
- Temiz, H. ve Yeğinobalı, A. (1995), UK ve SD katkılı çimento hamur ve harçlarının bazı özellikleri, endüstriyel etıkların inşaat sektöründe kullanılması. *Sempozyum Bildiri Kitabı*.
- Topçu, İ. B., Ünal, O., Uygunoğlu, T. (2006), Kendiliğinden yerleşen yarı-hafif betonların özelliklerinin araştırılması, *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi*, 2007, Milli Kütüphane, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2009), *TS 706 EN 12620+A1 ,Beton agregaları*, Ankara.
- Türk Standartları Enstitüsü. (1999), *TS EN 1097-3, Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri için deneyler bölüm 3: Gevşek yığın yoğunluğunun ve boşluk hacminin tayini*, Ankara.
- TS EN 197-1 (2012), “Genel çimento bileşimi, özellikler ve uygunluk kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkel Ş., Felekoğlu B. (2012), İri agrega türü ve akışkanlaştırıcı katkı dozajının KYB'nin mekanik performansına etkileri, *Hazır Beton Dergisi*, Kasım – Aralık.
- Türkel, S., Felekoğlu, B., (2005), Farklı dayanım sınıflarındaki betonlar için akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların su azaltma performansları, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Kongresi (Beton ve Harç Katkıları)*, 191-200, 24-25 Mart, Ankara.
- Walraven, J. (2003), Structural aspects of self compacting concrete, *3<sup>rd</sup> Int Symp. On Self-Compacting concrete*, Ed by O. Wallevic and I. Nielsson. Stockholm, Sweden: RILEM Publications; 3-14.

# Bölüm 6

## **EKSENEL AKILI BİR STATORLU İKİ ROTORLU SENKRON GENERATÖRDE DEMAGNETİZASYON ARIZASININ TESPİTİ**

*Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Recep MİNAZ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Recep MİNAZ

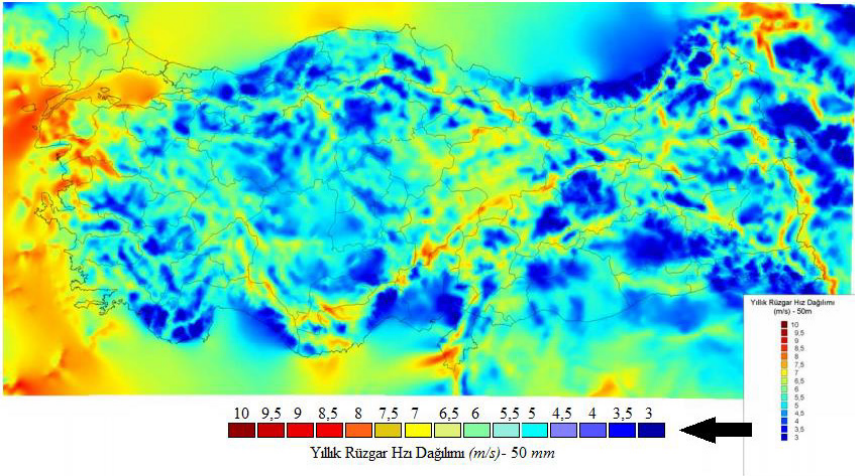
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Siirt Üniversitesi, Siirt, Türkiye



## 1. Giriş

Elektrik makineleri 19. yy ortalarından itibaren ortaya çıkmış ve günümüze kadar önemini artırarak modern hayatın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Endüstriyel alanda elektrik makinelerinin önemli türleri olan asenkron makineler, doğru akım makineleri ve senkron makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde elektrik makinelerinin boyut ve tür açısından milyarlarca çeşidi mevcuttur ve bu makineler evlerde, araçlarda, iş yerlerinde ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılarak çevremizi sarmıştır. Genellikle tek fazlı ve üç fazlı olarak üretilen bu makineler, günlük işlerde insan hayatına önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Elektrik makinelerin verimliliğini artırmak ve kullanılabilirliği konusunda birçok çalışmalar mevcut olup halen üzerlerinde çalışmalar devam etmektedir (Minaz, 2017)

Bu yüzyılda en temel enerji olarak karşımıza çıkan elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin temini için en çok kullanılan yakıtlar fosillerden elde edilmektedir. Bu yakıtların ülkede olmaması ve dışarıya bağımlı olunması sebebiyle ihracat için büyük maliyetler ödenmektedir. Bu kullanılan yakıtlar doğal dengeyi bozmak ile birlikte insan sağlığını da tehdit edecek seviyeye gelmiştir. Ülkemizin enerjiye olan ihtiyacını karşılamak için kendi kaynaklarından en üst düzeyde faydalanmasının sağlanması gerekmektedir. Şekil 1. de görüldüğü gibi Türkiye'nin rüzgâr haritası ve meteorolojik verileri incelendiğinde, rüzgâr enerjisiyle elektrik üretmenin vazgeçilmez bir avantaj olduğu anlaşılmaktadır. Bu avantajdan faydalanarak rüzgâr hızlarına uyumlu olan çeşitli tiplerde generatör tasarlaması önemli avantajlar sağlar.



Şekil 1. Türkiye'nin 50 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı haritası (Solar-akademi, 2020)

Elektrik makineleri günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmaya başlamıştır. Her geçen gün, literatürde yeni çalışmalar yerini almaktadır. Yapılan çalışmalarda yeni modeller geliştirilmektedir. Geliştirilen bu modellerde makinenin güç yoğunluğundaki artmalar, tasarım şeklinin değiştirilmesi, makine boyutlarındaki küçülmeler, ayrıca uyartım şekillerine göre yapılan çalışmalar giderek artmaya başlanmıştır. Farklı uyartım şekli olarak son zamanlarda eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Ferromanyetik malzeme alanındaki araştırmalarda 1980'lerden bu yana önemli gelişmeler olmuştur. Bunlardan en önemlisi, son 20-25 yılda neodyum mıknatısların (NdFeB) gelişimiyle bu mıknatısların elektrik makinelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıdır. Bu mıknatıslardaki gelişmeler sabit mıknatıslı elektrik makinaların gelişimini olumlu yönde etkilemiştir. Bunun yanında eksenel akılı sabit mıknatıslı makinaların tasarımında çığır açmıştır. Eksenel akılı makinalar hem motor hem de generatör olarak üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca bu tip makinalar bazı avantajlarından dolayı araştırmacıların dikkatini çekmiştir.

Eksenel akılı senkron generatör birçok avantajı vardır. Diğer generatörlere göre veriminin yüksek olması, yüksek tork, yüksek güç yoğunluğu ve kontrol kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Bunun için çok geniş alanda kullanılmaktadır. Bu makinada meydana gelen mıknatıslanma arızaların tespit edilmesi son derece önemlidir. Bu tip arızaların oluşması çalışmasını olumsuz bir şekilde etkilemektedir Eksenel akılı senkron generatör sonlu elemanlar yöntemiyle hem sağlıklı hem de arızalı olarak analizleri yapılabilir. Bu analiz sayesinde makinanın elektrikselsel ve manyetik davranışlarında değişiklikler meydana gelip gelmediği görülebilecektir. Tasarımı yapılmış eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak arıza tespitinin yapılabileceği test edilecektir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen stator çıkış sinyalleri hızlı fourier dönüşümü (FFT) uygulanarak öz nitelik çıkarılacaktır. Bu öz nitelikler k-NN, MLP ve RF vb. sınıflandırma yöntemleri kullanılarak ayrıştırılması amaçlanmaktadır.

## **2. Literatür Araştırması ve Arıza Tespiti İçin Kullanılan Yöntemler**

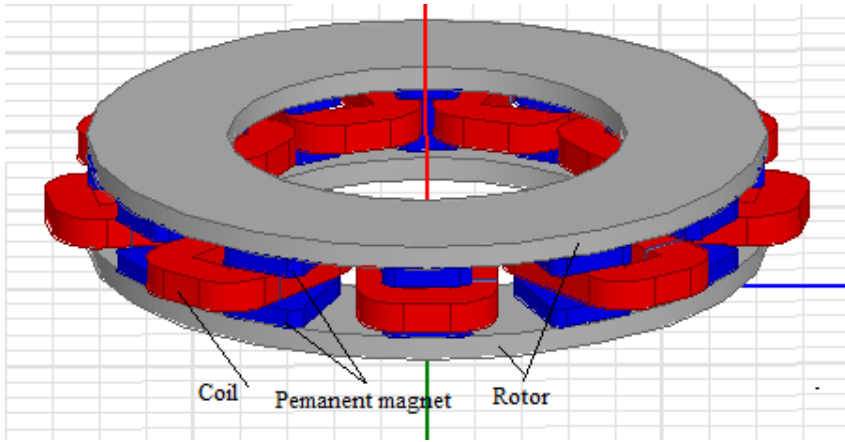
Elektrik makinaları son yıllarda endüstride yerini alan önemli uygulamalarda kullanılan teçhizatlardır. Endüstri uygulamalarında elektrik makinalar üzerinde çalışmalar yoğunlaştı. Elektrik makinaların üretilmesinin devamlılığı da oldukça önemlidir. Elektrik makinaları altında motor, transformator ve generatör gibi makinalar mevcuttur. Bu makinalarda oluşacak arızaların çok ciddi maliyet ve üretim kaybına sebep olmaktadır. Bunun için elektrik makinalarda oluşacak arızaların önceden teşhisi oldukça önem kazanmaktadır. Daha önce bunlar ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur.

Minaz ve arkadaşlarının indüksiyon motor üzerinde yaptığı bir çalışmada makine öğrenme yöntemleri kullanılmıştır. Sağlıklı ve arızalı durumların için indüksiyon motorun sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri yapılmıştır. Ayrıca farklı koşullarda bir çok analiz ile desteklenmiştir. Elde edilen akım sinyaline ait ham verilere hızlı fourier yöntemi (FFT) uygulanarak işlenmiş veriler elde edilmiştir. Sınıflandırma içinde k-NN, MLP ve RF kullanılarak ayırıştırma amaçlanmıştır. Bu yöntem kullanılarak oldukça başarı olduğu gözlemlenmiştir (Minaz ve Yıldız, 2019).

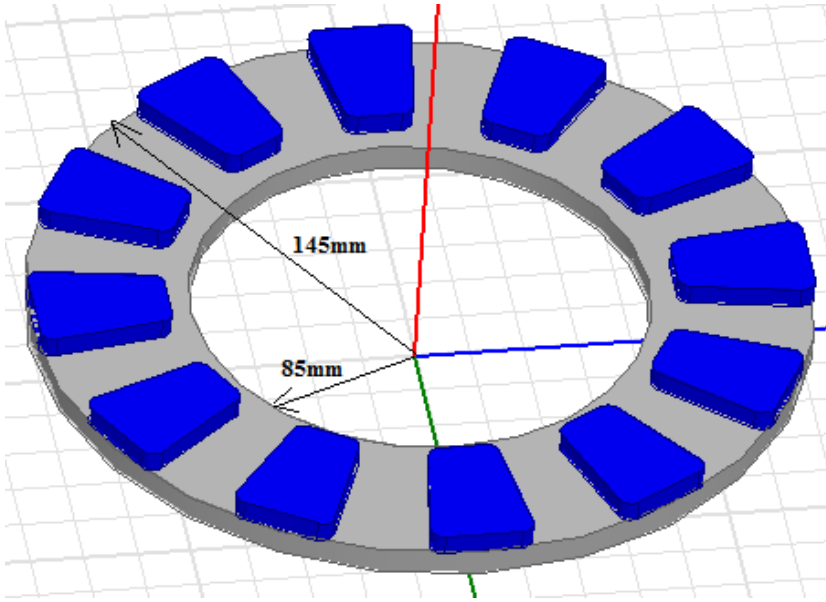
Minaz'ın fırçasız DC motorunun eksen kaçıklığı ve kırık mıknatıs arızalarının tespitini bilgisayar benzetimi ile yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle BLDC motorun analizleri yapılmıştır. Burada sağlıklı ve arızalı durumların için sinyaller alınmıştır. k-NN, MLP ve RF kullanılarak yapılan sınıflamadada oldukça başarı göstermiştir (Minaz, 2020).

Gelişen bilgisayar teknolojileri ile birlikte her geçen gün kullanılmakta olan veri miktarı da hızla büyümekte; hızla artan veri miktarı da bu verilerin analiz edilmesini zorlaştırmaktadır. Bir tahmine göre her 20 ayda bir dünyadaki veri miktarının ikiye katlandığı ifade edilmektedir (Witten ve diğ., 2005). Uygun sinyal işleme aracını kullanarak bir sinyalden bilgi edinmek, ardından uygun veri madenciliği tekniği, motor durumunu doğru şekilde belirtmek arızanın ekken teşhisi için oldukça önemlidir (Panigrhy ve diğ., 2016).

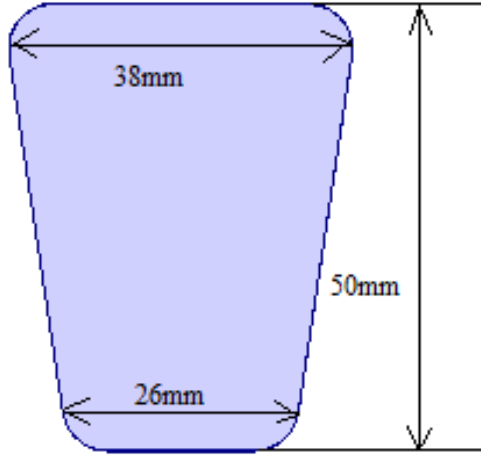
Makinada oluşabilecek demagnetizasyon arıza teşhisi yapılabilmesi için, ilk önce akım ve gerilim sağlıklı sinyalleri alınması gereklidir. Daha sonra akım ve gerilimin arızalı sinyallerinin karşılaştırması yapılmaktadır. Farklı hız ve yüklerde sağlıklı ve arızalı durumlar için akım ve gerilim sinyalleri elde edilmesi için sonlu elemanlar yönteminle analizler yapıldı. Bu generatörlerin bir tanesi sağlıklı, bir tanesine 2% ve diğerine de 5% demagnetizasyon arızası verilmiştir. Şekil 1 de generatörün 3D görünümü verilmiştir. Şekil 3 de daimi mıknatısın rotor üzerindeki dizilişlerini göstermiştir. Şekil 4 te ise bu makine tasarımında seçilen mıknatısın geometrisi ve ölçüleri verilmiştir. Şekil 5 te ise mıknatısların diziliminden kaynaklanan manyetik akı yolları gösterilmektedir.



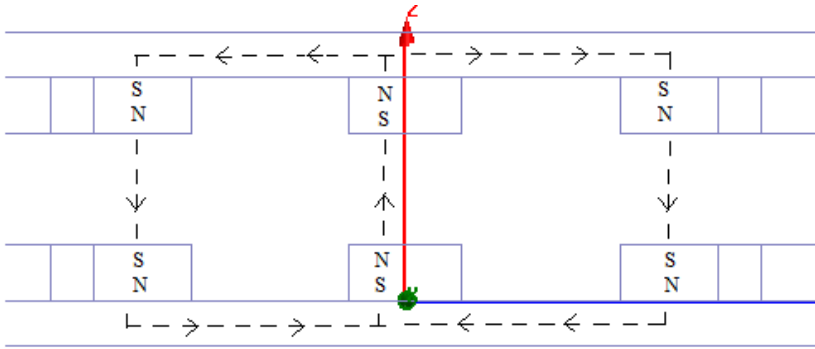
**Şekil 2.** Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörünün görünümü. Daimi mıknatıslar: koyu mavi renkte. Rotorlar: gri renkte. Stator sargıları: kırmızı renklerde (Minaz ve Çelebi, 2017)



**Şekil 3.** Eksenel akılı daimi mıknatıslı yan rotorlarının geometrisi (Minaz ve Çelebi, 2017)



Şekil 4. Eksenel akılı daimi mıknatısın geometrisi (Minaz ve Çelebi, 2017)

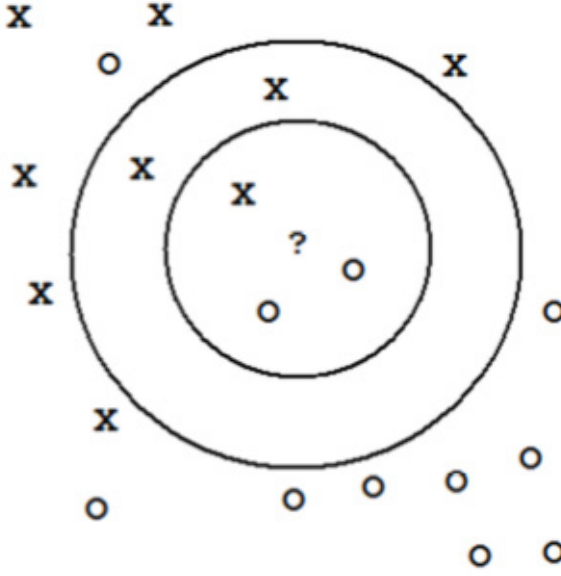


Şekil 5. Daimi mıknatısların akı yolları görünümü (Minaz ve Çelebi, 2017)

### 1.1 K en yakın komşu Algoritması (kNN)

K-NN algoritması, T. M. Cover ve P. E. Hart tarafından önerilen, örnek veri noktasının bulunduğu sınıfın ve en yakın komşunun, k değerine göre belirlendiği bir sınıflandırma yöntemidir. Yeni karşılaşılan bir örnek, eğitim setinde yer alan örnekler ile arasındaki benzerliğe göre sınıflandırılmaktadır (Erdal ve Ayтуğ, 2016). Algoritmanın sınıflandırma işlemindeki başarısını etkileyen faktörlerden biri k değerinin doğru seçilmesidir. Bu değerinin çok büyük veya çok küçük seçilmesi, aynı sınıfta bulunması gereken örüntülerin farklı sınıflara atanabilmesine neden olabilmektedir. Farklı k değerleri ile deneyerek en başarılı olan k değerinin belirlenmesi en yaygın yöntemdir, ancak bu işlem zaman açısından maliyetli bir işlemdir. Sınıflandırılacak örüntülerin boyutları, k-NN işlem hızını etkileyen diğer bir parametredir. k-NN sınıflandırıcı örneği şekil 6'da verilmiştir.

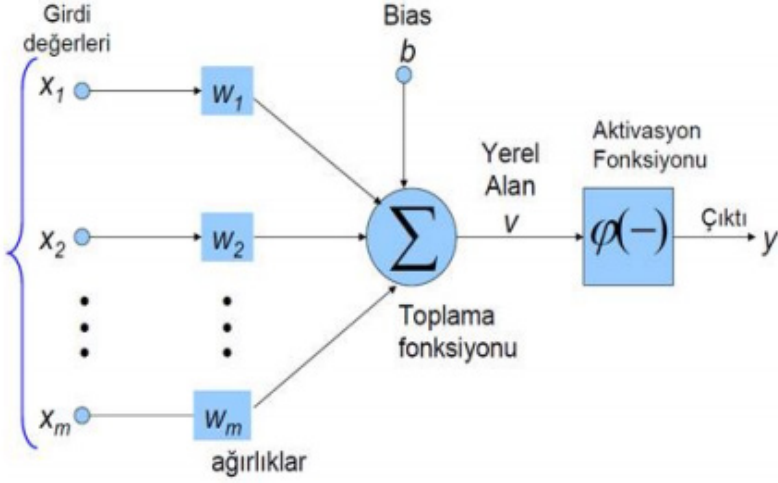




Şekil 6. *k*-NN Sınıflandırıcı Örneği (Öztürk ve diğ.)

### 1.2 Yapay Sinir Ağları (MLP)

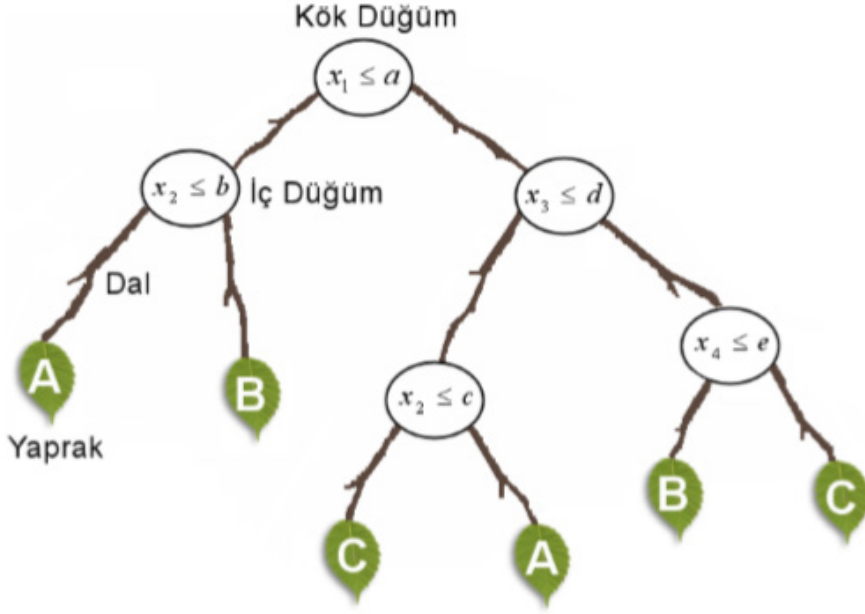
Genel olarak yapay sinir ağları insan beyninin biyolojik sinir yapısını taklit ederek sinirsel algılayıcılar yardımı ile önceden öğrenilmiş ya da sınıflandırılmış bilgileri kullanarak yeni bilgiler türetebilen ve oluşturabilen, karar verebilen bilgisayar programlarıdır. Örüntü tanıma, sistem tanılama, robotik, sinyal işleme, nonlineer denetim alanları gibi birçok uygulama alanında MLP yaygın olarak kullanılmaktadır (Furkan ve Fahri, 2017). İleri beslemeli sinir ağlarında, nöronlar katman şeklinde düzenlenir. Katmandaki nöronlar önceki katmandan girdi alır ve çıktılarını diğerine aktarır katmanı. Bu tür ağlarda aynı veya önceki katmanlardaki nöronlara bağlantılar izin verilmiyor. Son nöron katmanına çıkış katmanı ve katmanları denir (Halıcı, 2004; Atalay ve Çelik, 2017). Yapay sinir ağı şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Yapay Sinir Ağı (Kesenler ve kesenler, 2017)

### 1.3 Karar Ağaçları (RT)

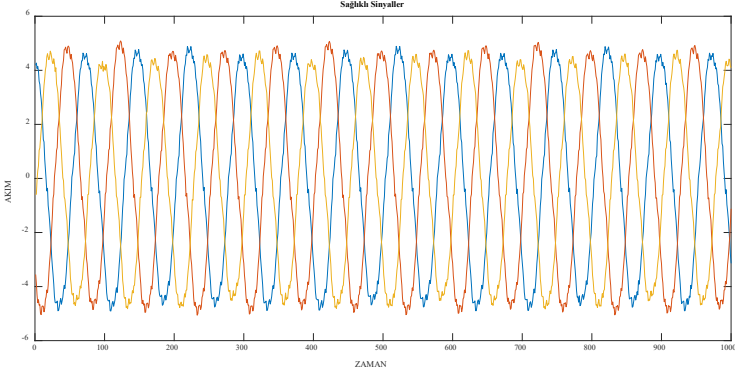
Karar Ağaçları, veri madenciliğinde ‘Böl-ve-yönet’ stratejisini uygular. Bir karar ağacı algoritmasının prensipte görevi veriyi özyinelemeli olarak alt veri gruplarına dallanma yaparak bölmektir. Bu ayırım aşamasında oluşan her yeni dal bir kuralı ifade etmektedir. Temel olarak iki adımdan oluşur. Birinci adım ağacın oluşturulması, diğer adım ise veri tabanındaki her bir kaydın bu ağaca uygulanarak verilerin sınıflandırılmasıdır [29]-[30]. Sınıflama aşamasında girilen test verisi, sınıflama kurallarının veya karar ağacının doğruluk yüzdesini bulmak üzere kullanılır. Eğer kabul edilebilir bir doğruluk yüzdesi varsa, bu sınıflandırma algoritması yapılan çalışmanın verileri sınıflandırılması amacıyla kullanılır. Karar ağacı yapısı şekil 8’de gösterilmiştir.



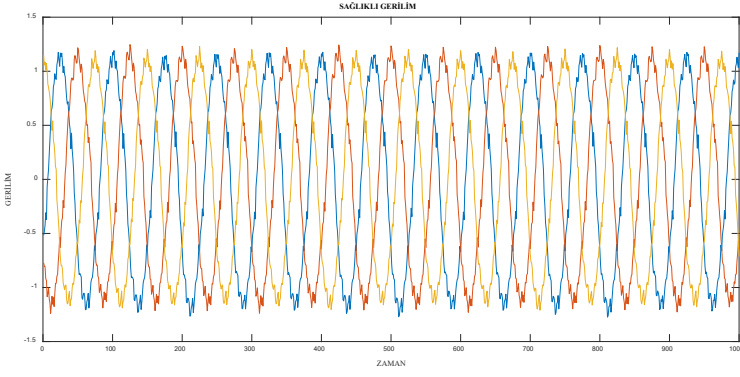
Şekil 8. Dört boyutlu üç sınıftan oluşan bir karar ağacı yapısı (Kavzoğlu ve Çölkesen, 2010)

### 3. Eksenel Akıllı Makinada Demagnetizasyon Arızası

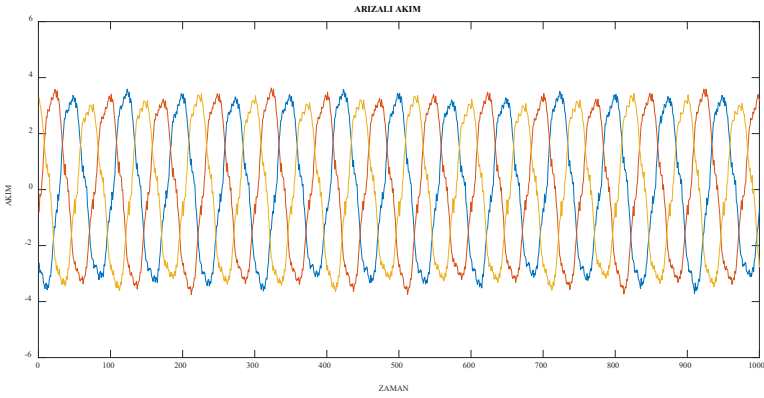
Eksenel akıllı makinada meydana gelen demagnetizasyon arızası mıknatısların zamanla aşınması, özelliğini kaybetmesi yâda kırılması gibi nedenler olabilir. Bu çalışmada ise oluşturulan arıza ise sabit mıknatısların özelliklerinin bir miktar kaybolmasıdır. Bundan yola çıkılarak akım ve gerilim sinyallerinde oluşan demagnetizasyon arızasını ortaya koymaktır. Demagnetizasyon arızası oluşmadan oluşan akım sinyalleri şekil 9 da verilmiştir. Sağlıklı gerilim işaretleri de şekil 10 da verilmiştir. Demagnetizasyon arızası oluştuğunda ise oluşan akım sinyalleri şekil 11 de gerilim işaretleri de şekil 12 de verilmiştir.



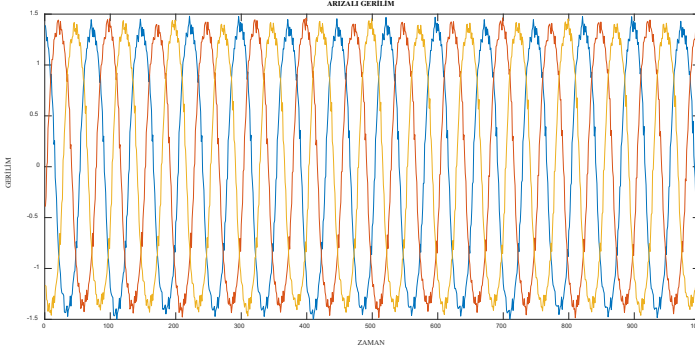
Şekil 9. Sağlıklı akım işaretlerinin gösterimi.



Şekil 10. Sağlıklı gerilim işaretlerinin gösterimi.



Şekil 11. Arızalı akım işaretlerinin gösterimi.



Şekil 12. Arızalı gerilim işaretlerinin gösterimi.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, aksenal akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün demagnetizasyon arızası için arıza teşhisi yapılmıştır. Elektrik makinalarda oluşacak arızanın önceden tespiti için oldukça önemlidir. Hem bakım maliyetlerini azaltmak hem de makinalarda oluşabilecek büyük derecedeki arızanın önüne geçilmektedir. Bundan dolayı sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen akım ve gerilim sinyalleri hızlı fourier dönüşümü (FFT) uygulanarak öz nitelik çıkarılacaktır. Bu öz nitelikler k-NN, MLP ve RF sınıflandırma yöntemleri kullanılarak ayrıştırılması yapılmıştır. Elde edilen bu sonuçların aksenal akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün demagnetizasyon arıza tespiti için faydalı bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Bu yöntem için kullanılan sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırması da yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde kullanılan k-NN ve RF sınıflandırmalarda arızalı sinyallerin sağlıklı sinyallerden tam olarak ayrıştığı söylenebilmektedir. MLP sınıflandırma yöntemi ise diğerlerine göre performansı daha düşük olduğu ortaya koyulmuştur.

**KAYNAKLAR**

- Atalay, M., & Çelik, E. (2017). Büyük Veri Analizinde Yapay Zekâ Ve Makine Öğrenmesi Uygulamaları. *DergiPark*, 9(22), 155 - 172.
- Erdal, T., & Aytuğ, O. (2016). K-En Yakın Komşu Algoritması Parametrelerinin Sınıflandırma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Akademik Bilişim*.
- Furkan, K. M., & Fahri, K. E. (2017). Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları ve Tarihçesi. *DergiPark*, 5(2), 8 - 18.
- Hahıcı, U. (2004). From Biological to Artificial Neuron Model. *ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS* (s. 1-14). içinde Ankara.
- Kavzoğlu, T., & Çölkesen, İ. (2010). Karar ağaçları ile uydu görüntülerinin sınıflandırılması: Kocaeli örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2(1), 36-45.
- Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F. (2017). Geçmişten Günümüze Yapay Sinir Ağları Ve Tarihçesi. *Takvim-İ Vekayi*, 5(2), 8-18.
- Minaz, M. R., & Çelebi, M. (2017). Analysis and Design of an Axial-Flux Coreless Permanent Magnet Synchronous Generator with Single Stators and Double Rotors. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 4(1), 7-11.
- Minaz, M. R., & Çelebi, M. (2017). Design and analysis of a new axial flux coreless PMSG with three rotors and double stators. *Results in physics*, 7, 183-188.
- Minaz, M., & Yıldız, K. (2019). İndüksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisinde Makine Öğrenme Yöntemlerinin Kullanılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 881-904.
- Minaz, M. R. (2020). Fırçasız DC Motorunun Eksen Kaçıklığı ve Kırık Mıknatıs Arızalarının Tespitinin Bilgisayar Benzetimi ile Yapılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 846-861.
- Minaz, M. R. (2017). Nüvesiz bir eksenel akıllı senkron generatör tasarımı ve simülasyonu (Doctoral dissertation).
- Öztürk, U., & Dalında, E. E. M. A. Konjestif Kalp Yetmezliği Hastalarının Teşhisinde Veri Azaltma Yöntemleri Kullanılarak En Yakın Komşu Sınıflandırıcı Çalışma Süresinin Kısaltılması.
- Panigrahy, P. S., Konar, P., & Chattopadhyay, P. (8-10 Jan. 2016). Application of data mining in fault diagnosis of induction motor. *IEEE*. Kolkata, India.
- Solar-academy, (2020). <http://www.solaracademy.com/menus/Turkish-Wind-Data.023202.pdf>
- Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2005). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques* (The Morgan Kaufmann Series in Data.



# Bölüm 7

## DEVE SÜTÜ YAĞININ FİZİKO-KİMYASAL ÖZELLİKLERİ<sup>1</sup>



*Gıda Mühendisi Okan EKMEN<sup>2</sup>  
Dr. Öğr. Üyesi Erman DUMAN<sup>3</sup>*

---

1 Bu makale Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsünde Gıda Mühendisi Okan Ekmen'in "Deve Sütü Yağının Fiziko-Kimyasal Özellikleri ile Süt Yağının Nano Boyuttaki Görünümü" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

2 Gıda Mühendisi Okan Ekmen, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, okanekmenn@gmail.com

3 Dr. Öğr. Üyesi Erman Duman, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, eduman@aku.edu.tr \* Sorumlu yazar: eduman@aku.edu.tr





## 1.GİRİŞ

Süt, memeli hayvanların yavrularını besleyebilmesi için, yavruların kendilerinin beslenmeye başlayabileceği vaziyete gelene dek yaşamını sürdürmek için alması gereken ve gerekli besin maddelerinin yeterli miktarlarda içerisinde bulunduğu, beyaz renkli, tadı ve kokusu kendine has olan bir sıvıdır (Metin, 2014). İnek sütü, süt üretiminin başlıca kaynağı olarak bilinse de inek sütü haricinde keçi, koyun, deve, eşek ve at gibi hayvanların sütleri ve bu sütlerden elde edilen süt ürünleri de dünya üzerinde farklı bölgelerde yüksek oranlarda tüketilebilmektedir (Ltsakalidou ve Papadimitriou, 2016). Örneğin Suudi Arabistan'ın süt üretiminde develer önemli düzeyde etkili olup, bunun ile birlikte bu bölgede ana et kaynağını oluşturmakta ve çölde eşya taşınmasında etkin olarak kullanılmaktadır. Deve sütü dünya üzerinde üretilen sütlerin %0.3'lük bir payında yer almakla birlikte deve sütü %89'luk oran ile Afrika'da üretimi yapılmaktadır (Taşdelen ve Akkaya, 2012).

Gıda ve beslenme yönünden, deve sütü düşük şeker oranı, düşük kolesterol oranı, yüksek C vitamini ve mineral içeriği laktoferrinler, immünooglobulinler ve laktoperoksidaz gibi etmenler ile diğer sütlerden farklıdır (Jilo, 2016). Deve sütünde laktoz miktarı %4.37, kül miktarı %0.87, protein miktarı %2.55, kuru madde miktarı %10.42, pH 6.47, süt yağı %2.72 organik asitler bakımından %0.19 ve yoğunluğu ise 1.026 g/cm<sup>3</sup> olduğu tespit edilmiştir (İsmaili ve ark., 2019). Deve sütü protein ve azot içeriği bakımından inek sütüne benzerdir. Deve sütündeki kazeinin azot içeriği %71-79 arasında değişkenlik gösterirken, inek sütünde ise deve sütünden biraz daha fazla olan %77-82 aralığında değişmektedir. Deve sütünde kazeinlerin parçacık boyutunun inek sütündekilere kıyasla büyük olduğu tespit edilmiştir (Alawi ve Laleye, 2008).

Deve sütünden elde edilen yağ, trigliserit yapısında olup %98 seviyelerine kadar lipid içermektedir. Deve sütünde bulunan yağ miktarı %1.7 ile %4.2 aralığındadır (Haasmann, 1998). Deve sütü yağı üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen verilerin çoğunluğu yağ asitleri kompozisyonu üzerine, bunlardan daha az olmak üzere fosfolipitleri ve yağ kürecikleri olarak bulunmaktadır. Süt yağı globüllerinin membran kısmında yer alan fosfolipitler süt lipitlerinin küçük ancak gerekli bir kısmıdır. Deve sütü yağının membran fosfolipitlerinin içeriğinde %35.5 fosfatidiletanolamin, %23 fosfatidilkolin ve %28 oranında sfingomyelin bulunmaktadır. Deve ve inek sütlerinin fosfolipitleri farklılık gösterdiği belirtilmiştir (Farah, 1996).

Yukarıda belirtilen literatür incelemeleri doğrultusunda, daha çok süt çeşitleri ve deve sütü ile ilgili belirli konularda araştırma yapılmış olup, spesifik olarak deve sütü yağı ile ilgili gerek teknolojik, gerekse besleyicilik açısından kapsamlı bir çalışma çok az sayıda belirlenmiştir. Bu nedenle yapmış olduğumuz bu çalışmanın amacı, deve sütü yağını, hayvansal yağ teknolojisi ve beslenme açısından araştırmak olmuştur.

## **2.MATERYAL ve METOTLAR**

### **2.1. Materyal**

Araştırmada kullanılan deve sütü, 2018-2019 yıllarında Denizli ilinin Sarayköy ilçesindeki bir deve çiftliğinden alınan *C. dromedarius* türü develerden sağılan 40 lt çiğ süt, +4°C sıcaklıkta muhafaza edilmiştir.

### **2.2. Metotlar**

#### **2.2.1. Süt Yağı Örneklerinin Hazırlanması**

Araştırmada 40 lt temin edilen deve sütü öncelikle, Bartech marka süt yağı ayırma seperatöründen geçirilerek, yağın süttten ayrılması sonucu oluşan krema aşağıdaki şekilde liyofilize edilerek, elde edilen deve sütü yağına methot kısmında belirtilen analizler uygulanmıştır.

#### **2.2.2. Liyofilizasyon**

Separatörde elde edilen deve sütü kreması örnekleri Telstar marka liyofilizatörde aşağıda belirtilen şartlarda ve sırayla liyofilizasyon işlemine tabi tutulmuş ve deve sütü yağı örnekleri elde edilmiştir.

Freezing: -45°C de 1 saat dondurma

Cool+Vacum: 48 saat

Heat shelves: 25°C 2 saat

#### **2.2.3. Deve Sütünün Yağ Miktarı**

Atamer (1993)'e göre yapılan bu analizde kaynak bütirometresine 5 gram numune tartılmıştır. Daha sonra üzerine, kadehin üzerine çıkacak seviyede yoğunluğu sülfürik asit eklenmiştir. 65 °C 'deki su banyosunda numunenin erimesi beklenmektedir. Ardından 1 ml amil alkol (C<sub>5</sub>H<sub>11</sub>OH) eklenmektedir. Bütirometre, skalasının 90 çizgisine kadar aynı sülfürik asitten ekleme yapılmıştır. Daha sonra gerber santrifüjde 10 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Santrifüj işlemi tamamlanınca skaladaki okunan değer doğrudan (%) yağ miktarı olarak tanımlanmıştır.

#### **2.2.4. Deve Sütü Yağında Yapılan Analizler**

Bu aşamada;serbest yağ asitliği, peroksit sayısı, iyot sayısı, kırılma indisi, viskozite, sabunlaşma sayısı, sabunlaşmayan madde sayısı, yağ asitleri kompozisyonu, sterol kompozisyonu, mineral madde kompozisyonu analizleri yapılmıştır.

##### **2.2.4.1. Serbest Yağ Asitliği**

Yağdaki serbest yağ asitliğinin NaOH ile nötralize edilmesinin ardından serbest yağ asitlerinin moleküler ağırlığı ile hesaplanan kütesidir. Serbest yağ asitliği tayini yapılırken %96'lık etanol, dietileter, fenolftalein, 0.1 N NaOH çözeltileri kullanılmıştır. 0.01 duyarlılıkla 10 g numune 250

ml'lik erlende tartılmıştır. Ardından erlen içerisine 50 ml etanollü dietileter çözücüsü ile birlikte berrak bir görüntü oluşturana dek karıştırılmıştır. Hazırlanan bu çözeltiye 2-3 damla fenolftalein damlatılıp 0.1 N NaOH çözeltisi ile titrasyon işlemi yapılmıştır. Elde edilen veriler ile aşağıdaki formül kullanılarak serbest yağ asitliği hesaplanmıştır. (Nas ve ark., 2001)

$$\text{Serbest Yağ Asitleri (S.Y.A.) \%} = \frac{V \times N \times M \times 100}{m} \quad (2.1)$$

V= Sarf edilen NaOH'ın hacmi,

N= NaOH'ın normalitesi

m= Tartılan numune miktarı (gram)

M= Asitliği hesaplanacak yağ asidinin molekül ağırlığı,

M= (Oleik asit insinden) = 2,82 sabit değer

#### 2.2.4.2. Peroksit Sayısı Analizi

Yağlar oksijen ile temas halindeyken, oksijen doymamış bağlar ile etkileşim haline girerek peroksitleri oluşturmaktadırlar. Peroksit sayısı bir kilogram yağ içerisinde bulunan mEq (miliiekivalent) aktif oksijen miktarıdır. Peroksit değeri yağların oksidasyon kapasitesinin bir belirleyicisidir. Peroksit sayısı analizi yapılırken, %10'luk KI (potasyum iyodür), nişasta indikatörü, asetik asit çözeltisi, kloroform ve 0,01 N sodyum tiyosülfat kullanılmıştır. Analiz sırasında; Deve sütü yağından 10 g yağ erlene alınmış olup üzerine 10 ml kloroform ilave edilmiştir. Ardından içerisine 15 ml asetik asit eklenip kısa bir süre çalkalandıktan sonra içerisine 1 ml potasyum iyodür eklenerek erlenin kapağı kapatılarak ışık almayan bir alana kapatılmıştır. Oda sıcaklığında ışık almayan bölgede 5 dakika bekleyen karışım içerisine 75 ml distile su eklenip ardından nişasta çözeltisinden 3 ml eklenmiştir. Bu şekilde serbest hale gelen iyot standart sodyum tiyosülfat çözeltisi ile titre edilmiştir. Sarfiyat miktarına bağlı olarak hesaplama yapılmıştır (Anonim, 1989).

$$\text{Peroksit Değeri (V1 - V0) / m x N x 1000} \quad (2.2)$$

VO = Şahit deneyindeki sodyum tiyosülfat sarfiyatı (ml)

VI = Numune deneyindeki sodyum tiyosülfat sarfiyatı (ml)

N = Sodyum tiyosülfat normalitesi

m = Tartılan numune miktarı (gram)

#### 2.2.4.3. İyot Sayısı Tayini

Yağın reaksiyonları tetiklemeyecek bir çözücü ile çözüldürülmesi sonrası belirli bir süre iyot çözeltisi ile reaksiyon vermesi ve ardından içeriğinde kalan iyot miktarının nişasta indükatörü eşliğinde sodyum tiyosülfat çözeltisi ile

titrasyonu sonucu tespiti ilkesine dayanmaktadır. Analizin yapım aşamasında ilk önce 1 g yağ numunesi erlenmayere alındıktan sonra içerisine 15 ml karbontetraklorür koyulup çalkala işlemi yapılmıştır. Ardından 25 ml wijs çözeltisi ilave edilerek 1 saat karanlık ortamda bekletilmiştir. Bir saat sonrasında içerisine 20 ml potasyum iyodür çözeltisi ve 150 ml saf su eklenmiş ardından 1 ml nişasta çözeltisi ilave edilmiş ve sonra 0.1 N sodyum tiyosülfat çözeltisi ile titrasyon işlemi yapılmıştır. Titrasyon renk berraklaşana kadar devam ettirilmiş ve sarfiyat kaydedilmiştir. Aynı işlemler şahit numune için de yağsız olarak yapılmıştır (Karaman, 2012).

$$\dot{I}S = ((V2 - V1)/m) \times 1.269 \quad (2.3)$$

V2 = şahit deneme için harcanan 0.1 N sodyum tiyosülfat çözeltisi (ml)

V1 = örnek için harcanan 0.1 N sodyum tiyosülfat çözeltisi (ml)

m = örnek ağırlığı (g)

#### 2.2.4.4. Kırılma İndisi

Kırılma indisi boşlukta kırılan ışık indisinin, bulunması istenilen ortamdaki hızına oranıdır. Kırılma indisi genelde beyaz ışıkla ölçülür ve işaret olarak  $n_D$  20 kullanılır. Bu işareten, kırılma indisini, D sodyumun D ışığına göre verildiğini, tayinin 20°C da yapıldığını gösterir. Deve sütü yağı numunelerinin kırılma indisleri Abbe refraktometresi ile test edilmiştir. Bu amaçla spatula yardımıyla alınan deve sütü yağı numuneleri, refraktometrenin prizması üzerine dökülmüş ve 20°C okuma yapılmıştır (Anonim, 2012).

#### 2.2.4.5. Viskozite

Araştırmamızda elde edilen deve sütü yağı numunelerinden 50 ml kadar alınarak ayrı ayrı viskozite krozelerine koyulmuş ve Vibro (SV-10) viskozimetresiyle 40°C sıcaklıkta 30 hz titreşim frekansında viskoziteleri ölçülmüştür. Ölçümler, her bir tür ve varyetede ki deve sütü yağı örneklerinde üç farklı okuma yapılarak gerçekleştirilmiştir (Tekinşen ve Nizamlıoğlu, 2001).

#### 2.2.4.6. Sabunlaşma Sayısı Analizi

Anonim (1971)' in Cd 30-94 standardı metodu kullanılmış olup elde edilen veriler standarttaki formül ile hesaplanmıştır (Anonim, 1971).

$$SS \text{ (mg KOH/g yağ)} = \frac{(V2 - V1) \times N \times 0,561}{m} \times 100 \quad (2.4)$$

V1: Örnek için harcanan 0,5 N HCl çözeltisi (ml)

V2: Şahit için harcanan 0,5 N HCl çözeltisi (ml)

N: HCl' nin normalitesi

m: örnek ağırlığı (g)

#### 2.2.4.7. Sabunlaşmayan Madde Sayısı

TS 7570 EN ISO 3596 sayılı standartta göre, her deve sütü yağı numunesinden 2 ml alınarak üzerine 25 ml etanol ve 1.5 ml KOH çözeltisi ilave edilmiştir. Erlene geri soğutucu takılarak, bir saat süre ile yavaşça kaynatılarak sabunlaştırılması sağlanmıştır. Sulu ve etanollü faz sabunlaşmada kullanılmış olan erlene, eter ekstratı ise içinde 20 ml su bulunan farklı ikinci bir ayırma hunisine alınmıştır. Birinci ayırma hunisinin ucu, eter ile yıkanmıştır ve eter, ikinci ayırma hunisine alınır. Sabun çözeltisi bu şekilde 50 ml eter ile iki defa daha aynı şekilde ekstrakte edilmesinin ardından eter ekstratı ayırma hunisine alınmıştır. 20 ml su ve eter ekstratları hunide toplanmıştır, fazlarına ayrıldıktan sonra su fazı ayrılmış ve eter fazı iki defa 20 ml su ile yıkanmıştır. Eter fazı daha sonra 0.5 N KOH çözeltisi ve arkasından 20 ml su ile çalkalanmıştır, bu işlem üç defa tekrar edilmiştir. Ayırma hunisindeki eterli çözelti ağzı geniş erlene alınır, huni içerisinde 5 ml eter kalıncaya kadar buharlaştırılmıştır. Sıcaklığı 100°C ayarlanmış etüvde kurutulmuştur. Erlenin içindekiler 2 ml eter ile çözülerek ve fenoltalein ilaveli 10 ml etanol eklenerek, 0.1 N alkollü NaOH çözeltisi ile titrasyon yapılmıştır. Harcama miktarına göre aşağıdaki formül ile hesaplaması yapılmıştır (Anonim, 2002).

$$\text{Sabunlaşmayan maddeler } \%, (m/m) = \frac{(M2-M1) \times 0,0282}{m} \times 100 \quad (2.5)$$

m: Numunenin kütlesi, g

M1: Buharlaştırma kabının kütlesi, g

M2: Buharlaştırma kabı ve bakiyenin kütlesi, g

#### 2.2.4.8. Yağ Asitleri ve Kompozisyonu Analizi

Yağ asitleri analizinde kullanılan en iyi yöntem olarak gaz kromatografisi bilinmektedir. Gaz kromatografisinde belirli sıcaklık ve taşıyıcı gaz akışı hızında, bir sıvı fazın içerisinde gazların çözünürlük farkları nedeniyle ayrışmalarının tespitine dayanmaktadır. Gaz kromatografisinde taşıyıcı gaz, enjeksiyon bloğu, fırın, detektör ve data sistemi bulunmaktadır. Fırın kısmındaki kapak kapatılarak kuru hava ve hidrojen gazlarının 5 bar düzeyinde açık vaziyette bulunduğundan emin olduktan sonra cihaz analize hazır sıcaklık değerlerine setlenmiştir. Numune cihaza verilmeden önce 5 kez n-heptane ile enjektör temizliği yapılmıştır. Temizlenen enjektör içerisine 1 mikro litre numune alınıp cihaz hazır konumdayken tek seferde verilmiş olup analiz başlanması için cihaza start verilmiştir. Baseline üzerinden kromatogram akışı ve pikler takip edilmiştir. 52.5 dakika sonrasında sonuç alınmış olup pikler üzerinde

tanımlamalar yapılmıştır. Çıkan sonuçlar tablo halinde yüzdesel verilerle elde edilmiştir. Gaz kromatografisinin çalışma şartları aşağıda verilmiştir (Anonim, 2003).

Gaz kromatografi cihazının çalışma koşulları aşağıda verildiği gibidir:

Cihaz: SHIMADZU GC 2025

Sabit Faz: %10'luk DEGS

Destek madde: Chromosorb W(AW-DMCS) (60-80 mesh)

Dedektör: Alev iyonlaştırılmalı dedektör

Sıcaklıklar

Kolon: 180°C

Enjeksiyon 200°C

Dedektör: 200°C

Akış hızları

Taşıyıcı gaz: (N<sub>2</sub>) : 30ml/dak

Yanıcı gaz: (H<sub>2</sub>): 28 ml/dak.

Kuru hava 220 ml/dak.

Enjeksiyon miktarları: 1µl

#### **2.2.4.9. Sterol Analizi**

Araştırma için kullandığımız deve sütü yağının sterol analizini yapabilmek için, 2N KOH ve standart olarak 1000 ppm 5-cholesterol-3 ol önceden hazırlanmıştır. 0.5 g deve sütü yağı numunesinin üzerine 5 ml KOH ve 1 ml internal standart 5-cholesterol-3 ol eklenmiştir. Oluşturulan bu çözeltiyi 80°C'de su banyosunda 15 dakikalık periyotlar ile karıştırmak suretiyle 1 saat bekletilmiştir. İşlem sonrası 5 ml su ilave edilip oda sıcaklığı derecesine kadar soğuması beklenmiştir. Soğuduktan sonra üzerine 5 ml hexane ilave edilerek karıştırmaya devam edilmiştir. İki ayrı faz oluşumu gözlenince üstteki faz ayrı bir kaba alınıp azot gazı ile hexanı uçurma işlemi yapılmıştır. Diğer fazın üzerine 5 ml su koyulup vorteks ile karıştırılmıştır. Aynı işlem 3 defa daha 5 ml hexane koyularak tekrarlanmıştır. Ardından hexane 10 ml'ye ulaşıncaya kadar uçurulur ve numune 10 ml'lik balon jöjelere aktarılır. Örneklerde su kalma ihtimaline karşı sodyum sülfat kullanılmıştır. Silindendirme çözeltisi için 4 birim Bistrimethylsilyl-trifluoroacefanide ve 1 birim cholorotimethylsilane karıştırılmıştır. Son işlem basamağı olarak 10 ml'lik balon jöjelere hazırlanmış numunelerin üzerine 250 ml silindendirme çözeltisi ve 250 ml pyridin katılmıştır. Karıştırma işleminin ardından 60°C etüvde 15 dk. bekletilmiş ve sonrasında GC' ye verilmiştir (Lechner ve ark., 1999).

Gaz kromatografi cihazının çalışma koşulları aşağıda verildiği gibidir:

Cihaz: SHIMADZU GC 2025

Dedektör: Alev iyonlaştırılmalı dedektör

Taşıyıcı gaz: Azot

Akış hızı: 0,80 ml/dk

Split oranı: 50:0

Enjeksiyon bloğu sıcaklığı: 280°C

Kolon sıcaklığı: 260°C

Dedektör sıcaklığı: 290°C

Enjeksiyon hacmi: 1 µl

#### 2.2.4.10. Mineral Madde Analizi

Deve sütü yağından alınan 0.5 ve 1 ml alınan numuneler mineral madde tayin tüpleri içerisinde 15 ml saf  $\text{NH}_3$  ve 2 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  (%30 w/v) ile ön yakma işlemi yapılmıştır. Ön yakma işleminin ardından bu örnekler mikrodalga içerisinde 210°C'de yakılmıştır. Bu işlemlerin ardından numuneler whatman no 42 filtre kâğıdı ile filtrelenmiştir. Elde edilen filtratlar 50ml'lik tüpler içerisinde ICP-AES analiz edilmiştir. Örneklerin mineral madde içeriği standart konsantrasyona sahip, bilinen numunelere göre okunmuştur (Skujins, 1998).

#### 2.2.4.11. İstatistiksel Analiz

Araştırma sonucunda elde edilen veriler, SPSS (Statistical Package for Social Sciences) for Windows 22.0 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Ortalama standart sapma, tanımlayıcı istatistiksel yöntemleri olarak verilerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Püskülcü ve İkiz, 1998).

### 3.BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, deve sütü yağının fiziko-kimyasal özellikleri; serbest yağ asitliği, peroksit sayısı, iyot sayısı, kırılma indisi, viskozite, sabunlaşma sayısı, sabunlaşmayan madde sayısı, yağ asitleri kompozisyonu, sterol kompozisyonu, mineral madde kompozisyonu incelenmiştir.

**Tablo 1.** *Deve sütü yağının fiziko-kimyasal özellikler*

	Süt Yağı (%)	Serbest Yağ Asitliği (%)	Peroksit Sayısı (meqO <sub>2</sub> /kg)	İyot Sayısı	Kırılma İndisi (nD)	Viskozite (mPa)	Sabunlaşma Sayısı (mgKOH/g)	Sabunlaşmayan Madde Miktarı (g/kg)
Deve Sütü Yağı	3.33 ±0.30	2.70 ±0.24	0 ±0.00	31.53 ±0.29	1.3626 ±0.002	16.50 ±0.30	174.80 ±0.95	0.34 ±0.06



Bu doğrultuda Tablo 1' de görüldüğü üzere; *C. dromedarius* türü Hecim devesi sütü yağının fizikokimyasal özellikleri incelenmek üzere yapılan, sütteki yağ miktarı, serbest yağ asitliği, peroksit sayısı, iyot sayısı, kırılma indisi, viskozite, sabunlaşma sayısı, sabunlaşmayan madde sayısı sonuçları sırasıyla; %3.33, % 2.7, 0 meq O<sub>2</sub>/kg, 31.53 I<sub>2</sub>, 1.3626 n<sub>D</sub>, 16.5 mPa, 174.8 mgKOH/g, 0.34 g/kg olarak tespit edilmiştir.

Qureshi (2018) yapmış olduğu çalışmalarda deve sütü içerisinde %3.5 oranında yağ bulunduğunu bildirmiş olup, deve sütündeki yağ oranının bu çalışma bulguları ile birbirine yakın olduğu görülmekte olup literatüre göre Karakoç ve ark., (2013) tarafından yapılan çalışmada inek sütlerinde % yağ miktarlarının %3.64-4.4 aralığında olduğu bildirilmiş ve çalışmada deve sütündeki % yağ miktarının inek sütüne oranla daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Sabahelkhier vd. (2012) yaptığı çalışmada çeşitli sütlerdeki yağ oranlarını; keçi sütünde %3.9, inek sütünde %3.75, koyun sütünde %6.9, olarak saptamıştır. Buna göre yapılan çalışmalarda deve sütünde ise % yağ oranı %3.33 olarak tespit edilmiş olup koyun inek ve keçi sütünden daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Irklara bağlı olarak sütlerin bileşimindeki yağ oranlarında farklılık bulunmaktadır. Genellikle süt verimi yüksek olan ineklerde yağ oranı diğerlerine kıyasla daha düşüktür. Düzenli periyotlarda süt sağımı yapılmadığı takdirde sütteki yağ miktarı çok düşük seviyelerde çıkmaktadır (Tekinşen ve Nizamlıoğlu, 2001).

İnek sütü yağında yapılan fizikokimyasal özelliklerinin araştırmalar sonucu değerlerine bakıldığı zaman Hanus ve ark., (2008)'in yaptığı çalışmalarda inek sütü yağındaki serbest yağ asitliği %0.61 olduğu tespit edilmiştir. Bu araştırmada deve sütü yağının serbest yağ asitliğinin inek sütü yağının serbest yağ asitliğinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatüre göre Mansson (2008) tarafından yapılan çalışmada inek sütü yağının serbest yağ asitliğinin %0.1 olduğu bildirilmiştir. İnek sütü yağındaki serbest yağ asitliği, analiz sonuçlarına göre deve sütü yağından düşük olduğu tespit edilmiştir. Serbest yağ asitliği sütte aroma oluşumunda önemli rol oynamakla beraber bu değer yükselmesi süt yağında acılaşmaya neden olmaktadır (Tekinşen ve Nizamlıoğlu, 2001).

İnek sütü yağında (Kurdal, 1987)'nin yapmış olduğu çalışmada peroksit sayısı 0.98 meq O<sub>2</sub>/kg olduğu bildirilmiş olup, yapılan bu çalışmada deve sütü yağının peroksit sayısının inek sütünden düşük olduğu tespit edilmiştir. Peroksidaz enzimi sütte doğal olarak bulunmakla beraber 78°C'de 15 saniyede inaktif hale gelmektedir. Bu nedenler işletmeye gelen sütlerin kaynatılmış olup olmadığına bakılmaktadır (Hecer, 2010).

İnek sütü yağında (Kurdal, 1987) yapmış olduğu çalışmalarda iyot sayısı 32.39 I<sub>2</sub> olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmada deve sütü yağında iyot sayısı 31.53 I<sub>2</sub> olduğu tespit edilmiştir. İnek sütü ile karşılaştırıldığında iyot sayısı değerinin deve sütünde daha düşük seviyede olduğu tespit

edilmiştir. Literatüre göre (Kahyaoğlu ve Çakmakçı, 2014) tarafından yapılan çalışmada inek sütü yağının iyot sayısı sonucunun 32.36 olduğu bildirilmiştir. İnek sütü yağındaki iyot sayısı değerinin deve sütü yağındaki değerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İyot değeri yağların doymamışlık derecesinin bir ölçütü olmakla beraber iyot değeri ne kadar yüksek ise mevcut yağ asitlerinin içeriğinde bulunan karbon atomları arasındaki çift bağ da o kadar fazladır. İyot sayısı yağların karakterizasyonu yanında lipit oksidasyon düzeyinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Yetim ve Kesmen, 2012).

Literatüre göre; Tekinşen ve Nizamlioğlu (2001) tarafından yapılan çalışmada inek sütü yağının kırılma indisi sonucunun 1.4538-1.4578  $n_D$  aralığında olduğu bildirilmiştir. Deve sütü yağındaki kırılma indisinin inek sütü yağına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. İnek sütü yağında Kahyaoğlu ve Çakmakçı (2014)'nün yapmış olduğu çalışmalarda kırılma indisi değerinin 1.4567  $n_D$  olduğu bildirilmiş olup, bu değer deve sütünde ise yapılan çalışmada 1.3626 nD olduğu tespit edilmiştir. İnek sütü yağı ve deve sütü yağı karşılaştırıldığında inek sütü yağının kırılma indisinin deve sütü yağından fazla olduğu tespit edilmiştir. Süt yağının bu değeri içeriğinde kısa zincirli yağ asitleri ile doymuş gliseridlerin fazla oranda bulunmasından kaynaklanmaktadır (Tekinşen ve Nizamlioğlu, 2001).

İnek sütü yağında Büyükbeşe (2014)'nin yapmış olduğu çalışmalarda viskozite değerinin 40°C'de 29.4 mPa olduğu bildirilmiş olup, yapılan çalışmalarda deve sütü yağındaki viskozite değerinin 30 Hz titreşim frekansında 40°C'de 16.5 mPa olduğu ve inek sütü yağındaki bulgulara göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

İnek sütü yağında sabunlaşma sayısı tayini için Metin (2014) tarafından yapılan çalışmalarda 225-230 mgKOH/gr olarak bildirilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda deve sütü yağındaki sabunlaşma sayısı 174.8 mgKOH/g olarak tespit edilmiş olup inek sütü yağına göre daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Sabunlaşma sayısı süt yağlarında mevcut yağ asitlerinin ortalama molekül ağırlıkları hakkında bilgi vermektedir. Yağ asitlerinin molekül ağırlığı büyükse sabunlaşma sayısı daha küçük olduğu bilinmektedir (Tekinşen ve Nizamlioğlu, 2001).

**Tablo 2.** Deve sütü yağı yağ asitleri kompozisyonu

Yağ Asidi	%
Bütirik Asit (C4:0)	0.07±0.01
Kaproik Asit (C6:0)	0.08±0.01
Kaprilik Asit (C8:0)	0.12±0.03
Kaprik Asit (C10:0)	0.02±0.01
Laurik Asit (C12:0)	0.14±0.09
Miristik Asit (C14:0)	11.27±0.95

Pentadekanoik Asit (C15:0)	0.02±0.01
Palmitik Asit (C16:0)	31.23±1.05
Heptadekanoik Asit (C17:0)	0.02±0.01
Stearik Asit (C18:0)	18.75±0.30
Miristoleik Asit (C14:1)	2.03± 0.61
Palmitoleik Asit (C16:1)	0.87±0.04
Oleik Asit (C18:1)	30.74±1.42
Linoleik Asit (C18:2)	2.03±0.28
Araşidik Asit (C20:0)	0.01± 0.01

Tablo 2' de görüldüğü üzere; *C. dromedarius* türü Hecin devesi sütü yağının, yağ asitleri kompozisyonu verilmiştir. Elbir (2012) tarafından yapılan çalışmada inek sütü yağının doymuş yağ asitleri sonuçları; bütirik asit (C4:0) oranının %2.1-2.7, kaproik asit (C6:0) oranının %1.4-2.0, kaprilik asit(C8:0) oranının %0.9-1.3, kaprik asit (C10:0) oranının %2.1-2.2, laurik asit(C12:0) oranının %2.8-3.5, miristik asit(C14:0) oranının %8.8-12.3, pentadekanoik asit(C15:0) oranının %0.9-1.1, palmitik asit(C16:0) oranının %26.7-34.6, heptadekanoik asit(C17:0) oranının %0.5-0.8, stearik asit(C:18:0) oranının %7.0-10.5 olduğu bildirilmiş olup, bütirik asit(C4:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, kaproik asit (C6:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, kaprilik asit(C8:0) oranının inek sütü yağı ve deve sütü yağında birbirine yakın değerde olduğu, kaprik asit (C10:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, laurik asit(C12:0) ) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, miristik asit(C14:0) oranının inek sütü yağı ve deve sütü yağında birbirine yakın değerde olduğu, pentadekanoik asit(C15:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, palmitik asit(C16:0) oranının inek sütü yağı ve deve sütü yağında birbirine yakın değerde olduğu, heptadekanoik asit(C17:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha fazla olduğu, stearik asit(C:18:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Erbir (2012)'nin süt yağının mevsimlere göre kristallenme davranışları üzerine yaptığı çalışmada inek sütü yağının doymamış yağ asitleri sonuçları incelendiğinde, miristoleik asit(C14:1) oranının inek sütü yağı ve deve sütü yağında birbirine yakın değerde olduğu, palmitoleik asit(C16:1) oranının inek sütü yağı ve deve sütü yağında birbirine yakın değerde olduğu, oleik asit oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha düşük olduğu, linoleik asit(C18:2) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha yüksek olduğu, araşidik asit(C20:0) oranının inek sütü yağında, deve sütü yağından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 3.** *Deve sütü yağı sterol kompozisyonu*

<b>Sterol Kompozisyonu</b>	<b>%</b>
Kolesterol	95.95±1.05
Kampesterol	0.48±0.09
Toplam Betasitosterol	1.41±0.22
Delta 7 Stigmasterol	0.27±0.04
Delta 7 Avenasterol	0.18±0.04
Stigmasterol	0.58±0.13
Brasikasterol	1.13±0.19

Tablo 3' de görüldüğü üzere; *C. dromedarius* türü Hec'in devesi sütü yağının, sterol kompozisyonu verilmiştir. Duman (2019) tarafından yapılan çalışmada manda sütü yağının sterol kompozisyonu sonuçları; kolesterol oranı %96.66, kampesterol oranı %0.37, toplam betasitosterol oranı %0.65, delta 7 stigmasterol oranı %0.10, delta 7 avenasterol oranı %0.10, stigmasterol oranı %0.47, brasikasterol oranı %1.65 manda sütü yağının sterol kompozisyonu sonuçları incelendiğinde, kolesterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha düşük olduğu, kampesterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha yüksek olduğu, toplam betasitosterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha yüksek olduğu, delta 7 stigmasterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha yüksek olduğu, delta 7 avenasterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha yüksek olduğu, stigmasterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha yüksek olduğu, brasikasterol oranının deve sütü yağında, manda sütü yağından daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4.** *Deve sütü yağının mineral madde miktarı*

<b>Mineral Madde</b>	<b>ppm</b>
Na	30.05
Mg	1.20
Al	0.45
Si	69.33
P	101.55
K	22.78
Ca	2.84
Cr	0.016
Ni	0.02
Zn	1.86
Se	0.02
In	0.01
Sn	4.42
Ba	0.04
Pt	0.00
Sr	0.02
Cd	0.42

Tablo 4' de görüldüğü üzere; *C. dromedarius* türü Hecin deveşi sütü yağının, mineral madde kompozisyonu verilmiştir. Yapılan çalışmada mineral madde analizi sonuçları incelendiğinde, Sodyum (Na) 30.05 ppm, magnezyum (Mg) 1.20 ppm, Alüminyum (Al) 0.45ppm, Silisyum (Si) 69.33ppm, fosfor (P) 101.55ppm, fosfor (K) 22.78ppm, kalsiyum (Ca) 2.84ppm, krom (Cr) 0.016ppm, nikel (Ni) 0.02ppm, çinko (Zn) 1.86ppm, selenyum (Se) 0.02ppm, stronsiyum (Sr) 0.02 ppm, kadmiyum (Cd) 0.42 ppm, indiyum (In) 0.01ppm, Kalay (Sn) 4.42ppm, Baryum (Ba) 0.04 ppm değerleri tespit edilmiştir. Süt yağlarının mineral madde kompozisyonu incelendiğinde fosfor içeriği bakımından vücut dokuları ve sıvılarında bulunmakla beraber birçok biyolojik molekülün zorunlu bileşeni olduğu belirtilmiştir. Magnezyumun ise, protein ve nükleik asit metabolizması ile enzim sistemlerinde kofaktör olarak görev yaptığı ve kalsiyum ile birlikte kas sisteminde görev aldığı ve demir mineralinin de, hemoglobinin, miyoglobinin ve diğer protein yapılarında bulunduğu bildirilmiştir (Çelik ve ark., 2001).

#### 4.SONUÇ

Sonuç olarak; Deve sütü yağının, hayvansal yağ teknolojisi açısından, fiziko-kimyasal parametrelerinin uygun olduğu, yağ asitleri kompozisyonu bakımından zengin ve iyi bir yağ kaynağı olduğu, sterol kompozisyonu yönüyle deve sütü yağı'nın kolesterol düzeyinin inek sütünden düşük olduğu ve mineral madde kompozisyonu bakımından Ca, P, K ve Na yönünden zengin olduğu belirlenmiş olup, serbest yağ asitliği değeri ve Na minerali bakımından tüketimine dikkat edilmesi ve bu konuda yeni ürünler üzerine ar-ge çalışmalarının yapılması tavsiye edilmektedir.

#### Teşekkür

Yazarlar bu çalışmanın AKÜ BAP 18.Fen.Bil.35 nolu proje ile desteklenmesinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne ve desteklerinden dolayı Dr. Sabire Duman'a teşekkürlerini sunmaktadır.

**KAYNAKLAR**

- Alawi, A. Laleye, L. (2008). Characterization of camel milk protein isolates as nutraceutical and functional Ingredients, Sultan Qaboos University and United Arab Emirates University, Collaborative Research Project Squ/Uaeu, 15p, Oman.
- Anonim. (2002). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 17th Edition, Revision 1, Metals and Other Elements, Chapter 9, 16-19, Maryland.
- Anonim. (2012). Refraktometre, Kimya Teknolojisi, Milli Eğitim Bakanlığı, 524KI0327, 5-10, Ankara.
- Anonim. (2013). FAO. Dairy Market Review, Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
- Anonim. (1971). AOCS. American Oil Chemists Society Saponifiable Number in Oil, Official Method Cd, 93, V. 1, 8-53.
- Anonim. (1989). AOCS. The Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemist's Society, AOCS Press, Method Ti Cd, 8-53.
- Anonim. (2002). TS 7570 EN ISO 3596. Hayvansal ve Bitkisel Katı ve Sıvı Yağlar, Sabunlaşmayan Madde Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim. (2003). AOCS. The Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemist's Society, AOCS Press, Champaign, IL.
- Atamer, M. (1993). Tereyağı Teknolojisi Uygulama Kılavuzu. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, 16-27, Ankara.
- Büyükbeşe, D. (2014). Süt Yağı ve Fraksiyonlarının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 99s.
- Çelik, Ş., Bakırcı, İ., Özdemir, C., Özdemir, S. (2001). Erzurum Ovası'nda Yetiştirilen Mandalara Ait Sütlerin Fizikokimyasal Özellikler Üzerine Bir Araştırma, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fak. Dergisi. 32(1), 77-82. Erzurum.
- Duman, S. (2019). Manda Kaymağı ve Yağının Bileşimi Üzerine Laktasyon Periyodunun Etkisi, TC. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı. 80-83, Konya.
- Elbir, T. (2012). Crystallization Behaviors of Milk Fat By Seasons Food Engineering University of Gaziantep, 3s, Gaziantep.
- Farah, Z. (1996). Camel Milk Properties and Products Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management CH -9000 St. Gallen, Switzerland.
- Haasmann, S. (1998). Analytical Characterization of Camel Meat and Milk Fat a Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Chemistry, Brunei University. 7-9, Brunei.

- Hanus, O., Vegricht, J., Frelich, J., Macek, A., Bjelka, M., Louda, F., Janu, L. (2008). Analysis of Raw Cow Milk Quality According to Free Fatty Acid Contents in the Czech Republic, Agricultural Faculty, South Bohemian University in Budweis, 53, 17–30.
- Hecer, D. C., (2010). Gıda Analizleri, Uludağ Üniversitesi, Karacabey Meslek Yüksek Okulu, Gıda Teknolojisi, 3. Baskı, 45-47, Bursa.
- İsmaili, M., Saidi, A., Zahar, M., Hamama, A., & Ezzaier, R. (2019). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 17–21, Tunisia.
- Jilo, K. (2016). Medicinal Values of Camel Milk. International Journal of Veterinary Science and Research. 2,18, 18-23, Ethiopia.
- Kahyaoğlu, D., Çakmakçı, S. (2014). Determination of the Adulteration of Butter with Margarine by Using Fat Constants Tarım Bilimleri Dergisi, Sayı No:22 1-8. Ankara.
- Karakoç, D., Çimen, M., Demir, N., Şos, C., Gökyer, H., Ablak, E., Kutlu, C. (2013). Ağustos ve Kasım Aylarında Batman İlinde Edilen Sütlerde Ekonomik Öneme Sahip Biyokimyasal Parametreler. Bilim ve Gençlik Dergisi. Cilt 1, Sayı 1, Issue 1, 101-105, Diyarbakır.
- Karaman, S. (2012). Yemeklik Yağ Teknolojisi Uygulama Dersi Modül-6 Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Kurdal, E. (1987). Erzurum İl Merkezinde Tüketime Sunulan Kahvaltılık Tereyağlarının Kimyasal ve Mikrobiyolojik Özellikleri Üzerinde Bir Araştırma Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Sayı: 5. 299-302, Bursa.
- Lechner, M., Reiter, B., Lorbeer, E., (1999). Determination of tocoferols and sterols in vegetable oils by solid phase extraction and subsequent capillary gas chromatographic analysis. J. Chrom. A., 857: 231-238.
- Ltsakalidou, E., Papadimitriou, K. (2016). Non-Bovine Milk and Milk Products Pages 81,116, ISBN: 9780128033616 Academic Press, 94-110, USA.
- Mansson, H. (2008). Fatty Acids in Bovine Milk Fat, Swedish Dairy Association, Lund,1-3, Sweden.
- Metin, M. (2014). Süt ve Mamulleri Analiz Yöntemleri Duyusal, Fiziksel ve Kimyasal Analizler 9. Baskı, 0-2
- Nas, S., Gökalp, H., Ünsal, M. (2001). Bitkisel Yağ Teknolojileri. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 298s, Denizli.
- Qureshi, A. (2018). Camel Milk- the Food Medicine Interface, Chairman, Professor, Department of Anatomy, University of Agriculture, Faisalabad, Ec Veterinary Science Editorial, 242-245, Pakistan.
- Püskülcü, H., İkiz, F. (1998). Introduction to statistic. Bornova: Bilgehan Press.
- Sabahelkhier, M. K., Faten, M. M., Omer, F. I. (2012). Comparative Determination of Biochemical Constituents Between Animals (Goat, Sheep, Cow and Camel) Milk with Human Milk, Department of Biochemistry and

Molecular Biology, Faculty of Science and Technology, Al-Neelain University, Khartoum, Research Journal of Recent Sciences. Volume 1,5, 69-71, Sudan.

Skujins, J. (1998). Handbook for ICP-AES (Varian-Vista). A short Guide to Vista Series ICP-AES Operation. Switzerland.

Taşdelen, E., Akkaya, S. (2012). Dünya ve Türkiye’de Süt Sektör İstatistikleri Ulusal Süt Konseyi, Basım 1, 12s, Ankara.

Tekinşen, C., Nizamlıoğlu, M. (2001). Süt Kimya, Besin Hijyeni ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Veterinerlik Fakültesi. Selçuk Üniversitesi yayımları ISBN :975-6652-11-X, 123-124, Konya.

Yetim, H., Kesmen, Z. (2012). Gıda Analizleri, Erciyes Üniversitesi, Yayın no:163, 81-111. Kayseri.





# Bölüm 8

## İNCE HAMMADDE İLE $Si_3N_4$ ÜRETİMİNDE GAZ BASINCININ TERMAL İLETKENLİĞE ETKİSİ



*Pınar UYAN*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, Bilecik. Türkiye E-mail:pinar.uyan@bilecik.edu.tr

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye



## 1. Giriş

$\text{Si}_3\text{N}_4$  seramikler, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğuna sahip yüksek sıcaklık yapısal seramiği olarak bilinmektedir (Riley, 2004). Üstün mekanik özellikleri yanında, yüksek termal iletkenliğe sahip olmaları ve elektriksel direnç, özelliklerinden dolayı elektrikli cihazlar için önemli bir kullanım oranına sahiptir  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramikler, elektrik gücünü dönüştürebilen ve etkin bir şekilde kontrol edebilen elektronik cihazlar, endüstriyel robotlar, hibrit motorlu araçlar ve gelişmiş elektrikli trenler gibi uygulama alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Hirao, Zhou, Hyuga, Ohji, & Kusano, 2012).

$\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerinin termal iletkenlik özelliğini etkileyen parametrelerin kontrolü ile endüstriyel uygulamalar için uygun özellikte malzeme geliştirilmesi ve termal iletkenlik mekanizmalarının açıklanması teknolojik ve bilimsel açıdan oldukça önemlidir. Sinterleme sonrası yapıda bulunan fazlar, bu fazların türü miktarı ve dağılımı termal iletkenliği etkilemektedir (Kitayama, Hirao, Toriyama, & Kanzaki, 2004). Malzemeyi yoğunlaştırmak için kullanılan teknolojilerdeki gelişmeler, başlangıç tozlarının özelliklerinin iyileştirilmesi ve etkili sinterleme ilavelerinin araştırılması, yüksek sıcaklıklarda sinterleme imkanları gibi faktörlerle, termal iletkenlik özelliğinin geliştirilmesi sağlanmıştır (Watari, 2001).

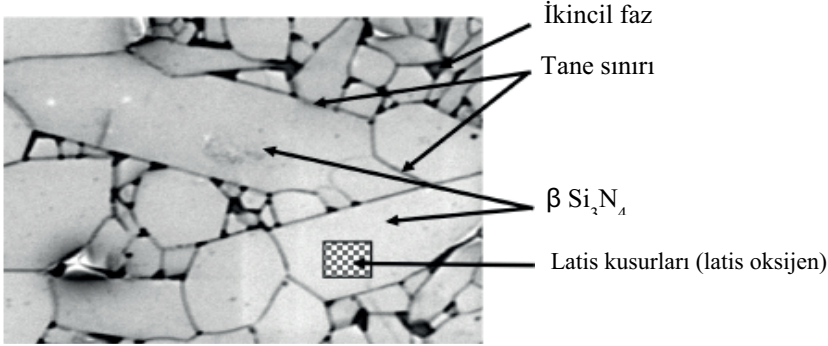
Si ve N arasındaki kuvvetli kovalent bağ nedeniyle yoğun malzeme elde etmek güçtür. Reaksiyon bağlama, basınçsız sinterleme, sıcak izostatik presleme (HIP) ve gaz basınçlı sinterleme (GPS) gibi sinterleme teknikleri geliştirilmiştir ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün yoğunluğunun artırılması için bu sinterleme teknikleri kullanılarak çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1980'lerden itibaren çeşitli toz sentezi metotlarının geliştirilmesi ve yüksek saflıkta (>%99) ve yüksek yüzey alanına sahip başlangıç tozları üretilmesi sonucu, yüksek yoğunluk değerlerine daha düşük sinterleme sıcaklıklarında ulaşılması mümkün olmuş ve termal iletkenlik arttırılmıştır (Watari, 2001)

GPS'te uygulanan yüksek  $\text{N}_2$  basıncı,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'de dekompozisyonu engeller ve yüksek sıcaklıklara çıkmaya imkan verir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla ince matris yapı içinde 2273 K'de GPS uygulaması ile 120 W/m.K gibi yüksek termal iletkenlikli  $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  üretilebilmiştir (Hirosaki, Okamoto, Ando, Munakata, & Akimune, 1996). Artan termal iletkenlik değerleri,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün yeni teknolojik uygulamalarının önünü açmaktadır (Zhou et al., 2015).

## 2. Silisyum Nitrür Seramiklerde Termal İletkenliği Etkileyen Parametreler

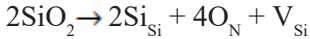
$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$  kristallerin teorik termal iletkenliğinin 200 W/(mK) veya daha yüksek olduğu tahmin edilmekteyse de (Haggerty & Lightfoot, 2008), ticari olarak elde edilebilen değerler oldukça düşüktür. Bunun nedenleri; Şekil

1.'de gösterildiği gibi, düşük termal iletkenlikli tane sınır fazları ve  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kristaldeki kafes kusurları gibi termal iletkenliği azaltan faktörlerdir. Şekil 1, Sinterlenmiş  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bünyenin şematik mikro yapısını göstermektedir (Hirao et al., 2012).



Şekil 1. Tipik Sinterlenmiş  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bünye mikroyapısı (Hirao et al., 2012)

$\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  kristallerdeki kafes kusurları fonon saçılımını artırır ve termal iletkenliği azaltır. Termal iletkenliği arttırmak için bu kusurları azaltmak önemlidir.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  kristaller içinde oksijen çözünmesi kristal latisteki silisyumun yerlerinde kusur (boşluk) üretir ve termal iletkenliği düşürür.



$\text{Si}_3\text{N}_4$  kristallerdeki latis oksijen miktarını azaltmak için en etkili yaklaşım, yüksek oksijen afiniteli sinterleme ilaveleri (nadir toprak oksitleri) kullanmak ve sıvı fazdaki azot/oksijen oranını arttırmaktır (Kitayama, Hirao, Tsuge, et al., 2004)(Hiroyuki, Kiyoshi, Mikito, Yukihiko, & Shuzo, 2001).

$\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün sinterleme koşulları, mikroyapıyı ve termal iletkenliği etkiler. Sinterleme ilaveleri tane sınırlarında kaldığı takdirde, termal iletkenliğin düşmesine neden olur (Hirosaki et al., 1996). GPS'te uygulanan yüksek  $\text{N}_2$  basıncı,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'de dekompozisyonu engeller ve böylece yüksek sıcaklıklara çıkmaya imkan verir. Ayrıca pişme sıcaklığının artmasıyla beraber ince matriks yapı içinde büyük çubuksu tanelerin oluşumu da sağlanır. Bunun sonucunda da termal iletkenlik artar (Hirosaki et al., 1996).

Gaz basınçlı sinterlemeyle yüksek termal iletkenlikli yoğun  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin üretiminde,  $1900^\circ\text{C}$ 'de 1 MPa azot gazı basıncı altında yalnızca  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  ilavesi kullanılarak  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  toz kompaktın GPS ile yoğun ve yüksek termal iletkenlikli seramiklerin üretimi rapor edilmiştir ve termal iletkenlik değerinin önemli ölçüde mikroyapıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir (Zhu, Zhou, Hirao, Ishigaki, & Sakka, 2010). Üretim koşullarının optimizasyonu ile mikroyapı ve mekanik özellikler geliştirilebilir. (Pullum & Lewis, 1996)(Zhu, Sakka, Zhou, & Hirao, 2006).

$\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerde sinterleme atmosferinin, taneler arası faz üzerinde etkisini inceleyen bir çalışmada, sinterleme atmosferinin özellikle

taneler arası faz üzerinde etkisi araştırılmıştır. Farklı gaz basınçlı sinterleme çevrimlerinden sonra farklı taneler arası fazlar tespit edilmiştir Taneler arası faz kristalizasyonunda, uygulanan gaza maruz kalma süresi ve sinterleme sonrası soğutma çevrimi kritik faktörler olarak tanımlanmıştır (Pullum & Lewis, 1996).

Neidhardt ve arakadaşları, GPS ile üretilen seramiklerde, azot atmosferinde grafit sinterleme potasının potansiyel redüksiyonu sonucu, bir oksijen/azot değişim derecesi bulmuşlardır. Taneler arası fazlar üzerine azot atmosferinin muhtemel atmosferik etkisi bu araştırmanın önemli bir ilgisi olup, çalışmada,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerde azot gazına maruz kalma uzunluğuna göre, oluşan taneler arası fazların değiştiği bulunmuştur. Her ne kadar her bir seramik numunede faz değişimi belirlenmese de farklı GPS çevrimlerine göre üretilen seramiklerde mevcut taneler arası fazlarda oksijen/azot oranlarında önemli değişim tespit edilmiştir (Pullum & Lewis, 1996).

Bu çalışmada,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin toz metalurjisi ile üretiminde oksit ilaveler kullanılarak hazırlanmış numunelere, farklı gaz basınçlarında sinterleme yapılarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelere ayrıntılı içyapı analizleri yapılarak, termal iletkenliğe, sinterleme parametrelerinden olan gaz basıncının etkisi incelenmiştir.

### 3. Üretim Çalışmaları ve Malzemeler

Çalışmada, reaktif  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  tozu (UBE Industries,Ltd.,Tokyo, Japonya) kullanılmıştır. Sinterleme ilavesi olarak MgO (Sigma Aldrich Chemical Co.),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (Sigma Aldrich Chemical Co.) ve  $\text{SiO}_2$  tozları (Sigma Aldrich Chemical Co.) kullanılmıştır.

#### 3.1. Kompozisyonların Hazırlanması

Numuneleri üretmek için hazırlanan kompozisyon, alkol kullanılarak eksenel değirmende (Fritsch-Pulverisette 5) karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan çamur, döner kurutucuda (Heidolph 4001) kurutulmuştur. Hazırlanan toz önce tek eksenli el presiyle (Alfa marka) şekillendirilmiştir soğuk izostatik pres (CIP-Stansted Fluid Power marka FPG2568/2569) ile numunelere basınç uygulanmıştır.

#### 3.2. Sinterleme

Numunelere gaz basınçlı sinterleme (GPS) yöntemi uygulanmıştır Gaz basınçlı sinterleme işlemleri, 100 bar basınç uygulanabilen (FCT-PPW 180/250-2-220-100SP) grafit ısıtıcılı fırında yapılmıştır. Sinterleme işlemi, sabit sıcaklıkta, 2 saat süre ve 22-50 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3. Karakterizasyon Çalışmaları

##### 3.3.1. XRD ile Fazların Analizi

Sinterlenmiş numunelerin içerdikleri fazlar hakkında bilgiye sahip olmak için X-ışını difraksiyon (XRD) tekniği kullanılmıştır. X-ışınları difraktometresi (Panalytical Empyrean) ile XRD çekimleri yapılmıştır.

### 3.3.2. Yoğunluk ölçümü

Hazırlanan numunelerin yoğunluk değerlerini tespit amacıyla sinterlenmiş numunelerin yığınsal yoğunluk ölçümü Arşimet, su ile yer değiştirme, prensibine göre yapılmıştır.

### 3.3.3. Mikroyapı karakterizasyonu

Başlangıç  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozlarının tane şekli ve tane boyutu incelemeleri SEM (Zeiss Supra 50 VP marka) geri yansıyan elektron görüntü modunda (BSE) yapılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin mikroyapı incelemeleri ise, SEM (Zeiss Supra 40 VP marka) ikincil elektron görüntü modunda (SE) yapılmıştır.

### 3.4. Termal Difüzyon Ölçümleri

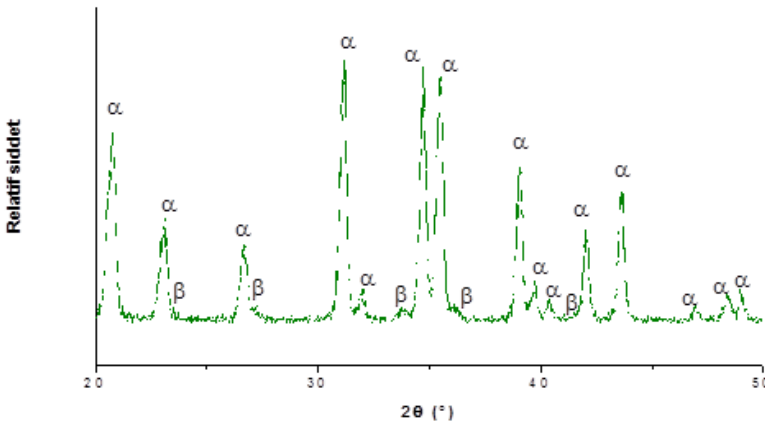
Termal difüzyon ölçümleri lazer-flaş cihazı (Netzsch LFA-457) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler için ölçümler oda sıcaklığından  $1000^\circ\text{C}$ 'ye kadar her bir sıcaklıkta en az üç kez yapılarak ortalama değerler alınmıştır. Sonuçların tutarlılıkları tespit edilerek, ortalama termal difüzyon değerlerinden, sıcaklık-termal difüzyon grafikleri çizilmiştir.

## 4. Sonuçlar

Sinterlemede uygulanan azot gaz basıncının, mikroyapı ve termal iletkenliğe etkisini incelemek amacıyla numuneler,  $1950^\circ\text{C}$  'de süre 2 saat, 22 bar ve 50 bar basınç altında sinterlenmişlerdir ve sinterleme basıncının termal difüzyon etkisi incelenmiştir.

### 4.1. Başlangıç Tozlarının Faz Karakterizasyon Sonuçları

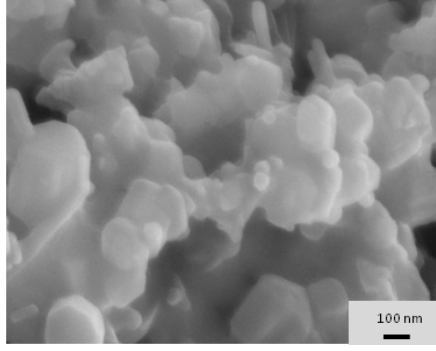
Deneyisel çalışmalarda kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  başlangıç tozunun XRD paterni, Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozunun XRD paterni.

## 4.2. Başlangıç Tozu Mikroyapı (Görüntü ve Kimyasal Analiz) Sonuçları

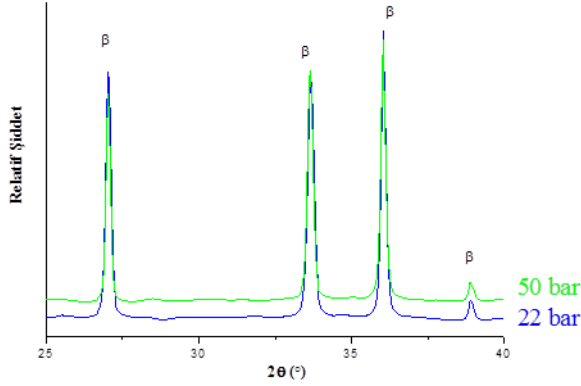
$\text{Si}_3\text{N}_4$  tozunun farklı büyütmeyle alınmış ikincil elektron SEM görüntüsü ise, Şekil 3’de verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde, tozun küresel yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozunun ikincil elektron SEM görüntüsü

## 4.3. Yoğunluk ve faz karakterizasyonu sonuçları

Numunelerin yoğunluk ve faz analizi sonuçları Tablo 1’de, XRD paternleri ise Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Numunelerin XRD paternleri

Tablo1. Numunelerin yoğunluk ve faz analizi sonuçları

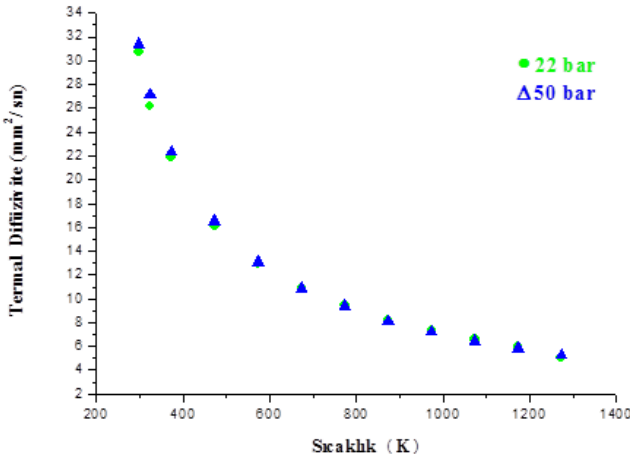
Sinterleme Koşu	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%A.P.	%A.K	XRD
22bar	3,20	0,43	5,36	-
50bar	3,21	0,32	5,90	-



Şekil 4’de verilmiş XRD paternlerinde görüldüğü gibi, farklı gaz basınçlarında sinterlenmiş numunelerde farklı ikincil faz oluşumu görülmemiştir. Azot gaz basıncının 22 bardan 50 bara artışı, bu sonucu değiştirmemiştir. 50 bar basınçta sinterlenmiş numunenin yoğunluğu, 22 bar basınçta sinterlenmiş numunelerden daha yüksektir. 22 bar basınçta sinterleme sonrası ağırlık kaybı, 50 bar basınçta sinterleme sonrası ağırlık kaybından daha düşüktür.

#### 4.4. Termal difüzyon sonuçları

Farklı basınçlarda sinterlenmiş numunelerin termal difüzyon sonuçları Tablo 2’de, termal difüzyon-sıcaklık eğrileri ise Şekil 5’de verilmiştir. Cp değeri 0,7 J/g.K olarak alınmıştır (Watari, Seki, & Ishizaki, 1989).



Şekil 5 22 ve 50 bar basınçta sinterlenmiş numunelerin termal difüzyon-sıcaklık eğrileri

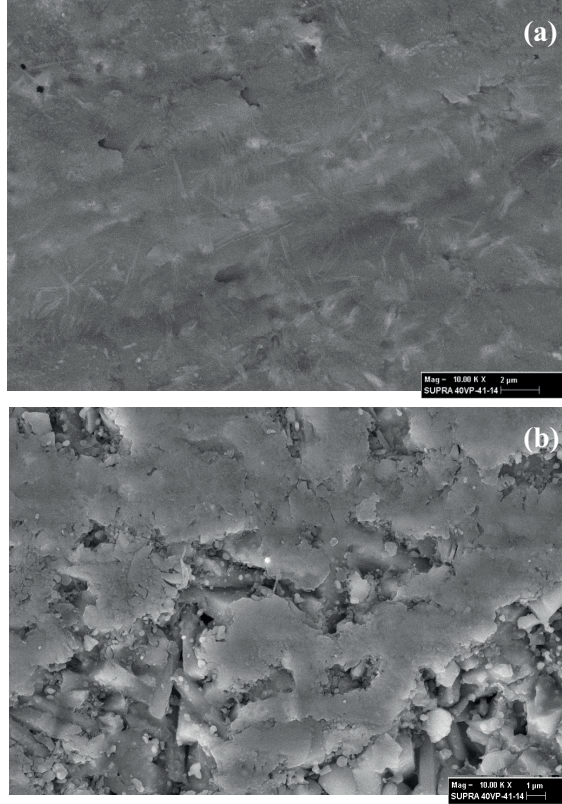
Tablo 2. 22 bar ve 50 bar basınçta sinterlenmiş numunelerin termal difüzyon ve termal iletkenlik sonuçları

Sinterleme Koşulu	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	%A.P.	%A.K.	Termal Difüzyon (mm <sup>2</sup> /sn)	Termal İletkenlik (W/m.K)
22bar	3,20	0,43	5,36	30,71	68,79
50bar	3,21	0,32	5,90	31,34	70,42

22 bar basınçta sinterlenmiş numunenin oda sıcaklığındaki termal difüzyon hızı, 50 bar azot basınçta sinterlenmiş numunelerden daha düşüktür. Azot gaz basıncının artışıyla, termal difüzyon hızında % 2,05 artış olmuştur.

#### 4.5.Mikroyapısal karakterizasyon sonuçları

22 ve 50 bar basınçta sinterlenmiş numunelerin görüntü analizleri Şekil 6'da verilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntülerine bakıldığında 50 bar basınçta sinterlenmiş numunede, daha büyük boyutlu uzamış tanelerin varlığı görülmektedir.



Şekil 6 a) 22 bar basınçta sinterlenmiş numunenin ve b) 50 bar basınçta sinterlenmiş numunenin ve SE görüntüsü

#### 5. Değerlendirme-Genel Sonuçlar

Malzemelerin performansları, yapı, özellik ve işlem parametreleri değiştirilerek incelenir. Bu çalışmada,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  tozu kullanılarak, gaz basınçlı sinterlemeyle malzeme üretiminde uygulanan süreç parametrelerinden sinterleme basıncıyla, tane sınır fazları gibi içyapıyı değiştiren parametrelerin,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerinin mikroyapı gelişimi ve termal iletkenlik özelliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Sinterlemede uygulanan azot gaz basıncının mikroyapı ve termal iletkenliğe etkisini incelemek amacıyla numuneler 1950 °C sıcaklıkta 2 saat süre, 22 bar ve 50 bar basınç uygulanarak sinterlenmişlerdir. Farklı gaz basınçlarında sinterleme sonrasında farklı

mikroyapı gelişimleri ve farklı termal difüzyon hızları elde edilmiştir. Azot gaz basıncı 22 bar uygulandığında mikroyapıda iğnemi uzun taneler gözlenmiş, kristalin fazlar görülmemiştir. 50 bar basınçta sinterlenmiş numunenin yoğunluğu, 22 bar azot basınçta sinterlenmiş numunelerden daha yüksektir. Azot gaz basıncının 22 bardan 50 bara artışıyla termal difüzyon hızı % 2.05 artmıştır.

## 6. Teşekkür

Bu çalışma, BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2016-01.BŞEÜ.06-03 numaralı ‘Elektronik Cihazlarda Kullanılan Altık Malzemesinin Özelliklerini Sağlayabilecek  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Malzemenin Geliştirilmesi’ konusu ile ilgili olup ilgili birim tarafından desteklenmiştir. Değerli görüş, fikir ve desteği için, Prof. Dr. Servet TURAN’a da teşekkürlerimi sunarım.

**KAYNAKLAR**

- Haggerty, J. S., & Lightfoot, A. (2008). Opportunities for Enhancing the Thermal Conductivities of SiC and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics Through Improved Processing. <https://doi.org/10.1002/9780470314715.ch52>
- Hirao, K., Zhou, Y., Hyuga, H., Ohji, T., & Kusano, D. (2012). High thermal conductivity silicon nitride ceramics. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 380–384. <https://doi.org/10.4191/kcers.2012.49.4.380>
- Hirosaki, N., Okamoto, Y., Ando, M., Munakata, F., & Akimune, Y. (1996). Thermal conductivity of gas-pressure-sintered silicon nitride. *Journal of the American Ceramic Society*, 79, 2978-2982. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1996.tb08721.x>
- Hiroiyuki, H., Kiyoshi, H., Mikito, K., Yukihiro, Y., & Shuzo, K. (2001). Effect of oxygen content on thermal conductivity of sintered silicon nitride. *Journal of the Ceramic Society of Japan*.
- Kitayama, M., Hirao, K., Toriyama, M., & Kanzaki, S. (2004). Thermal Conductivity of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: I, Effects of Various Microstructural Factors. *Journal of the American Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1999.tb02209.x>
- Kitayama, M., Hirao, K., Tsuge, A., Watari, K., Toriyama, M., & Kanzaki, S. (2004). Thermal Conductivity of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: II, Effect of Lattice Oxygen. *Journal of the American Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01501.x>
- Pullum, O. J., & Lewis, M. H. (1996). The Effect of Process Atmosphere on the Intergranular Phase in Silicon Nitride Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 16, 1271–1275. [https://doi.org/10.1016/0955-2219\(96\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0955-2219(96)00045-3)
- Riley, F. L. (2004). Silicon Nitride and Related Materials. *Journal of the American Ceramic Society*. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01182.x>
- Watari, K. (2001). High thermal conductivity non-oxide ceramics. *Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan*. <https://doi.org/10.2109/jcersj.109.S7>
- Watari, K., Seki, Y., & Ishizaki, K. (1989). Temperature dependence of thermal coefficients for HIPped silicon nitride. *Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan*, 97(2), 174–181. <https://doi.org/10.2109/jcersj.97.174>
- Zhou, Y., Hyuga, H., Kusano, D., Yoshizawa, Y. ichi, Ohji, T., & Hirao, K. (2015). Development of high-thermal-conductivity silicon nitride ceramics. *Journal of Asian Ceramic Societies*. <https://doi.org/10.1016/j.jascr.2015.03.003>

- Zhu, X., Sakka, Y., Zhou, Y., & Hirao, K. (2006). The effect of embedding conditions on the thermal conductivity of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Journal of the Ceramic Society of Japan*. <https://doi.org/10.2109/jcersj.114.1093>
- Zhu, X., Zhou, Y., Hirao, K., Ishigaki, T., & Sakka, Y. (2010). Potential use of only Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in producing dense Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics with high thermal conductivity by gas pressure sintering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 11. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/11/6/065001>

# Bölüm 9

## MIKROAKIŞKAN ÇİPLERİN BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI



*Ishak ERTUGRUL<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Ishak ERTUGRUL, Muş Alparslan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, i.ertugrul@alparslan.edu.tr



## 1- MİKROAKIŞKAN ÇİP TANIMI

Mikroakışkanlar cihazlar, mikro ortamları yüksek hassasiyetle tasarlamak için kullanılan önemli bir araç haline geldi. Bu cihazlar milimetre altı ölçekte sıvıları kontrol etmek için birçok yöntemi kapsamaktadır. Bu ölçekte minyatürleştirme sayesinde daha iyi teşhis hızı, maliyet etkinliği, ergonomi, duyarlılık elde edilebilir. Mikroakışkanların spesifik bir dalı, geleneksel kapalı kanal kurulumları ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir hava/sıvı ara yüzünün gösterilmesiyle karakterize edilen açık akışkan sistemler içerir. Açık kanal sistemlerinin kullanımı, imalatı ve temizliği kolay olan cihazlarda tekil mimarilerin tasarımını mümkün kılmıştır. Sıvı işleme için gelişmiş işlevsellik ve erişilebilirlik, açık akışkanlara dayalı teknolojilere sağlanan ek avantajlardır. Kapalı akışkan yaklaşımlarla kıyaslandığında, doğrudan erişilebilen kanalların kullanımı tıkanma ve kabarcık kaynaklı akış tedirginliği riskini azaltır. Bu kitap bölümünde, sistem bileşenleri dahil olmak üzere mikroakışkan teknolojisinin ayrıntılı açıklaması yapılmıştır. Bu teknolojiye dayalı dünya çapında tamamlanan veya devam eden çalışmalar sunulmuştur. Gıda ürünlerindeki çeşitli antibiyotik ailelerinin tespiti için gıda kalitesinin kontrol edilmesi, patojenlerin etkisini kontrol etmek için çevresel çalışmalarda teşhis, selomik gibi farklı alanlarda mikroakışkan cihazların biyomedikal uygulamaları da tartışılmıştır. Son olarak ise, bu teknolojinin mevcut açık araştırma konuları ve biyomedikal alanda gelecekteki olası araştırma kapsamı sunulmuştur.

## 2- MİKROAKIŞKAN SİSTEMLER

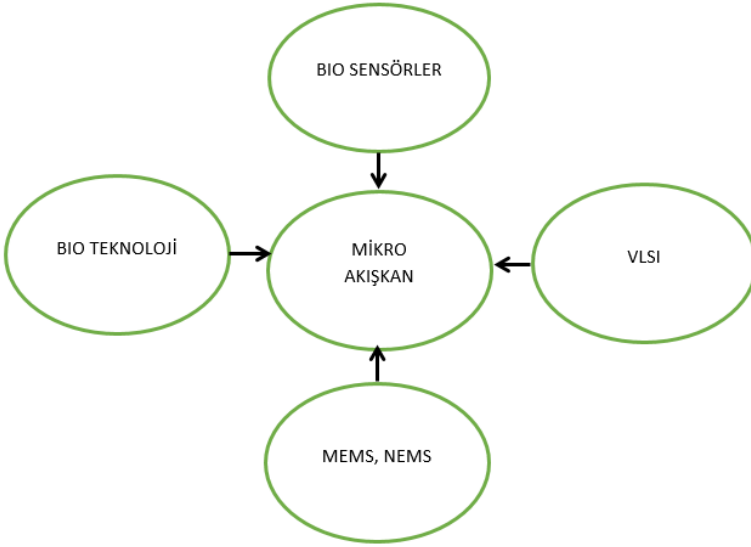
Sıvıların hacminin ve manipülasyonunun hassas kontrolü, kimya, analitik biyokimya, biyoteknoloji ve mühendislik dâhil olmak üzere birçok bilimsel alan için son derece önemlidir. Mikroakışkanlar, incelenen koşulların hassas kontrolü ile ortamları tasarlamak için önemli bir araç haline gelmiştir [1,2]. Genel olarak, mikroakışkanlar, sıvıları milimetre altı ölçekte kontrol etmek ve manipüle etmek için cihaz ve yöntemleri kapsamaktadır. Bu teknoloji, özellikle biyomedikal alanda geleneksel deneysel yaklaşımların yerini almak için popüler bir aday olarak sunulmuştur.

Mikroakışkan cihazların üretimi için en popüler ve yaygın yaklaşım, poli-dimetilsiloksanın (PDMS) “yumuşak litografisi” nin kullanılmasını içerir. Bu yöntem mikroakışkan teknolojisinin gelişimine büyük ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu malzemelerin kullanımı, mikrometrik çözünürlüğe sahip yapıların basitçe bir döküm kalıbı kullanılarak kolay kalıplanmasına izin verir [3]. Ayrıca PDMS, düşük maliyet, optik şeffaflık, esneklik, gaz geçirgenliği, kullanım kolaylığı ve modellerin yüksek doğrulukta yeniden üretilirliği gibi değerli özellikler sunar. Bu kombinasyon, kompakt cihazlarda proseslerin hem minyatürleştirilmesine hem de paralel eştirilmesine izin vererek reaktiflerden ve dolayısıyla



maliyetlerden tasarruf sağladı. Bu cihazların kolay üretimi ve esnekliği sayesinde, literatürde sensörler, karıştırıcılar, ayırıcılar, dağıtıcılar, pompalar, valfler gibi çeşitli türlerde fonksiyonel mikroakışkan elemanların üretimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, elektriksel, manyetik, optik, kapiler ve mekanik kuvvetler kullanılarak mikroakışkanlar da hem sıvıların hem de parçacıkların manipülasyonu için farklı teknikler geliştirilmiştir [4].

Mikroakışkan cihazlar temelde akışkanlar, elektronikler, optikler ve biyosensörlerin çeşitli entegrasyonu ile oluşturulmaktadır [5,6]. Bu cihazların temel amacı, akışkan hareket halinde iken patolojik analiz ihtiyacıdır. Mikroakışkanlar, ölümcül ve kronik hastalıkların erken aşamada teşhisi için yöntemler bulmada faydalı olduğunu göstermiştir. MEMS, NEMS gibi ileri teknolojilerin ortaya çıkması nedeniyle, çok sayıda disiplinler arası modülün tek bir çip cihazı üzerinde entegrasyonu Şekil 1’de gösterildiği gibi mümkündür.

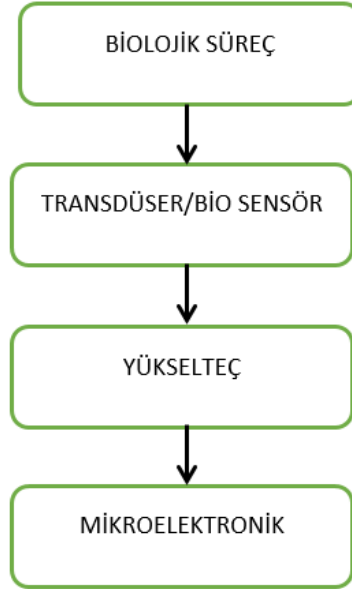


**Şekil 1.** Mikroakışkan'ın disiplinler arası alanı

Bununla birlikte, biyomedikal araştırmalar için, PDMS kullanımı ile ilgili bazı endişeler dile getirilmiştir. Çapraz bağlı olmayan oligomerlerin PDMS'den süzülmesinin hücreler için toksik olabileceği bulunmuştur. Dahası, hidrofobik özellikleri ve geçirgenliği nedeniyle, hidrofobik küçük moleküllerin PDMS tarafından emildiği gösterilmiştir. Ek olarak, su buharı geçirgenliği hızlı buharlaşmaya neden olabilir ve bu da esas olarak statik akışsız deneyleri olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, PDMS ile ilişkili dezavantajlar hafifletilebilir ve ek cihaz hazırlığı gerektirebilir. Son zamanlarda, PDMS'ye alternatif malzemeler, yani termoplastikler (polistiren - PS, siklik olefin kopolimer - COC, polimetil metakrilat - PMMA ve polikarbonat - PC), kağıt, balmumu ve tekstil ürünleri araştırıldı.

Mikroakışkan teknolojiyle bağlantılı olarak, çip üzerinde laboratuvar ve çip üzerinde organ içeren yeni kavramlar ortaya çıkmıştır. Mikroakışkan uygulamaları, kimyasal ve biyolojik süreçleri minyatürleştirme amacıyla tek bir çipte çeşitli mikroakışkan bileşenlerin ve prosedürlerin tam entegrasyonunu varsaymaktadır [7,8]. Çip üzerinde organ ise, belirli insan organlarının, insan dokularının ve bunların etkileşimlerinin fizyolojik temel özelliklerini taklit etmeyi amaçlayan karmaşık mikro mühendislik sistemlerini ifade etmektedir.

Mikroakışkan cihazın işlenmesinde yer alan çeşitli adımlar Şekil 2’de gösterilmiştir. Mikroakışkan işlemi fizyolojik numuneyi toplayarak başlar ve daha sonra bu numuneden belirli analit/biyo belirtecin ekstraksiyonu yapılır. Biyomedikal uygulamaya bağlı olarak dönüştürücü, analit üzerinde elektriksel, elektromekanik olarak optik veya mekanik olarak hareket edecektir. Bir sonraki adım, uygulamaya göre transdüser çıkışının sayılması, sınıflandırılması ve amplifikasyonu içerir. Son olarak, güçlendirilmiş örnek mikro elektronik yöntemler kullanılarak işlenir. Son zamanlardaki eğilim, bu alandaki araştırmaların büyüdüğünü göstermektedir [9,10]. Dünyadaki birçok üniversitede, bu alan ile ilgili birçok proje ve araştırma grupları oluşturulmuştur. Bu grupların ana hedefi, mikro/nano yapıları kullanarak; biyomedikal ve yaşam bilimleri alanlarında, mikroakışkanlar için yeni mikro ve nano teknolojiler geliştirmek ve yeni mikroakışkan uygulamaları göstermektir.



Şekil 2. Mikroakışkan sürecinin şematik gösterimi

### 3- MİKROAKIŞKAN CİHAZIN TASARIM KISITLAMALARI VE AVANTAJLARI

Mikroakışkan, tekli veya çoklu laboratuvar fonksiyonlarını çip formatına indirebilen bir cihaz teknolojisidir. Bu çipin boyutu milimetreden birkaç santimetre kareye kadar değişiyor. Pico litreden daha az olan son derece küçük sıvı hacimleri mikroakışkan tarafından işlenebilir. Yüksek verimli tarama ve otomasyon, mikroakışkan teknolojisinin tanıtılmasıyla mümkün hale gelir. Mikroakışkan cihazları genellikle “ $\mu$ TAS” (Mikro Toplam Analiz Sistemleri) ile gösterilir ve MEMS (Mikro-elektromekanik sistemler) cihazlarının bir alt kümesidir [11-13]. Mikroakışkan teknolojisi, temel olarak fiziğin, küçük miktarlardaki sıvıların incelenmesi ve manipülasyonunun birleşimiyle ilgilidir. Mikroakışkan ve  $\mu$ TAS arasındaki en büyük fark,  $\mu$ TAS’ın genellikle kimyasal analiz gerçekleştirmek için laboratuvar süreçlerinin toplam dizisinin entegrasyonunu göstermesidir; oysa mikroakışkan, laboratuvar işlemlerinin bir veya birkaçının tek bir çip üzerine entegrasyonu ile gerçekleştirilir. Mikroakışkan’ın HIV enfeksiyonlarının teşhisi gibi tıp alanındaki ve bitki bilimleri alanındaki uygulamaları araştırılmıştır [14,15].

Majilis ve ark. yapmış oldukları çalışmada, mikroakışkan teknolojisinde devam eden araştırma faaliyetlerini ve çeşitli biyolojik süreçlerin tıbbi uygulamalarının ele alınmasındaki son gelişmeleri sunmaktadır [16]. Mevcut teknolojik araçların ilerlemesi ve başarısı, mikro-mekanik ve mikro elektronik yapıları disiplinler arası uygulamalara götüren tek bir sistemde entegre eden MEMS üretilmesine yol açar. MEMS ve mikro elektronik, MEMS’in mikro elektronikten gelişmesine rağmen teknolojik yaklaşımlarda farklılık gösterir. Bir veya birkaç laboratuvar işleminin tek bir çip formatında ölçeklendirilmesi, bir çip üzerinde çeşitli laboratuvar işlevlerini birleştirerek mikro ve nano parçacıkları işleme kapasitesine sahip mikroakışkan olarak bilinir. Kimyasal analiz yapmak için MEMS kullanılır. Doğrudan mikro elektronik üretimden türetilen fotolitografi, çoğu mikroakışkan üretim sürecinin temelidir ve bu makalede tartışılmaktadır.

Bu bölümde mikroakışkan çip sistemlerinin hızlı gelişiminin önündeki iki büyük zorluk ele alınmıştır. Birincisi, çip hazırlamak için teknolojileri ve yeni polimer malzemeleri araştırmak. İkincisi ise, mikro kanallarda analitlerin tespiti için en iyi etiketsiz yöntemi seçmektir. Genel bir mikroakışkan çipin gösterimi amacıyla konsepti kapiler elektroforez (CE) kullanılır. Kapasitif olarak birleştirilmiş temassız iletkenlik ölçümü (CCD), analit tespiti için bir elektriksel algılama yöntemi kullanılır [17]. Böylelikle, “MinCE” olarak bilinen tamamen minyatürleştirilmiş ve düşük maliyetli bir CE çipi geliştirildi. Böylelikle tıbbi alanda olduğu gibi, kan serumundaki lityumun (bir antidepresan) kantitatif tayini ve ölçümü için

bakım noktası teşhisine uygun farklı uygulamalar geliştirildi. Gösterilen diğer uygulamalar arasında biyo analitik için proteinojenik amino asit tespiti ve içeceklerde, yerinde gıda analizi için sakarit tespiti yer alır. Son olarak, CCD uygulaması, biyolojik olarak ilgili makromoleküllerin, özellikle DNA'nın oldukça hassas tespiti için genişletilmiştir. Bu mikroakışkan çip sisteminin sınırlamalarından biri, yüksek performans ve doğru sonuçlar elde etmek için, farklı işlem parametrelerini ayrı ayrı optimize etmenin şart olmasıdır.

Bir mikroakışkan çip sisteminin yapımı ve geliştirilmesiyle ilgili farklı aşamalar tartışılmaktadır. Bu son teknoloji, geleneksel ve güncel laboratuvar cihazlarını ve aparatlarını minyatürleştirmek için farklı polimer malzemeler kullanır. İlk olarak, bu mikroakışkan sistemin bağımsız birim bileşenleri tanıtıldı ve ardından bir mikroakışkan sistemi gerçekleştirmek için her bir bileşenin tek bir monolitik sisteme işlevsel entegrasyonu gösterildi. Spesifik olarak, bir mikro ölçekli PCR birimi, bir mikro ölçekli enjeksiyon bileşeni ve cihazı hafif ortam koşulları altında monte etmek için bir teknik gösterilmiştir [18]. Tüm ünite bileşenlerinin imalatı, bir PDMS elastomeri kullanılarak yapılır ve bir numune akışının çalıştırılması için basınç kullanılır. Bu teknikle, ısıtıcılar ve pompalar gibi pahalı ve hacimli çevresel bileşenlerin değiştirilmesi mümkündür. Bu aynı zamanda numunenin kontaminasyonu ve bozulması sorunlarını çözer ve mikroakışkan'ın dinamik çalışmalar durumunda moleküler düzeyde uygulanmasını genişletir.

Carlen ve ark. yakın zamanda geliştirilen nano sensör çalışmasını sunmuştur [19]. Bu nano sensörler, biyolojik ve kimyasal uygulamalarda mikroakışkan sistemlerinin verimliliğini artırmak için gereklidir ve biyomoleküler bağlanmayı doğrudan ölçme kabiliyetine sahiptirler. Bu çalışmada sunulan iki sensör, alan etkisine dayalı Si-NW (Silikon Nanowire) sensörlerdir. İkinci sensörün platformu metal nano yapıları yüzeylere dayanmaktadır. Si-NW biyo sensör olarak hemen hemen tüm elektrik sensörleri, minyatürleştirilmiş ve kompakt algılama sistemleri için gerekli geleneksel devrelerle doğrudan entegrasyon yeteneğine sahip olduklarından avantajlara sahiptir. Si-NW sensörleri, Nernstian hassasiyetine sahip pH sensörleri olarak gösterilebilir ve DNA hibridizasyonunun gerçek zamanlı ölçümlerini almak mümkün hale gelir. Nano yapıları metal yüzey tabanlı sensör platformu, nano gap'leri Raman spektroskopisi ve SERS (yüzeyde geliştirilmiş Raman saçılımı) uygulaması için uygun olarak tanımlar.

#### **4- MİKROAKIŞKAN TEKNOLOJİSİNİN UYGULANMASI**

Mikroakışkan cihazlarının birçok alanda artan talebi, akışkan teknolojinin taşınabilirlik, otomatik örnek işleme, yeniden yapılandırılabilirlik gibi çeşitli teknolojik avantajlarından kaynaklanmaktadır. Bakteri tespiti için gerçek zamanlı PCR algılama çipleri, DNA çipi, Gene Chip, Hücresel

Analiz çipi, Akış Sitometresi (HIV için) gibi biyomedikal alandaki mikroakışkan teknolojisinin uygulamalarından bazılarıdır [20-22].

Wooseok ve ark., bakım noktası tanı sistemlerinin gereksinimlerini karşılamak ve verimliliğini artırmak için kullanılacak mikroakışkan çipin özelliklerini sunmaktadır [23]. Gerekli fonksiyonel modüller ve çalışma prensipleri genellikle hedef analitlere bağlı olduğundan, POCT sistemlerinin uygulamaları, hücreler, proteinler, metabolitler ve nükleik asitler gibi analit tipine göre kategorize edilir. POCT sistemleri, bu analitlerden belirli biyo belirteçleri tespit etme yeteneğine sahiptir. Bu farklı biyo belirteçler, farklı tahliller, teşhis prensipleri ve işletim sistemleri gerektirir. Böylece her kategoride, modüllerin konfigürasyonu, algılama yöntemleri ve mikroakışkan tabanlı POCT teşhis sistemlerinin avantajları ve dezavantajları gözden geçirilir.

Cardoso ve ark. özellikle biyolojik sıvılarda mikroakışkan ve klinik uygulamalar için tek kullanımlık ve tam entegre mikroakışkan cihazlarının geliştirilmesi ve eşzamanlı parametrelerin izlenmesi incelenmiştir [24]. Bu çip, biyosensörler, optik filtreler ve elektronik devrelerin tek bir çip üzerine entegrasyonu ile üretilmiştir. Mikroakışkan cihaz performansını iyileştirmek için mikro kanalların içindeki mikroakışkanların pompalanmasını ve karıştırılmasını teşvik etmek için akustik akış tekniğini kullanan bir mikroakışkan cihazı önerilmiştir. Bu akustik akışı oluşturmak için,  $\beta$ -PVDF ( $\beta$ -fazında hazırlanan poliviniliden florür) gibi bir piezoelektrik malzemeye dayanan bir dönüştürücü kullanılır. Bu polimer, dönüştürücüye uygulanan giriş sinyali ile bağlantılı olarak ısıtmayı sürdürmek ve sıvıların hareketini kontrol etmek için işlevsel olarak derecelendirilmek üzere işlenir. Mikroakışkanın daha az karıştırma süresi ile taşınabilirliğini kolaylaştırmak ve yüksek hassasiyet ve güvenilirlik elde etmek için, beyaz ışık kaynağı ve spektro fotometrinin, yüksek seçici optik girişim filtrelerinin birlikte entegre edilmesiyle mümkün kılınabilen algılama tekniği olarak kullanılması önerilmiştir.

Katla Sai ve ark. mikroakışkan cihazların biyomedikal uygulamaları için inorganik nano malzemelerin biyo fonksiyonelizasyonu, sentezi, klinik çevirisi değerlendirmesi üzerindeki etkisini tartışmıştır [25]. Mikroakışkan yöntemleri, daha az enerji tüketimi, kuantum noktalarının ve metaller, nanokompozitler ve metal oksitler gibi inorganik nanomalzemelerin hızlı senteziyle sonuçlanır. Bu aynı zamanda, üstün in vitro çalışmalar gerçekleştirerek klinik çevirilerin daha hızlı tamamlanması için LoC cihazlarının gerekliliğini de göstermektedir. Hesaplamalı simülasyonlar alanındaki son gelişmeler nedeniyle, artık inorganik nano malzemeler tabanlı nanotipi, terapötik uygulamalar için yararlı olan mikroakışkan teknolojisini kullanarak tek bir yapıda sentezlemek mümkün hale geliyor.

Mikroakışkan teknolojisindeki ve tasarım stratejilerindeki son gelişmeler, yüksek özgüllük ve duyarlılıkla verimli patojen tespiti için

yararlı evrensel numuneden sonuca mikroakışkan cihazların geliştirilmesine yol açmaktadır [26]. Ana odak noktası, bakım noktası teşhisi, küçük hacimli numunelerin işlenmesi, hızlı tespit süresi, minyatürleştirme ve taşınabilirlik gibi birçok avantaja sahip olacak, aksesuarsız ve tamamen entegre bağımsız mikroçiplerin geliştirilmesine verilmektedir. Bu, ölüm oranının azaltılmasına ve tüberküloz (TB), HIV ve benzeri gibi yaşamı tehdit eden hastalıkların yayılmasını kontrol etmeye yardımcı olacaktır.

Wen ve ark. yaptıkları derleme çalışmasında, damlacık mikroakışkanları tarafından üretilmiştir mikro partiküllere genel bir bakış sunmuştur [Wen]. Ayrıca biyomedikal alanlarda son gelişmeler ele alınmıştır. Damlacık oluşum mekanizması tanıtılmış ve çeşitli türlerde damlacıklar oluşturmak için kullanılan cihazları açıklanmıştır. Bu damlacıklardan şablon haline getirilmiş mikro partikülleri hazırlama yöntemlerini özetliyor ve mikroakışkan tekniklerin sağladığı benzersiz ve karmaşık yapıları vurgulanmıştır. Daha sonra, bu mikro partiküllerin biyomedikal uygulamalarını, ilaç verme araçları ve hücre yüklü matrisler olarak kullanımlarındaki son gelişmelere odaklanarak açıklanmıştır. Biyosensörler ve yapay hücreler dahil diğer uygulamalar da kısaca açıklanmıştır. Son olarak, bu mikro partiküllerin pratik kullanımını potansiyel olarak etkileyebilecek mevcut zorlukları tartışılıyor ve perspektifler ve olası çıkarımlarla sonuçlandırılmıştır.

Auerswald ve ark. yaptıkları çalışma, çiğ sütteki çeşitli antibiyotik ailelerinin çoğullaşmalı tespiti için gerekli mikroakışkan cihazların geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır [28]. Süt diyetinde dört antibiyotik ailesinin aşırı kullanıldığı ve daha güçlü bakteri direncine yol açtığı bildirilmektedir. Bu ciddi bir sorun oluşturacak ve insanlarda etkili anti bakteriyel tedaviyi tehdit edecektir. Bu antibiyotik ailelerini tespit etmek için otomatik, kullanımı kolay, hızlı ve uygun maliyetli bir multipleks algılama sistemi geliştirildi.

Shi ve ark. yaptıkları çalışmada mikroakışkan karıştırma reaktörü ve sıradan mikro reaktör tipleri dahil olmak üzere mikro reaktörün tasarım prensibi tanıtılmıştır [29]. Daha sonra, mikro reaktör uygulamalarının son gelişmeleri gözden geçirilir (reaksiyon kinetiği, enzimatik biyo reaksiyonlar, biyo sentez ve mikro miksaaj reaktörü ve rtPCR ile tıbbi testler, ELISA immün reaksiyonu ve sıradan mikroreaktör tipleri ile nükleik asit hibridizasyonu). Son olarak, yaygın ve düşük maliyetli yöntemler (lazerle uyarılan floresans, ultraviyole [UV] Emilimi ve elektrokimyasal yöntem) gibi çip üzerinde algılama yöntemleri özetlenmiştir.

Kalaitzakis ve ark. yapmış oldukları çalışmada bilgi yönetimi metodolojileri ve analiz platformu ile entegre edilen proteomik profillemeye tekniklerini açıklamaktadır [30]. Bunun temel amacı, pankreas kanserinin erken evrelerde saptanması için klinik olarak ilgili analitlerin ve biyo

belirteçlerin belirlenmesidir. Pankreas karnın derinliklerinde olduğu için, pankreas kanserinin ultrasonik ve fiziksel tespiti karmaşık ve külfetli hale gelir. Bu tür vakaların neredeyse %95'i son aşamalarda teşhis edilir; örneğin Evre III veya IV de yüksek ölüm oranıyla sonuçlanır. LOCCANDIA projesi öncelikle pankreasın erken aşamada kanser teşhisi ile ilgilidir. Bu, bir mikroakışkan geliştirmesi, yani yeni bir nano teknoloji tabanlı platform ve tam bir proteomik analiz zinciri yardımıyla profil oluşturma uygulamasıyla entegre edilen plazma proteininin doğrulanmasıyla yapılabilir. Bu projenin başarısı, biyo, nano ve veri işleme ve bilgi yönetimi metodolojilerinin kusursuz kombinasyonuna dayanmaktadır.

Ziober ve ark. ağız kanserinin biyo belirteç tabanlı tanımlanması ve erken teşhisi için mikro akışkan cihazların ortaya çıkışını tanımlamaktadır [31]. Baş boyun kanserleri ağız boşluğu kanserlerinin yaklaşık %40'ını oluşturur. Diğer ağız boşluğu kanseri türleri arasında dudaklarda, dilde, diş etlerinde, yanak mukozasında, sert ve yumuşak damakta ve ağız tabanında meydana gelen skuamöz hücreli karsinomlar bulunur. OSCC (Oral skuamöz hücreli karsinom) ölümcül bir kanserdir ve yüksek mortalite, morbidite ve şekil bozukluğu ile sonuçlanır. OSCC için geleneksel tanı ve tarama yöntemleri uygun maliyetli değildir ve yüksek doğrulukta değildir ve gelişmiş ekipmanlar, modern laboratuvar ve kalifiye personel tarafından uzun ve ayrıntılı işlemler gerektirir. Bu sorunların üstesinden gelme nedeni, minyatürleştirilmiş, doğru, otomatikleştirilmiş, entegre ve ucuz bir mikroakışkan çip ihtiyacına yol açar. Hastaları OSCC için taramak için, bu mikroakışkan tükürüğü girdi örneği olarak kabul edecek ve daha sonra minimum düzeyde eğitilmiş personel tarafından işlenecek ve böylece sonuçları zamanında sağlayacaktır. Çip içinde, ağız kanseri ve öncül (displastik) hücrelerin tanımlanması, displastik ve kanser hücrelerinin zarlarında tekil olarak ifade edilen ve benzersiz gen transkripsiyon profillerine sahip olan zarla ilişkili hücre proteinleri aracılığıyla mümkün olacaktır.

Dutse ve ark. çevrenin zarar görmesini önlemek için patojenik ajanların etkilerini kontrol etmede tamamlayıcı araçlar olarak kullanılabilecek mikroakışkan tabanlı çiplere olan ihtiyacı incelemiştir [32]. Bu sistemler, kullanımı kolay, hızlı, hassas, yeterince güvenilir ve taşınabilirdir. Bu nedenle pahalı, sıkıcı ve zaman alıcı olan geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunar. Patojen tespitinde mikroakışkan sistemlerinin başlıca uygulaması, elektrokimyasal tekniklere dayalı DNA tabanlı yöntemleri içerir. Sistemlerin akışkanlar mekaniği nano ölçek seviyesinde tartışılmaktadır. Ana sınırlama, sıvı aktarımı için gereken mekanik pompaların kullanımının dikkat gerektirmesi ve performansı düşürmesidir.

Mikroakışkanların tıp alanındaki potansiyelini göstermek için üç örnek sunulmuştur. İlk olarak, kanlarındaki lityumu izlemek için manyak hastalar söz konusu olduğunda, kapiler elektroforeze dayanan önceden



doldurulmuş, tek kullanımlık bir çip tartışılır [33]. Oral yoldan lityum genellikle bipolar bozukluktan muzdarip hastaları tedavi etmek için kullanılır. Bu nedenle, kapiler elektroforeze dayalı ve tampon çözeltiyle vakumla önceden doldurulmuş bir cam çip üretilmiştir. Aynı çip, süt hummasını tespit etmek için inek kanındaki magnezyum ve kalsiyumu belirleme potansiyeline de sahiptir. Böbrek hastaları için oldukça faydalı olan bu çip platformu ile idrardaki sodyumun da ölçülebildiği görülüyor. İkinci örnekte, erkek fertilesini belirlemek için, semendeki sperm hücrelerini saymak için kullanılan basit bir çip sunulmuştur. Son olarak, ilaç geliştirme için kullanılan gelişmiş in vitro modeller sunulmuştur. Çip üzerindeki organa bir örnek olarak, ilacın taranması için çok yönlü bir platform oluşturmak için kullanılan ve hayvan testlerini büyük ölçüde değiştirme ve azaltma potansiyeline sahip çip üzerindeki kan-beyin bariyeri fark edilmiştir [34].

Sıtma gibi küresel endişe hastalıklarının basit, hızlı ve zamanında teşhis edilmesi ve ortadan kaldırılması gerekliliği, mikroakışkan PCR teşhis yönteminin ortaya çıkmasına neden oldu. Taylor ve ark. yapmış oldukları çalışmada, özellikle gelişmekte olan ülkelerde pahalı, karmaşık ve geleneksel moleküler tanılamamın zorluklarının üstesinden gelme potansiyeline sahip mikroakışkan teknolojisi tanımlanmıştır [35]. Bu teknoloji, yaşamı tehdit eden sıtmayı aşağıdaki şekillerde kontrol etme yeteneğine sahiptir; akut sıtma için tanısız bir önlem olarak, eliminasyon ortamlarında sürveyans için ve yeni aşuların ve ilaçların klinik değerlendirmelerinde bir araç olarak kullanılabilir.

Günümüzün en yaygın ve kronik hastalıklarından biri, yetersiz tanı ve yanlış tedavi nedeniyle yüksek ölüm oranlarına neden olan Tüberkülozdur. MDR-TB (Çoklu ilaca dirençli tüberküloz), zamanında tanı ve uzun süre pahalı tedavi gerektiren TBC'nin aşamalarından biridir. WHO (Dünya Sağlık Örgütü), MDR-TB'nin hızlı teşhisini iyileştirmek için spesifik moleküler tanı tekniklerini de onaylamıştır. Mevcut yöntemlerin etkinliği, sınırlı çok yönlülük, sessiz mutasyonların uygunsuz yorumlanması ve Mycobacterium tuberculosis kompleksinin (MTBC) coğrafi dağılımı ve genotipik çeşitliliği ile sınırlıdır. Tüm bu zorlukların üstesinden gelmek için STMicroelectronics (Cenevre, İsviçre), VerePLEX Biosystem olarak bilinen bir mikroakışkan cihazı geliştirmiştir. Bu moleküler, ölüm ve morbidite oranını azaltmak için zaman kısıtlaması dikkate alınarak MDR-TB'yi teşhis etme ve yaygın Nontüberküloz Mikobakterileri (NTM) hızla tespit etme potansiyeline sahiptir.

## 5- GELECEK ÖNGÖRÜSÜ

Mikroakışkan çiplerin biyomedikal alanda devrim yaratma potansiyeline sahip olduğu ve sağlık sektörüne destek verme kabiliyetine sahip olduğu yaygın olarak tartışılmaktadır. Ancak yine de bu teknoloji, özellikle gelişmekte olan ülkelerde bir hayal gibi görünebilir. Gelişmekte



olan ülkeler gibi kaynakların düşük olduğu alanlarda, mikroakışkan cihazlarının üretildiği iş modelini iyileştirmek ve insanları bunların verimli kullanımı konusunda bilinçlendirmek için hala çaba sarf edilmesi gerekmektedir.

Ölüm oranını düşürmek için zamanında teşhis ve tedavi gerektiren sıtma, HIV ve AIDS, kızamık, verem, alt solunum rahatsızlıkları gibi birçok bulaşıcı hastalık vardır. Mikroakışkan teknolojisi bu tür hastalıkların erken teşhisinde daha sık kullanılmaya başlayacaktır.

Bugünlerde Domuz Gribi, Zika Virüsü ve Ebola Virüsü binlerce insanı öldürüyor ve salgın riskine neden oluyor. Tüm bu hastalıklar için, hastalık yönetimi ortamını iyileştirmek için gerçek zamanlı tanı sağlama yetenekleri nedeniyle mikroakışkan çip teşhisine şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır. Dahası, bu teknolojinin, Parkinson hastalığı ve omurilik yaralanması gibi merkezi sinir sistemi bozukluklarını, geleneksel tahlilleri gerçekleştirmek için gereken yeterli beyin omurilik sıvısının çıkarılmasıyla tedavi etmenin yeni bir yolunu bulmak için yararlı olduğu kanıtlanabilir. Bu teknolojinin potansiyeli, romatoid artrit gibi otoimmün eklem hastalıkları için daha fazla araştırılabilir.

## 6- SONUÇ

Yapılan veya yapılacak olan çalışmalara göre mikroakışkan çip teknolojisi biyomedikal alanda geniş uygulama alanına sahip olduğu görülmektedir. Bu teknolojiye araştırılmalar esas olarak kimyasal sentez, DNA analizi ve insan teşhisine odaklanmaktadır. Teşhis, biyo analiz ve biyo algılama gibi farklı alanlarda, su ve gıda kalitesinin test edilmesi de dahil olmak üzere çevresel izleme, farklı ilaçların test edilmesi, eczacılıkta vb. gibi farklı alanlarda kullanılabilirler. Düşük güç tüketimi, taşınabilirlik, modülerlik, yeniden yapılandırılabilirlik gibi avantajlara sahiptirler. Numune taşıma, dağıtma ve karıştırma gibi laboratuvar süreçlerini otomatikleştirirler ve laboratuvar testlerinin süresini büyük ölçüde kısaltma kabiliyetine sahiptirler. Çeşitli yetenekleriyle kanser, verem gibi kronik ve hayatı tehdit eden hastalıkları erken evrelerde tespit etmek artık mümkün hale geliyor ve bu da ölüm oranının düşmesine neden oluyor. Mikroakışkan cihazları, hızlı ve zamanında teşhis sonuçları sağladıkları için bakım noktası teşhisi için uygundur. Diğer birçok uygulama için, mikroakışkan cihazların tasarlanması için platformlar önerilmiştir.

**KAYNAKÇA**

- [1] Sackmann, E. K., Fulton, A. L., & Beebe, D. J. (2014). The present and future role of microfluidics in biomedical research. *Nature*, 507(7491), 181-189.
- [2] Hou, X., Zhang, Y. S., Trujillo-de Santiago, G., Alvarez, M. M., Ribas, J., Jonas, S. J., ... & Khademhosseini, A. (2017). Interplay between materials and microfluidics. *Nature Reviews Materials*, 2(5), 1-15.
- [3] Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S., & Folch, A. (2016). The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics. *Lab on a Chip*, 16(10), 1720-1742.
- [4] Trantidou, T., Elani, Y., Parsons, E., & Ces, O. (2017). Hydrophilic surface modification of PDMS for droplet microfluidics using a simple, quick, and robust method via PVA deposition. *Microsystems & nanoengineering*, 3(1), 1-9.
- [5] Rackus, D. G., Shamsi, M. H., & Wheeler, A. R. (2015). Electrochemistry, biosensors and microfluidics: a convergence of fields. *Chemical Society Reviews*, 44(15), 5320-5340.
- [6] Jiang, S., Shi, T., Zhan, X., Xi, S., Long, H., Gong, B., ... & Tang, Z. (2015). Scalable fabrication of carbon-based MEMS/NEMS and their applications: a review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(11), 113001.
- [7] Samiei, E., Tabrizian, M., & Hoorfar, M. (2016). A review of digital microfluidics as portable platforms for lab-on a-chip applications. *Lab on a Chip*, 16(13), 2376-2396.
- [8] Lee, H., Xu, L., Koh, D., Nyayapathi, N., & Oh, K. W. (2014). Various on-chip sensors with microfluidics for biological applications. *Sensors*, 14(9), 17008-17036.
- [9] Cardoso, S., Leitao, D. C., Dias, T. M., Valadeiro, J., Silva, M. D., Chicharo, A., ... & Freitas, P. P. (2017). Challenges and trends in magnetic sensor integration with microfluidics for biomedical applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(21), 213001.
- [10] Li, W., Zhang, L., Ge, X., Xu, B., Zhang, W., Qu, L., ... & Weitz, D. A. (2018). Microfluidic fabrication of microparticles for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 47(15), 5646-5683.
- [11] Ulkir, O. (2020). Design and fabrication of an electrothermal MEMS micro-actuator with 3D printing technology. *Materials Research Express*, 7(7), 075015.
- [12] Arbabi, E., Arbabi, A., Kamali, S. M., Horie, Y., Faraji-Dana, M., & Faraon, A. (2018). MEMS-tunable dielectric metasurface lens. *Nature communications*, 9(1), 1-9.

- [13] Guijt, R. M., & Manz, A. (2018). Miniaturised total chemical-analysis systems ( $\mu$ TAS) that periodically convert chemical into electronic information. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 273, 1334-1345.
- [14] Phillips, E. A., Moehling, T. J., Ejendal, K. F., Hoilett, O. S., Byers, K. M., Basing, L. A., ... & Linnes, J. C. (2019). Microfluidic rapid and autonomous analytical device (microRAAD) to detect HIV from whole blood samples. *Lab on a Chip*, 19(20), 3375-3386.
- [15] Dector, A., Galindo-De-La-Rosa, J., Amaya-Cruz, D. M., Ortíz-Verdín, A., Guerra-Balcázar, M., Olivares-Ramírez, J. M., ... & Ledesma-García, J. (2017). Towards autonomous lateral flow assays: Paper-based microfluidic fuel cell inside an HIV-test using a blood sample as fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(46), 27979-27986.
- [16] B. Y. Majlis, "MEMS and lab on chip: Interfacing macro to nano world", *Proceedings of IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*, Langkawi, (2013), September 25-27.
- [17] Knowlton, S. M., Sadasivam, M., & Tasoglu, S. (2015). Microfluidics for sperm research. *Trends in biotechnology*, 33(4), 221-229.
- [18] Morio, F., Poirier, P., Le Govic, Y., Laude, A., Valot, S., Desoubieux, G., ... & Dalle, F. (2019). Assessment of the first commercial multiplex PCR kit (ParaGENIE Crypto-Micro Real-Time PCR) for the detection of *Cryptosporidium* spp., *Enterocytozoon bienersi*, and *Encephalitozoon intestinalis* from fecal samples. *Diagnostic microbiology and infectious disease*, 95(1), 34-37.
- [19] Carlen, E. T., & van den Berg, A. (2013, December). Labs-on-a-chip and nanosensors for medical applications and life sciences. In *2013 IEEE International Electron Devices Meeting* (pp. 8-7). IEEE.
- [20] Ansari, M. H., Hassan, S., Qurashi, A., & Khanday, F. A. (2016). Microfluidic-integrated DNA nanobiosensors. *Biosensors and Bioelectronics*, 85, 247-260.
- [21] MacConnell, A. B., Price, A. K., & Paegel, B. M. (2017). An integrated microfluidic processor for DNA-encoded combinatorial library functional screening. *ACS combinatorial science*, 19(3), 181-192.
- [22] Lai, K. Y. T., Yang, Y. T., & Lee, C. Y. (2015). An intelligent digital microfluidic processor for biomedical detection. *Journal of Signal Processing Systems*, 78(1), 85-93.
- [23] Jung, Wooseok, Jungyoun Han, Jin-Woo Choi, and Chong H. Ahn, "Point-of-care testing (POCT) diagnostic systems using microfluidic lab-on-a-chip technologies", *Microelectronic Engineering Journal*, vol. 132, (2015), pp. 46-57.
- [24] Cardoso, V. F., Catarino, S. O., Lanceros-Mendez, S., & Minas, G. (2011, March). Lab-on-a-chip using acoustic streaming for mixing and pumping fluids. In *1st Portuguese Biomedical Engineering Meeting* (pp. 1-4). IEEE.

- [25] Krishna, Katla Sai, Yuehao Li, Shuning Li, and Challa SSR Kumar, “Lab-on-a-chip synthesis of inorganic nanomaterials and quantum dots for biomedical applications”, *Advanced Drug Delivery Reviews Journal*, vol. 65, no. 11, (2013), pp. 1470-1495.
- [26] Luo, G., Du, L., Wang, Y., & Wang, K. (2019). Recent developments in microfluidic device-based preparation, functionalization, and manipulation of nano-and micro-materials. *Particuology*, 45, 1-19.
- [27] Li, W., Zhang, L., Ge, X., Xu, B., Zhang, W., Qu, L., ... & Weitz, D. A. (2018). Microfluidic fabrication of microparticles for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 47(15), 5646-5683.
- [28] Auerswald, J., Berchtold, S., Diserens, J. M., Gijs, M. A., Jin, Y. H., Knapp, H. F., ... & Voirin, G. (2009). Lab-on-a-chip for Analysis and Diagnostics: Application to Multiplexed Detection of Antibiotics in Milk. In *Nanosystems design and technology* (pp. 117-142). Springer, Boston, MA.
- [29] Shi, H., Nie, K., Dong, B., Long, M., Xu, H., & Liu, Z. (2019). Recent progress of microfluidic reactors for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*, 361, 635-650.
- [30] M. Kalaitzakis, V. Kritsotakis, P. Grangeat, C. Paulus, L. Gerfault, M. Perez, C. Reina, G. Potamias, M. Tsiknakis, D. Kafetzopoulos and Pierre-Alain Binz “Proteomic based identification of cancer biomarkers: The LOCCANDIA integrated platform,” *Proceedings of 8th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering*, Athens, (2008), October 8-10, pp. 1-7.
- [31] BL Ziober, MG Mauk, EM Falls, Z Chen, AF Ziober and Haim H. Bau, “Lab-on-a-chip for oral cancer screening and diagnosis”, *Head & Neck Journal*, vol. 30, no. 1, (2008), pp. 111-121.
- [32] Sabo Wada Dutse and Nor Azah Yusof, “Microfluidics-based lab-on-chip systems in DNA-based biosensing: An overview”, *Sensors Journal*, vol.11, no. 6, (2011), pp. 5754-5768.
- [33] Aryasomayajula, A., Bayat, P., Rezai, P., & Selvaganapathy, P. R. (2017). Microfluidic Devices and Their Applications. In *Springer Handbook of Nanotechnology* (pp. 487-536). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [34] Bruijns, B., Van Asten, A., Tiggelaar, R., & Gardeniers, H. (2016). Microfluidic devices for forensic DNA analysis: A review. *Biosensors*, 6(3), 41.
- [35] Taylor, B. J., Howell, A., Martin, K. A., Manage, D. P., Gordy, W., Campbell, S. D., ... & Atrazhev, A. (2014). A lab-on-chip for malaria diagnosis and surveillance. *Malaria journal*, 13(1), 179.



# Bölüm 10

## ALANDA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZİLERİNE GENEL BİR BAKIŞ<sup>1</sup>



*Ali Recai ÇELİK<sup>2</sup>*

---

<sup>1</sup> Bu çalışmanın hazırlanmasında Ali Recai Çelik'in Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde tamamlanan "Görüntü İşleme Algoritmalarının FPGA Donanımı Üzerinde Gerçeklenmesi" isimli Yüksek Lisans tezinden faydalanılmıştır.

<sup>2</sup> Dr., Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Diyarbakır, Türkiye



## 1. GİRİŞ

Kullanıcıların oluşturmak istedikleri elektronik sistemlere uygun olarak programlanabilen devrelere ‘Programlanabilir Lojik Devreler (PLD)’ denir. ‘Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Arrays - FPGA)’ devresi de bu amaca yönelik olarak tasarlanıp üretilen donanımlardan biridir.

FPGA’nın iç yapısında çok sayıda mantık kapısı bulunur ve hedeflenen görevin gerçekleştirilmesi için bu kapı blokları programlanır. Kapıların bir araya gelmesiyle sayısal devreler oluşturabilir. Bu işlemler yapılırken ‘Donanım Tanımlama Dilleri (Hardware Description Language - HDL)’ kullanılır. Aynı FPGA ile defalarca kod yazıp silme işlemleri yapıp, tasarım sürekli değiştirilebilir. Bu özellik, FPGA’ların tasarımcılara sağladığı avantajlardan biridir [1].

Bu çalışmada, FPGA donanımının tanımı, tarihsel gelişim süreci, iç ve dış yapısı, öne çıkan özellikleri ve avantajları, kullanım alanları ve tasarım aşamaları gibi temel bilgiler verilmiş, FPGA donanımına genel bir bakış yapılmıştır. Ayrıca, FPGA’nın programlanabilmesi için gerekli olan arayüz yazılımlarından ve HDL çeşitlerinden de bahsedilmiştir.

## 2. FPGA HAKKINDA GENEL BİLGİLER

### 2.1. FPGA’nın tanımı

FPGA’ları iyi ve doğru bir şekilde anlayabilmek için öncelikle PLD’lerin incelenmesi gerekir. PLD’ler lojik kapıların ve bellek birimlerinin birbirlerine bağlanmasıyla oluşturulur. Lojik kapıların gerçekleştireceği görevlerin belirlenmesinde, denetiminde ve kayıt altına alınmasında bellek birimleri kullanılır. FPGA’lar da bu çalışma prensibine göre tasarlanıp üretilen devrelerden biridir. İsminden de anlaşılacağı üzere FPGA’lar alanda yani sahada programlanabilecek şekilde üretilirler. Diğer bir ifadeyle, FPGA’lar kullanıcıların ihtiyaç duydukları mantık fonksiyonlarına göre üretimden sonra defalarca programlanabilen donanımlardır [2].

FPGA’lar, iç yapısında yer alan transistörlerin birbirinden bağımsız olarak üretildiği entegre devreler olarak da tanımlanabilir. Bu tanıma göre, FPGA içindeki transistörler tasarımcının hedeflediği fonksiyona göre birbirlerine bağlanır ve arzu edilen uygulamalar başarılı şekilde gerçekleştirilir.

### 2.2. FPGA’nın Gelişim Süreci

Sayısal devre üretimlerinin gelişmeye başladığı 1980’li yıllarda esnek programlanabilme özelliğine sahip PLD’ler ile yüksek performans özelliğine sahip ‘Uygulamaya Özgü Tümüleşik Devre (Application Specific Integrated Circuit - ASIC)’lerin avantajlarını birlikte sağlayabilecek bir aygıtı ihtiyaç duyulmuştur [3].



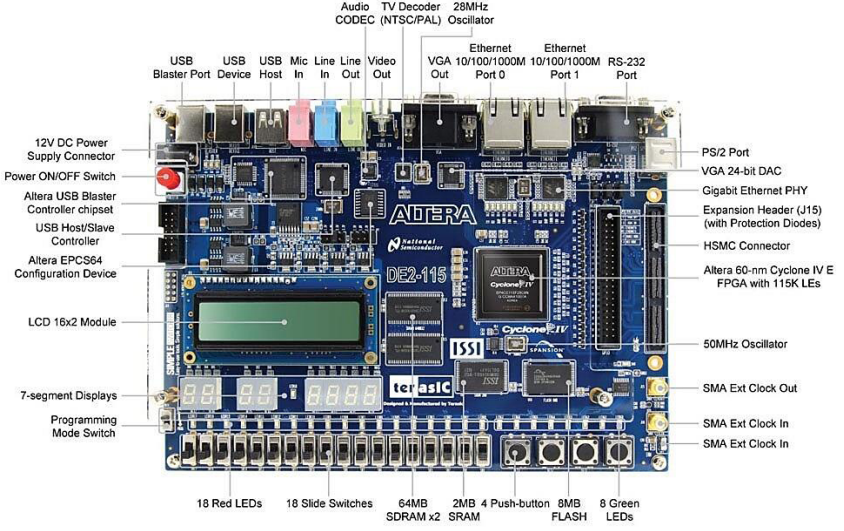
SPLD ve CPLD gibi programlanabilen donanımlar yüksek yapılandırılma ve hızlı tasarlanma özelliklerine sahip olmalarına rağmen büyük ve karmaşık yapıları desteklemiyorlardı. Diğer tarafta ise karmaşık sistemleri gerçekleştirmek için, amaca uygun ve bir kereye mahsus olarak üreticiler tarafından oluşturulan ASIC'ler bulunmaktaydı. Ancak, karmaşık işlemlerde çok hızlı çalışabilen ASIC devrelerin yeniden programlanamayışı, uzun ve maliyetli oluşturulma sürelerine sahip oluşu gibi olumsuz yönleri vardı. İşte bu iki donanımın eksik ve dezavantajlı özelliklerinin ortadan kaldırılması amacıyla FPGA adı verilen yeni bir entegre sınıfı geliştirmiş ve 1984 yılında kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.

Günümüzde FPGA cihazını üreten çeşitli firmalar var olmakla birlikte, Xilinx ve Altera firmaları pazar payının büyük bir kısmını elinde bulundurmaktadır [4]. Altera firmasının ürettiği FPGA serileri Starix, Aria ve Cyclone olarak adlandırılırken, Xilinx firmasının ürettiği FPGA serileri Artix, Kintex, Virtex ve Spartan olarak adlandırılır.

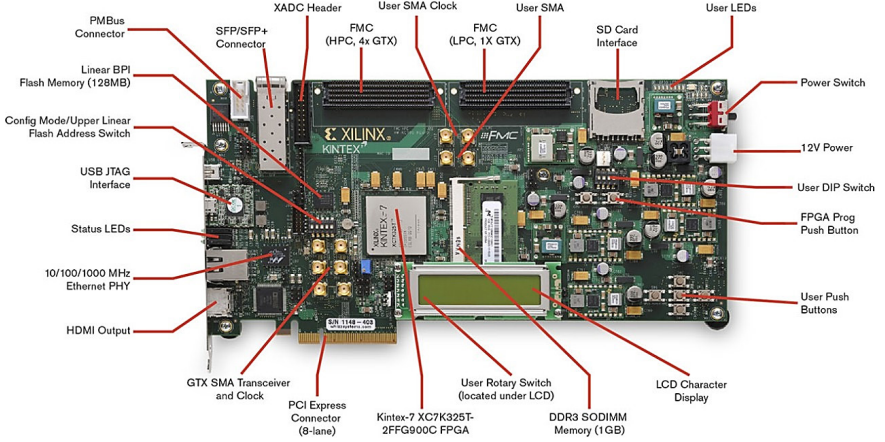
### 2.3. FPGA'nın Yapısı

FPGA'nın tanımı başlığı altında bahsedildiği üzere, FPGA donanımında binlerce mantık elemanı ve rastgele erişimli bellek hücreleri bulunur. Daha detaylı açıklamak gerekirse, FPGA'lar ayarlanabilir mantık blok (logic block) dizileri, bu dizilerin etrafında yer alan giriş ve çıkış birimleri (programable IO) ve tüm bu birimleri bağlayan ara bağlantılardan (interconnect) oluşur. Tasarımcı bu mantık ve hafıza birimlerini sınırsız sayıda yeniden programlayabilir [5]. Mantık bloklarının programlanmasıyla birlikte, sayısal devreyi oluşturacak elemanlardan meydana gelen birim hücreler elde edilir. Bu hücrelerin arasında bağlantılar mevcuttur. Giriş-çıkış birimleri ise FPGA ile haberleşmek için kullanılan bölümlerdir [6]. Dışarıdan bakıldığında, FPGA tek bir yonga olarak görülür. Şekil 1'de FPGA'ların üstten görünümü verilmiştir. Örnek olarak Altera firmasına ait DE2-115 Cyclone IV model ve Xilinx firmasına ait Kintex-7 model donanımlar gösterilmiştir [7,8]. FPGA'nın iç yapısı ise Şekil 2'de görülmektedir [9,10]. Genellikle FPGA'larda yer alan birimler şunlardır:

USB Blaster yapılandırması, mikrofon girişi, video giriş ve çıkışı, RS-232 haberleşme birimi, kızılötesi bağlantısı, USB girişi, ethernet bağlantısı, fare ve klavye bağlantı noktası, genişletme başlıkları, farklı boyutlarda SDRAM, SRAM ve Flash Bellek, saatler, geçiş ve buton anahtarları, farklı renklerde LED, gösterge ekranı, LCD ekran, osilatör.

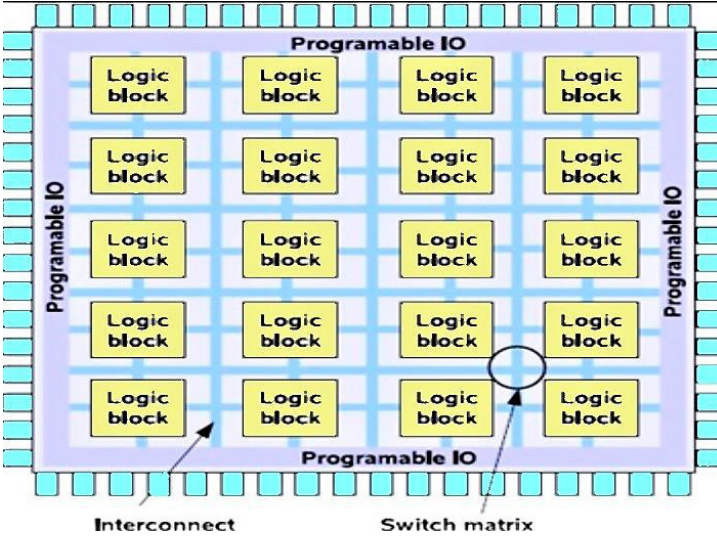


(a)



(b)

Şekil 1. FPGA'ların üstten görünümü: a) Altera Cyclone IV, b) Xilinx Kintex-7 [7,8]



Şekil 2. FPGA'ların iç yapısı [9,10]

#### 2.4. FPGA'ların Avantajları

İdeal bir sayısal devre mimarisinde olması beklenen özelliklerin birçoğu FPGA donanımında mevcuttur. FPGA'nın öne çıkan bazı avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır [11-13]:

- *Yüksek Performans:* FPGA'lar işlemleri çok hızlı gerçekleştirmek için gerekli olan yüksek veri boyutuna ve yeteneğine sahiptir. Aritmetik işlemleri başarıyla gerçekleştirebilirler.
- *Esnek Programlanabilme:* FPGA'ların yapacağı işlemlerin tanımlanması sabit bir şekilde yapılmamıştır. Oluşturulan HDL kodlarına göre mantık hücreleri arasındaki bağlantılar tasarımcı tarafından belirlenir. Dolayısıyla, esnek ve kolay güncellenebilir bir yapıya sahiptirler.
- *Paralel İşlem Yapabilme:* FPGA'lar, bir işleme başlamak için önceki işlemin bitmesini beklemeden aynı anda çok sayıda görevi yerine getirebilirler. Bu özellik FPGA'ları mikroişlemcilerden ayıran ve üstün kılan en önemli yeteneklerindedir.
- *Güvenilirlik:* FPGA'ların işletim sistemi kullanmayışları sayesinde kritik görevler için işlemci kuyruğunda bekleme riski yoktur. Komutlar paralel olarak işlenerek güvenlik riskleri en aza indirgenir.
- *Verimli Donanım Yapısı:* FPGA'ların içine çoğullayıcı gömülebilme, çok sayıda çipi, mantık kapısını ve bağlantı birimini içinde barındırabilme gibi özellikleri mevcuttur.
- *Ucuz Maliyet:* FPGA'lar üretim adedi arttıkça düşük maliyete geçebilir ve düşük bakım maliyetine sahip olma gibi avantajlara da sahiptir.

## 2.5. FPGA'ların Kullanım Alanları

Son yıllarda uygulamalarda FPGA donanımı popüler ve yaygın hale gelmiştir. Aşağıda FPGA'ların kullanıldığı başlıca alanlar ve üstlendikleri görevler özetlenmiştir [14, 15]:

*İletişim Araçlarında:* Kablolulu ve kablosuz haberleşme alanlarında paralel işlem gerektiren uygulamalarda kullanılır.

*Uydu Haberleşme ve Navigasyon Sistemlerinde:* Oluşturulacak algoritmaların daha hızlı veri işleme hızına olanak sağlayabilmesi sayesinde, yüksek kapasiteli veri iletimlerinde kullanılır.

*Radar Sistemlerinde:* Gerçek zamanlı verinin yüksek hızlarda alınıp işlenmesi için kullanılır.

*Sayısal Sinyal ve Görüntü İşlemede:* Aynı anda birden fazla görevi yerine getirebilme özelliği sayesinde, yüksek hız gerektiren sinyal ve görüntü işleme uygulamalarında kullanılır.

*Havacılık ve Savunma Sistemleri:* Yüksek hızda sinyal ve görüntü işleme yapabildiği ve dalga formu üretilebildiği için tercih edilir.

Ayrıca üstün özellikleri sayesinde, tıbbi görüntüleme sistemlerinde, kriptoloji uygulamalarında, endüstri ve otomotiv sektörlerinde, robotik sistemlerde, yapay zeka uygulamalarında, bulanık mantık işlemlerinde ve daha birçok alanda kullanılabilirler.

## 2.6. FPGA'ların Tasarım Süreçleri

FPGA kullanarak uygulama gerçekleştirmek için, donanımda bulunan bağlantıların ve mantık bloklarının çevredeki gerekli birimlerle birleştirilmesi ve hedefe uygun olarak tasarlanması gerekir. Tasarım için gerekli aşamalar ve tanımları sırasıyla aşağıda verilmiştir [15, 16]:

*Tasarım girişi:* Tasarım sürecinde öncelikle bir lojik devre fonksiyonu şematik çizim veya HDL kodlama kullanılarak bilgisayar ortamında tasarlanır. Böylece gerekli bileşenlerin davranışları ve yapısal tanımlamaları yapılarak, esnek ve kolay tasarımlar oluşturulabilir.

*Sentez:* Bu aşamada, mantıksal bloklar ve bu bloklar arasındaki bağlantılar sentez araçları aracılığıyla oluşturulur.

*İşlevsel benzetim:* Devrenin sentezlenme işlemi bittikten sonra işlevsel doğruluğunun incelenmesi gerekir. Bu aşamada herhangi bir hatanın tespit edilmesi halinde, tasarımda düzeltmeler yapılarak sentez ve benzetim adımlarının yenilenmesine ihtiyaç duyulur.

*Yerleştirme:* Yerleştirme araçları kullanılarak, bağlantı listesinde belirlenmiş olan mantıksal elemanların devre içindeki gerçek mantık öğelerine yerleşimi sağlanır.

*Zaman analizi ve benzetimi:* Yerleştirilme işlemi tamamlanan devrenin farklı bağlantı yolları arasındaki yayılım gecikmeleri, zaman analizi birimi ile tespit edilir. Yerleştirilmiş devrenin zamanlama ve doğruluk yönünden incelenmesi ise zaman benzetimi adımıdır. Şayet arzu edilen zaman gereksinimleri sağlanmamış ise tasarım sürecinin en başına dönülerek, hatayı düzeltmek için gereken değişiklikler yapılır. Bu işlem benzetim sonuçları yeterli oluncaya kadar devam eder.

*Programlandırma ve yapılandırma:* Tasarım sürecinin son aşamasında ise, hedeflenen devreyi oluşturmak için çeşitli donanımlar kullanılarak FPGA programlanır. Mantıksal öğeler istenilen şekilde yapılandırılır ve içerikleri belirlenir.

## 2.7. Gerekli Yazılımlar ve Donanım Tanımlama Dilleri

Altera firmasının ürettiği FPGA çeşitleriyle uygulamalar gerçekleştirmek için Quartus isimli yazılım, Xilinx firmasının ürettiği FPGA çeşitleriyle uygulamalar gerçekleştirmek için ise ISE Webpack isimli yazılım kullanılır [17,18]. Mantık kapılarının belirlenmesi, devrenin tasarım ve simulasyonunun yapılması, algoritma kodunun derlenmesi gibi işlemler bu arayüz yazılımlarının üzerinde gerek şematik çizimlerle gerekse de HDL dillerinden biri kullanılarak gerçekleştirilir. En yaygın kullanılan programlama dilleri Verilog ve VHDL'dir.

Verilog HDL; analog, sayısal veya karışık işaretli devrelerin tasarımı, doğrulanması ve yürütülmesi için kullanılan önemli bir dildir. C programlama diline yakın bir söz dizilimine sahiptir. Verilog tasarımında modüller vardır ve bu modüller arasında bir hiyerarşi bulunur. Kullanıcı, tasarım için uygulanması gereken algoritmaları alt modüller şeklinde oluşturur. Algoritmada belirtilen giriş-çıkış sinyallerinin yönleri ve boyutları bu modüllerin içinde yer alır. Tamamlanan alt modüllerin bir araya gelmesiyle 'ana modül' oluşur [19,20].

VHDL, 'Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language - Çok Yüksek Hızda Donanım Tanımlama Dili' ifadesinin kısaltmasıdır. FPGA donanımında kullanılan mantık birimlerinin davranışlarını tanımlamak ve sistemleri modellemek için tercih edilen yüksek seviyeli diğer bir programlama dilidir.

## 3. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, son birkaç on yılda kullanımı gittikçe yaygınlaşan FPGA donanımının kısaca tanıtımı yapıldı. Tarihsel gelişim sürecinden bahsedilerek, PLD ve ASIC gibi cihazlar ile FPGA'nın karşılaştırılması yapıldı. Donanımın iç ve dış yapısı detaylı bir şekilde anlatılarak, örnek görüntüler paylaşıldı. Öne çıkan avantajlar ve özellikler açıklanarak, yüksek hız gerektiren uygulamalarda FPGA kullanımının önemi

vurgulandı. Donanımın hangi alanlarda ve ne amaçla kullanıldığından bahsedildi. FPGA ile bir tasarım yapabilmek için gerekli olan aşamalar sırasıyla tanımlandı. Tasarım aşamalarının gerçekleşmesi için kullanılacak yazılım ve programlama dilleri açıklandı. Verilog ve VHDL dillerinden detaylı olarak bahsedildi.

Özetle, çalışmanın amacına uygun olarak FPGA donanımına genel bir bakış yapıldı. Derlenip paylaşılan bu bilgiler neticesinde, FPGA'nın öneminin anlaşılması amaçlandı. Çok önemli görevleri başarıyla gerçekleştirebilecek olan FPGA cihazı ile ilgili literatür taramalarının henüz istenilen düzeyde olmadığını düşünen yazar, araştırmacılar için kısa, öz ve faydalı bir kaynak sunmayı hedefledi. Bu konuyla ilgili yapılabilecek başka çalışmalarda, FPGA'ların kullanıldığı çeşitli uygulamaların gösterilmesi planlanmakta ve önerilmektedir. Önümüzdeki yıllarda FPGA cihazına olan ilginin daha da artacağı ve birçok uygulamada vazgeçilmez eleman olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Özçelik, F. (2012). “Görüntü İşleme Algoritmalarının FPGA Üzerinde Gerçeklenmesi,” Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü. Ankara.
- [2] Gacar, A. (2009). “FPGA Tabanlı Görüntü İşleme Arabirimi,” Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir.
- [3] Maxfield, C. (2004). “The Design Warrior’s Guide to FPGAs,” *Elseiver*. ISBN: 0-7506-7604-3
- [4] URL: <https://www.eejournal.com/article/20140225-rivalry>
- [5] Tekdur, O., (2012). “Sayısal Görüntü İyileştirme Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Bu Algoritmaların Gerçek Zamanlı Gömülü Sistemlerde Gerçeklenmesi,” Yüksek Lisans Tezi. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir.
- [6] Brown, S. & Rose, J. (1992). “Field Programmable Gate Arrays,” *Kluwer Academic Publishers*. ISBN: 0-7923-9248-5, USA.
- [7] Terasic Technologies, “Altera DE2-115 Development and Education Board User Manual”, 2018
- [8] “Xilinx 7 Series FPGAs Configuration User Guide”, 2018.
- [9] Villasenor, J. & Mangione-Smith, W.H. (1997). “Configurable computing,” *Sci. Amer.*, 276(6), pp. 66–71.
- [10] Shawahna, A., Sait, S.M. & El-Maleh, A. (2019) “FPGA-Based Accelerators of Deep Learning Networks for Learning and Classification: A Review,” *IEEE Access*, vol.7, pp. 7823–7859.
- [11] Wayne, W., (2004). “FPGA-Based System Design. Pearson Education,” ISBN: 8-1317-2465-4
- [12] Parnell, K. & Bryner, R. (2004). “Comparing and Contrasting FPGA and Microprocessor System Design and Development,” *Xilinx White Paper Series*. No. 213.
- [13] Celik, A.R. & Alkan, A. (2015). “Implementation of Basic Image Processing Applications by FPGA Hardware,” *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1(1), pp. 133
- [14] Dikmeşe, Ş. (2007). “Kablosuz Haberleşme Sistemlerinde FPGA Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kocaeli.
- [15] Celik, A.R. (2013). “Görüntü İşleme Algoritmalarının FPGA Donanımı Üzerinde Gerçeklenmesi,” Yüksek Lisans Tezi. Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kahramanmaraş.
- [16] Taşcı, M. (2011). “FPGA Kontrollü Robotik Göz,” Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir.

- [17] Altera Corporation, User Guide, “Introduction to the Quartus II Software”, 2011.
- [18] Xilinx ISE Design Suite Software Manuals and Help, 2012.
- [19] URL: <http://tr.wikipedia.org/wiki/Verilog>
- [20] Celik, A. R. (2015). “Image processing on Field Programmable Gate Arrays,” in Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015 23th (pp. 1501-1504). IEEE.ISO690





# Bölüm 11

## YENİDEN MODÜLASYON PASİF OPTİK AĞLARDA FARKLI KOD TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI



*Dr. Nisa Nacar ÇIKAN<sup>1</sup>*  
*Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ŞEKER<sup>2</sup>*

---

<sup>1</sup> **Dr. Nisa Nacar ÇIKAN**, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Adana, Türkiye e-mail: ncikan@cu.edu.tr , Orcid no: 0000-0002-9641-4616

<sup>2</sup> **Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ŞEKER**, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Hafik Kamer Örnek MYO, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Raylı Sistemler İşletmeciliği Programı, Sivas/Türkiye mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr ; Orcid no: 0000-0002-3793-8786



## 1. Giriş

İletişim ağlarının gerekliliği yıllar içinde zamanla artmıştır. İletişim ağlarının küresel toplum ve ekonomi üzerindeki hayati etkisi, dünyada giderek artış göstermiştir. Toplum ve şirketler sosyal medyayı aktif olarak kullanmaya başlamıştır. İnternet üzerinden iş ve eğitim faaliyetlerinin başlamasıyla birlikte bir dakika gibi kısa bir süre içinde veri iletimi ve alımında büyük bir artış olmaya başlamıştır. Özellikle nesnelere interneti uygulamaları gibi yeni teknolojiler veri trafiğini katlanarak arttıracaktır. Araştırmacılar, iş hizmetleri ve iletişim sağlayıcıları, büyük veri trafiğiyle başa çıkabilmek için sürekli olarak yeni çözümler üzerinde çalışıyorlar (Ibrahim, Abbas, Faizan, & Shaukat, 2010; Kazovsky, Cheng, Shaw, Gutierrez, & Wong, 2011; Lee et al., 2010; Michie, Kelly, McGeough, Karagiannopoulos, & Andonovic, 2009). Bu kapsamda, erişim ağları üzerine yoğun bir çalışma başlamıştır. Erişim ağları, iletişimi sağlayan şirketler ile kullanıcı uçlarını birbirine bağlar. Multimedya uygulamalarının artması, müşterilerin daha geniş bant genişliğine ve daha düşük maliyetli erişime ihtiyaç duymasına neden olmuştur. Dalga boyu bölmeli çoğullamalı pasif optik ağlar (DBBÇ POA), müşteriler için daha yüksek bant genişliği sağlar. Her kullanıcı için noktadan noktaya iletişim ve ayrı dalga boyları sağlamaktadır. Her bir kullanıcı için ayrı bir dalga boyu atanması fiberin daha verimli şekilde kullanılmasını gerektirmektedir. Böylece optik ağ birimlerinde (OAB) veri hızının artırılması hedeflenmiştir.

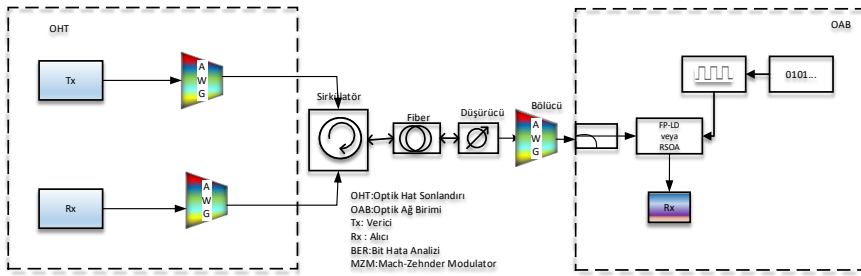
DBBÇ POA'ların ağ güvenliği, yönetim kolaylığı, geliştirilebilirliği ve protokol şeffaflığı gibi birçok avantajı vardır (N. N. Cikan & Aksoy, 2019; Prat & Valcarengi, 2020). Ayrıca yeniden modülasyon tekniğinin uygulanması kullanıcı tarafında ayrı dalga boyu kullanımı ihtiyacını ortadan kaldırarak, sistemin ekonomik olmasını sağlar. Yeniden modülasyon modelinde renksiz kaynakların kullanılması ayrıca sistemin maliyetini düşürecek ve aynı zamanda sistemi basitleştirecektir (Nisa Nacar Cikan & Aksoy, 2020a, 2020b).

Bu çalışmada, yeniden modülasyon modelinde optik hat terminali (OHT) tarafına beş farklı kodlama tekniği uygulanmıştır. Böylece, DBBÇ POA' larda yeniden modülasyon modeli uygulandığında hangi kodlama tekniğinin, optik iletişimde kullanılan önemli parametreler dikkate alınarak, daha iyi olduğu belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma dört bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde kısa bir tanıtım sunulmuştur. İkinci bölümde beş farklı kodlama tekniği anlatılmıştır ve DBBÇ POA' da yeniden modülasyon sistemine uygulanmıştır. Sonuçlar, bit hata analizi (BER) ve kalite faktörü (Q) parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde beş farklı kodlama tekniğinin karşılaştırma sonuçları verilmiş ve son bölüm sonuç bölümüdür.

## 2. Kodlama Teknikleri

Modülasyon formatı için uymamız gereken üç ilke vardır: ilk olarak, kompakt modülasyon sinyal spektrumu, spektrumun çalışma faktörünü ve grup hızının dağılım toleransını geliştirmede iyidir; ikincisi, doğrusal olmayan yüksek bir tolerans; üçüncü olarak, verici ve alıcının yapısı mümkün olduğu kadar basit olmalıdır(Li, Zhang, Duan, & Yin, 2012).

Uygulanan yeniden modülasyon şeması Şekil 1’de verilmiştir. Modülasyon sisteminde genellikle Mach Zehnder modülatörü ve sürekli dalga lazeri kullanılır. Sistem temek olarak üç bölümden oluşmaktadır. Optik hat birinde sürekli dalga lazeri (CW), 193.1 THz’de Mach-Zehnder modülatörü tarafından modüle edilir ve modülatör ile sinyalleri oluşturmak için farklı kodlama teknikleri kullanılmıştır. İndirme yönündeki sinyal 10 Gb/sn ve yükleme yönündeki sinyal 2,5 Gb/sn ‘dir. OHT’nin çıkışından gelen sinyal çift yönlü fiber üzerinden geçer ve güç ayırıcı ile sinyal ikiye bölünür. OAB’ ye gelen sinyalin bir kısmı alıcıya, diğer kısmı ise yeniden modülasyon için verici kısmına gider.

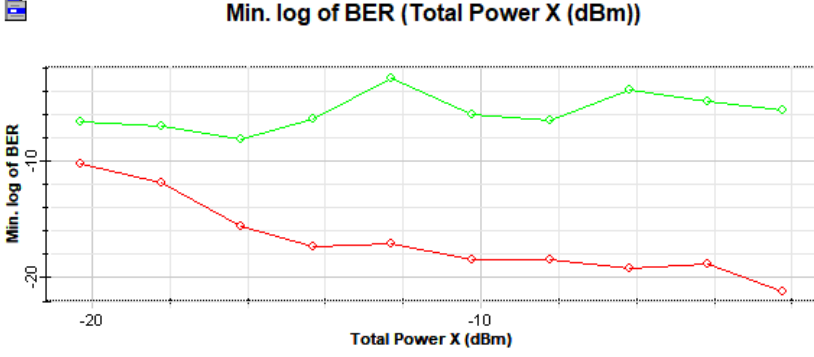


Şekil 1. Yeniden modülasyon sistemi

### 2.1 NRZ Kodlama

Hat kodlaması, ikili verileri temsil eden iletim için belirli bir modeldeki sembollerin düzenlenmesini tanımlar. Sıfıra dönüşsüz (NRZ) kodlaması, “1” değerinin pozitif voltajla ve “0” değerinin ise negatif voltajla temsil edildiği bir koddur. Tek kutuplu ve çift kutuplu olmak üzere iki şekilde kullanılabilir. Çift kutuplu NRZ’ de darbeler fazla enerjiye sahip olur. Bant genişliğinin sadece yarısını kullanır. Tek kutuplu NRZ’ de ise ‘1’ değeri pozitif voltaj, ‘0’ değeri ise DC hat ile ifade edilir.

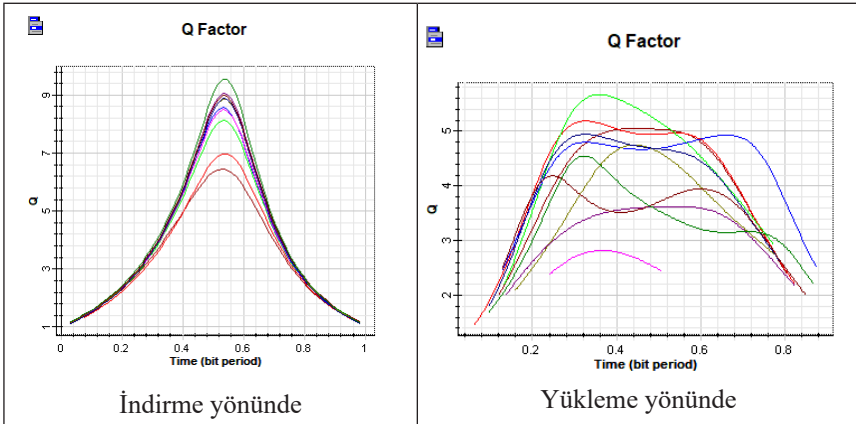
Simülasyon çalışma sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Enjeksiyon gücü -2 dBm ve 16 dBm aralığında değiştirilmiştir. Hem indirme hem de yükleme yönlerinde elde edilen minimum BER grafiği verilmiştir. Yükleme durumunda (yeşil çizgi) bozulmaların indirme yönüne oranla daha fazla olduğu görülmektedir. İndirme yönünde artan güç seviyesi ile birlikte sistem performansının arttığı görülmektedir. Kalite faktörü ise indirme yönünde yükleme yönüne göre daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 2. Toplam güce göre değişen Min BER grafiği

Tablo 1. Enjekte edilen güce göre değişen parametre sonuçları

Güç (dBm)	Q Faktörü	Min BER
-2	6,56007	5,32947e-011
0	7,06934	1,49694e-012
2	8,20009	2,32156e-016
4	8,64894	4,92131e-018
6	8,57125	9,64027e-018
8	8,93378	3,87608e-019
10	8,95105	3,25992e-019
12	9,05463	6,71073e-019
14	9,12368	1,34067e-020
16	9,62432	6,51664e-022

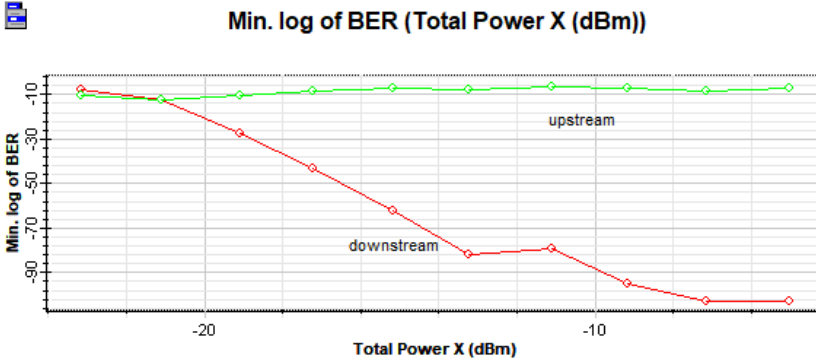


Şekil 3. İndirme ve yükleme yönlerinde kalite faktör grafiği

## 2.2 RZ Kodlama

Sıfıra dönüşlü (RZ) kodlamada, bit '1', bit süresinin yarısıdır, ikinci yarısında ise seviye sıfıra döner. Bir darbenin olmaması, tüm bit süresi boyunca bit '0' olduğunu gösterir. RZ kodlaması için iki kat bant genişliği gereklidir, çünkü veri aktarımı için yalnızca yarım bit süre alır.

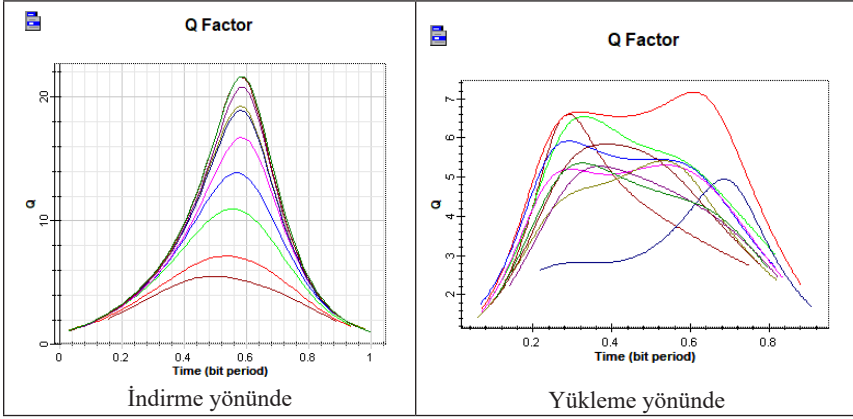
Sıfıra dönüşsüz kod uyguladığında elde edilen simülasyon sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Enjeksiyon gücü -2 dBm' den 16 dBm' e kadar arttırılmıştır. İndirme ve yükleme yönlerinde elde edilen minimum BER grafiği verilmiştir. Yükleme yönünde (yeşil çizgi), NRZ kodlama tekniğine kıyasla daha iyi sonuçlar vermektedir. İndirme yönünde artan güç seviyesi ile sistem performansı artar. Kalite faktörü indirme yönünde yükleme yönüne oranla daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 4. Toplam güce göre değişen Min BER grafiği

Tablo 2. Enjekte edilen güce göre değişen parametre sonuçları

Güç (dBm)	Q Faktörü	Min BER
-2	5,67101	1,35423e-008
0	7,26787	3,50637e-013
2	11,0399	2,38094e-017
4	13,9143	5,06511e-021
6	16,7368	7,06354e-063
8	19,2832	6,32763e-073
10	18,9552	3,95679e-080
12	20,7419	1,3506e-085
14	21,6051	1,45057e-87
16	21,6223	1,05504e-92

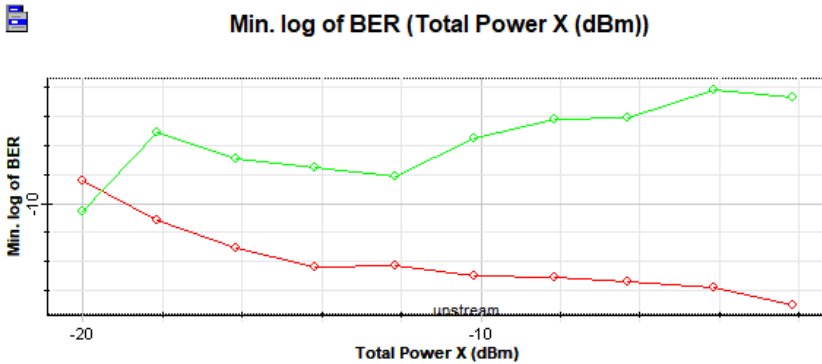


Şekil 5. İndirme ve yükleme yönlerinde kalite faktör grafiği

### 2.3 Duobinary Kodlama

Duobinary modülasyon, dispersiyona dirençlidir ve ayrıca uygulanması oldukça basittir. Bu modülasyonda,  $R/2$  Hz' den daha az bant genişliği kullanarak  $R$  bit/sn iletilmesi sağlanır(Lender, 1964; Proakis, 2001). Nyquist' in sonucu, semboller arası girişim olmadan  $R$  bit/sn pals iletmek için, iletilen darbenin gereken minimum bant genişliğinin  $R/2$  Hz olması gerektiğini açıklar.

Duobinary kodlama tekniği uygulandığında elde edilen simülasyon sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir. Enjekte edilen güç değeri  $-2$  dBm ve  $16$  dBm arasındadır. İndirme ve yükleme yönlerindeki minimum BER grafiği gösterilmiştir. Yükleme yönü için elde edilen sonuçlar (yeşil çizgi), NRZ ve RZ teknikleriyle karşılaştırıldığında çok daha fazla bozulma göstermektedir. İndirme yönünde ise artan güç seviyesi ile birlikte sistem performansın arttığı görülmektedir. Kalite faktörü indirme yönünde düzenli artış gösterirken, yükleme yönünde bozulmaktadır.

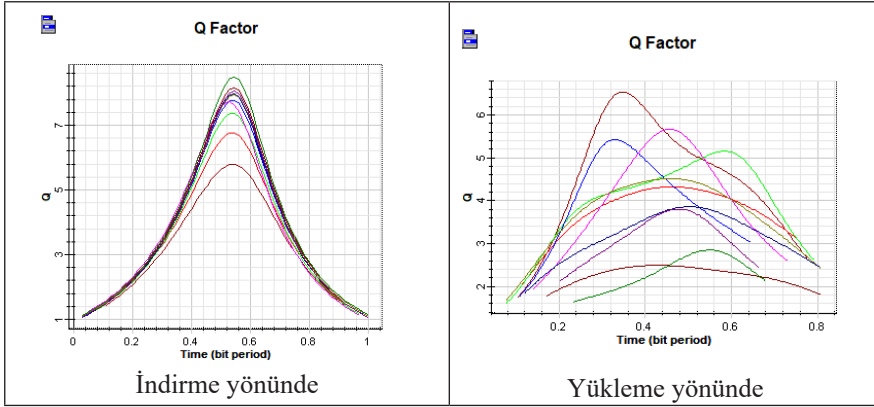


Şekil 6. Toplam güce göre değişen Min BER grafiği



Tablo 3. Enjekte edilen güce göre değişen parametre sonuçları

Güç (dBm)	Q Faktörü	Min BER
-2	5,8868	3,79542e-009
0	6,86218	6,72815e-012
2	7,4664	8,19904e-014
4	7,84619	4,07773e-015
6	7,80303	5,65677e-015
8	8,01883	1,00232e-015
10	8,03609	9,03556e-016
12	8,12241	4,28301e-016
14	8,23462	1,69989e-016
16	8,56262	1,02591e-017



Şekil 7. İndirme ve yükleme yönlerinde kalite faktör grafiği

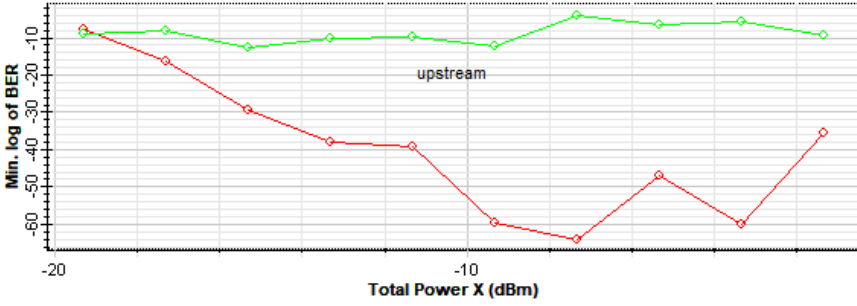
## 2.5 Manchester Kodlama

Manchester kodu, faz kodlama olarak da adlandırılan veri iletimi için kullanılan bir kodlama tekniğidir. Bu tür kodlamada, her bit minimum bir geçişe sahiptir ve her bitin süresi eşittir. DC bileşeni veri taşımadığından, bu kodlamada mevcut değildir. Manchester kodu, iletilen orijinal veri hızına ulaşmak için daha az bant genişliği tükettiğinden, tüm pratik uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Saat hızıyla doğru orantılı olarak sık hat voltajları sağlar.

Manchester kodu ile yapılan simülasyon çalışma sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. -2 dBm' den başlayarak 16 dBm' ye kadar güç enjekte edilmiştir. İndirme ve yükleme yönleri için elde edilen minimum BER grafiği verilmiştir. Her iki yönde de bozulmalar meydana gelmiştir. Sistem performansının, güç seviyesinin 10 dBm' ye kadar artmasıyla arttığı ve 10 dBm' nin üzerinde bozulmaya başladığı görülmüştür.



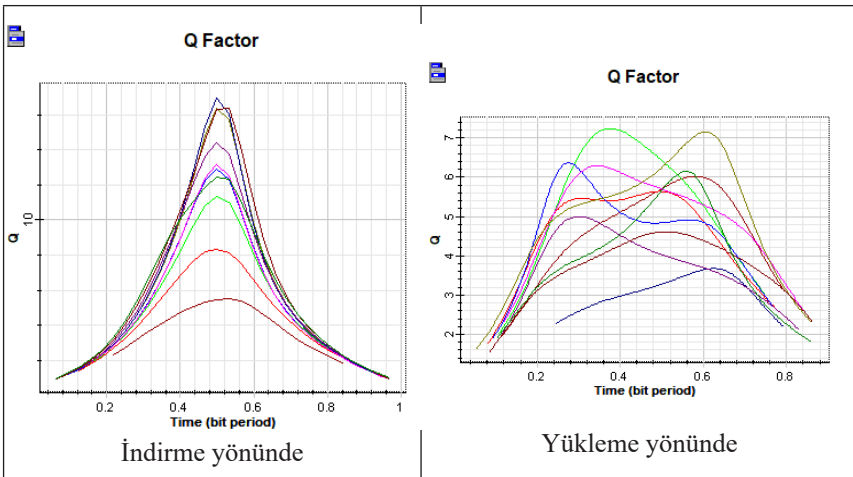
### Min. log of BER (Total Power X (dBm))



Şekil 8. Toplam güce göre değişen Min BER grafiği

Tablo 4. Enjekte edilen güce göre değişen parametre sonuçları

Güç (dBm)	Q Faktörü	Min BER
-2	5,62785	1,76439e-008
0	8,44178	3,11322e-017
2	11,4024	3,88518e-030
4	12,9734	1,55734e-038
6	13,2496	4,35106e-040
8	16,3916	2,16249e-060
10	17,013	6,25796e-065
12	14,4839	1,48439e-047
14	16,4347	1,0083e-060
16	12,5418	4,35103e-036

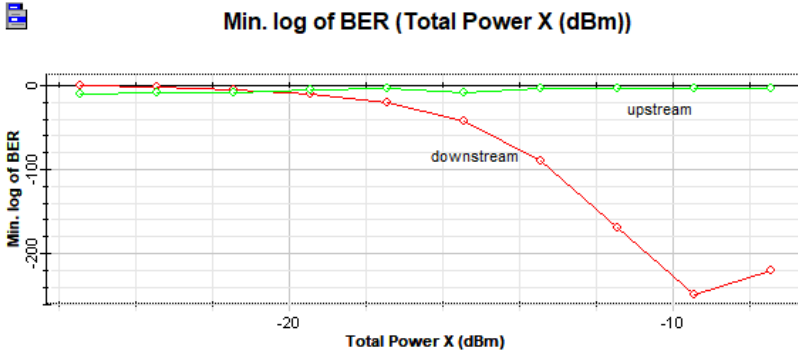


Şekil 9. İndirme ve yükleme yönlerinde kalite faktör grafiği

## 2.5 Alternate Mark Inversion Kodlama

Alternatif mark inversion (AMI) modülasyonunda, her bir darbenin komşu darbesine göre fazının tersine çevrilmesi şeklinde gerçekleşen bir faz modülasyonudur (Winzer & Essiambre, 2006; Zheng et al., 2010). AMI, bilgi faz tarafından değil, genlik modülasyonu yoluyla iletildiği için faz kaydırmalı anahtarlardan farklıdır. İlişkili faz modülasyonu, örneğin, hayalet darbelerin bastırılmasını ve alıcı duyarlılığında iyileşmeyi sağlar (Cheng & Conradi, 2002; Winzer et al., 2003).

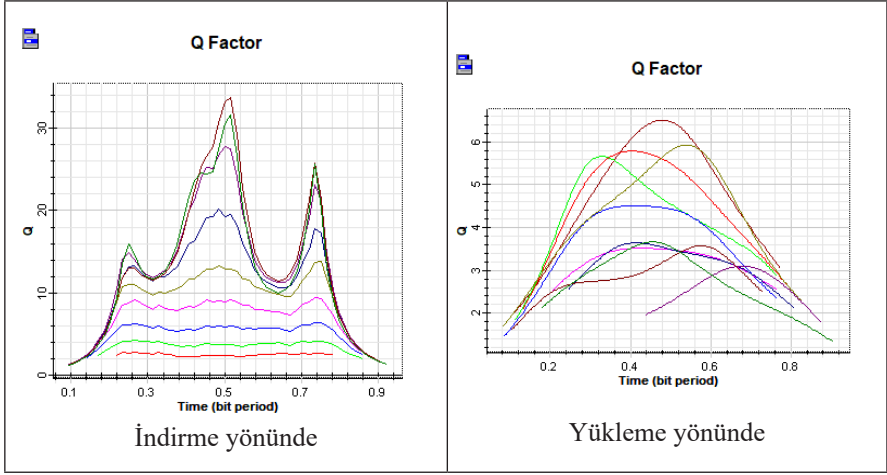
AMI kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları aşağıdaki grafiklerde gösterilmektedir. Enjeksiyon gücü -2 dBm' den 16 dBm' ye kadar çıkartılmıştır. Her iki yön için de (indirme ve yükleme) minimum BER grafiği verilmiştir. Her iki yön için artan güç seviyesi ile sistem performansı artar.



Şekil 10. Toplam güce göre değişen Min BER grafiği

Tablo 5. Enjekte edilen güce göre değişen parametre sonuçları

Güç (dBm)	Q Faktörü	Min BER
-2	0	1
0	3,02109	0,00245385
2	4,37626	1,16385e-005
4	6,55144	5,45416e-011
6	9,50347	1,91782e-021
8	13,9229	4,14581e-044
10	20,1895	1,1773e-090
12	21,7767	7,93668e-92
14	26,7671	5,91219e-102
16	30,661	4,09636e-113



Şekil 11. İndirme ve yükleme yönlerinde kalite faktör grafiği

### 3. Simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Bölüm 2' de elde edilen her bir kodlama tekniğine ait sonuçlar Tablo 1'de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RZ kodlama tekniği DBBÇ POA' larda yeniden modülasyon sistemine uygulandığında iyi sonuçlar vermektedir. Alternatif işaret çevirme, daha yüksek güç seviyeleri için başka bir umut verici kodlama tekniğidir. Daha düşük güç seviyeleri için, RZ ve Manchester tekniklerinin daha iyi olduğu ve daha yüksek güç seviyeleri için AMI' nin daha iyi olduğu görülmektedir. Çalışmanın sonuçları sadece farklı enjekte gücünde verilmiştir. Fiber uzunluğu gibi farklı parametreler göz önüne alınarak çalışma genişletilebilir.

Tablo 6. Beş kodlama tekniğinin kalite faktörlerinin karşılaştırılması

Güç (dBm)	Q Faktörü				
	NRZ	RZ	Manchester	DB	AMI
-2	6,56007	5,67101	5,62785	5,8868	0
0	7,06934	7,26787	8,44178	6,86218	3,02109
2	8,20009	11,0399	11,4024	7,4664	4,37626
4	8,64894	13,9143	12,9734	7,84619	6,55144
6	8,57125	16,7368	13,2496	7,80303	9,50347
8	8,93378	19,2832	16,3916	8,01883	13,9229
10	8,95105	18,9552	17,013	8,03609	20,1895
12	9,12368	20,7419	14,4839	8,12241	21,7767
14	9,05463	21,6051	16,4347	8,23462	26,7671
16	9,62432	21,6223	12,5418	8,56262	30,661

#### **4. Sonuç**

Bu çalışmada, DBBÇ POA' ya dayalı yeniden modülasyon sisteminin OHT tarafına NRZ, RZ, Manchester, DB ve AMI olmak üzere beş farklı kodlama tekniği uygulanmıştır. Bu beş kodlama tekniğinin karşılaştırması, BER ve Q faktör parametreleri dikkate alınarak yapılmıştır. Sistem hızı indirme yönünde 10 Gb/sn ve yükleme yönünde 2,5 Gb/sn' dir. Tüm performanslar için enjeksiyon gücü değerleri -2 dBm' den ve 16 dBm aralığında değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RZ kodlama tekniği düşük güç kaybı sağlamaktadır ve artan güç seviyesi ile AMI daha yüksek iletim kalitesi göstermektedir.

**KAYNAKLAR**

- Cheng, K. S., & Conradi, J. (2002). Reduction of pulse-to-pulse interaction using alternative RZ formats in 40-Gb/s systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(1), 98-100. doi:10.1109/68.974174
- Cikan, N. N., & Aksoy, M. (2019). A Review of Self-Seeded RSOA Based on WDM PON. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 42(1), 2-9. doi:10.1109/CJECE.2018.2872433
- Cikan, N. N., & Aksoy, M. (2020a). Data erasure analysis of FPLD based on remodulation bidirectional PON system. *Journal of Modern Optics*, 67(2), 139-145. doi:10.1080/09500340.2019.1699182
- Cikan, N. N., & Aksoy, M. (2020b). Data erasure in Fabry–Perot Diode Lasers: effects of facet reflectivity. *Journal of Modern Optics*, 67(6), 515-522. doi:10.1080/09500340.2020.1759716
- Ibrahim, U., Abbas, H., Faizan, R., & Shaukat, S. F. (2010, 18-19 Oct. 2010). *Performance evaluation of photoreceivers in WDM passive optical networks*. Paper presented at the 2010 6th International Conference on Emerging Technologies (ICET).
- Kazovsky, L. G., Cheng, N., Shaw, W. T., Gutierrez, D., & Wong, S. W. (2011). *Broadband Optical Access Networks*: Wiley.
- Lee, J. H., Cho, S., Lee, H., Jung, E., Yu, J., Kim, B., . . . Lee, S. S. (2010). First Commercial Deployment of a Colorless Gigabit WDM/TDM Hybrid PON System Using Remote Protocol Terminator. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 344-351. doi:10.1109/JLT.2009.2037979
- Lender, A. (1964). Correlative Digital Communication Techniques. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 12(4), 128-135. doi:10.1109/TCOM.1964.1088964
- Li, L., Zhang, J., Duan, D., & Yin, A. (2012). Analysis modulation formats of DQPSK in WDM-PON system. *Optik*, 123(22), 2050-2055. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.09.045
- Michie, C., Kelly, A. E., McGeough, J., Karagiannopoulos, S., & Andonovic, I. (2009). Optically amplified passive optical networks: a power budget analysis. *Journal of Optical Networking*, 8(4), 370-382. doi:10.1364/JON.8.000370
- Prat, J., & Valcarenghi, L. (2020). Emerging PON Technologies. In B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer, & Y. Zhao (Eds.), *Springer Handbook of Optical Networks* (pp. 871-912). Cham: Springer International Publishing.
- Proakis, J. G. (2001). *Digital Communications*: McGraw-Hill.
- Winzer, P. J., & Essiambre, R. (2006). Advanced Optical Modulation Formats. *Proceedings of the IEEE*, 94(5), 952-985. doi:10.1109/JPROC.2006.873438

- Winzer, P. J., Gnauck, A. H., Raybon, G., Chandrasekhar, S., Su, Y., & Leuthold, J. (2003). 40-Gb/s return-to-zero alternate-mark-inversion (RZ-AMI) transmission over 2000 km. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(5), 766-768. doi:10.1109/LPT.2003.809982
- Zheng, X., Mahgerefteh, D., Matsui, Y., Ye, X., Bu, V., McCallion, K., . . . Rigole, P. (2010, 21-25 March 2010). *Generation of RZ-AMI using a widely tuneable modulated grating Y-branch chirp managed laser*. Paper presented at the 2010 Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference.

# Bölüm 12

## FARKLI YAPAY SİNİR AĞI TOPOLOJİLERİ KULLANILARAK FOTOVOLTAİK ÜRETİM TAHMİNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI



*Mustafa ŞEKER<sup>1</sup>*

*Nisa Nacar ÇIKAN<sup>2</sup>*

---

1 **Assistant Prof.Dr. Mustafa ŞEKER**, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Hafik Kamer Örnek MYO. Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Raylı Sistemler İşletmeciliği Programı, Sivas/Türkiye. mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr ; Orcid no: 0000-0002-3793-8786

2 **Dr. Nisa Nacar ÇIKAN**, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Adana, Türkiye e-mail: ncikan@cu.edu.tr , Orcid no: 0000-0002-9641-4616





## 1. Giriş

Enerji insanlığın hayatını devam ettirebilmesi ve günlük ihtiyaçlarını sağlaması açısından önemli bir ihtiyaçtır. Günümüzde sanayi üretimindeki artışlar, şehirleşme ve nüfus artışı, gelişen teknoloji ile bu enerji ihtiyacı her geçen gün artış göstermektedir (Zaki Diab & Rezk, 2017). Bu enerjinin büyük kısmı fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu durum insanlık açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı rezerve sahip olması hem enerji maliyetlerini artırmakta hem de gelecekte enerji ihtiyacı sağlanabilirliği açısından ülkeler için ciddi bir endişe oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların kullanımında ortaya çıkan sera gazlarının ozon tabakasına verdiği zararlar ve küresel ısınmaya sağladığı düşünüldüğünde insanlığı hayatın devamlılığı açısından fosil yakıtlardan vazgeçmek zorunda kalmaktadır. Bu durum ülkelerin fosil yakıtlar yerine enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecekleri alternatif enerji kaynakları arayışına girmelerine yol açmıştır(Gosumbonggot, Nguyen, & Fujita, 2018)especially when Partial Shading happens, blockage makes PV received less irradiation and in sequence, the reduction of power generated occurs. Maximum power point tracking (MPPT. Ülkeler içerisinde buldukları enerji krizini aşmada rüzgâr, güneş, jeotermal enerji gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynakları yönelmiştir ve bu sayede hem enerji ihtiyaçlarını karşılamayı hem de yaşanabilir bir dünya oluşturmayı amaçlamaktadırlar(Ishaque, Salam, Amjad, & Mekhilef, 2012; Rezk, 2016; Rezk & Dousoky, 2016)wind and fuel cells. This system is used for supplying electrical energy to certain load demand in remote areas. Six different configurations were investigated and evaluated, namely, photovoltaic (PV. Diğer yenilenebilir enerji yöntemleri ile karşılaştırıldığında güneş enerjisi ve fotovoltaik sistemler, kurulabilir alanlarının fazla olması, daha az bakıma ve kullanılan ekipmanların uzun ömürlü olması ve dahası güneş gibi sonsuz bir enerji kaynağına sahip olması nedeni ile önemli bir avantaja sahiptir(Aygül, Cikan, Demirdelen, & Tümay, 2019).

Fotovoltaik (PV) sistemler %11-28 gibi düşük bir verime sahiptir(Aygül et al., 2019). Ayrıca PV sistemlerin çalışma performansı hücrelerin maruz kaldığı solar radyasyon miktarı ( $W/m^2$ ), ortam sıcaklığı, çalışma koşulları altındaki PV sıcaklığı, rüzgâr gibi birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle çevresel etkilerde dikkate alınarak PV sistemler için planlama ve enerji yönetimi sağlanmalıdır(Mekhtoup, 2014). Son yıllarda bilgisayar ve öğrenme algoritmalarında ortaya çıkan gelişmeler ile birlikte Yapay Sinir Ağı (YSA- Artificial Neural Network) tekniği planlama ve enerji yönetiminde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. YSA tekniğinin yüksek veri işleme hızına sahip olması, uygulamalarının yüksek maliyet içermemesi ve basit olması tahmin ve planlama çalışmalarında kullanımı oldukça popüler hale getirmiştir(Dias, F.M., Antunes, A., Mota, A.M., 2004).

Fotovoltaik sistemler için YSA uygulamaları birçok araştırmacı tarafından inceleme konusu olmuştur. Bora ve arkadaşları PV modüllerin çıkış gücünün YSA yardımı ile tahmin edilebileceğini göstermiştir (Bora, B., Gupta, K., Kumar, A., Renu, O.S., Dahiya, 2013). Ceylan ve arkadaşları ise gerçekleştirmiş olduğu çalışmasında YSA uygulaması yardımı ile PV panellerde modül sıcaklığının tahmin edilebileceğini belirlemiştir (Ceylan, I., Erkaymaz, E., Gedik, E., Gurel, A.E., 2014). Bazı çalışmalarda PV sistemlerin maruz kalacağı solar radyasyon miktarının belirlenmesinde YSA algoritmalarından faydalanılabileceğini göstermektedir (Behrang, M.A., Assareh, E., Ghanbarzadeh, A., Noghrehabadi, 2018; Benghanem, A.M., Mellit, A., Alamri, 2009; D., Elizondo, Hoogenboom, G., McClendon, 1994; Priya, S.S., Iqbal, 2015).

Genel olarak gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde PV sistemlerin çalışma performansının değerlendirilmesinde en belirleyici faktör olan sıcaklık ve solar radyasyonun modellenmesi üzerine YSA uygulamalarının kullanıldığı görülmektedir. Solar radyasyon güneşin birim alan başına yaymış olduğu ve elektromanyetik yayılım şeklinde iletilen güç olarak ifade edilir (Reis, R.J.D., Tiba, C., 2012). Uydular ile yapılan ölçümler dünya dışından gelen solar radyasyon miktarının kararlı bir yapıda olduğunu ve yaklaşık  $1366 \text{ W/m}^2$  değerine eşit olduğu kabul edilmektedir. Atmosferde meydana gelen meteorolojik olaylar ve atmosferdeki koruyucu maddenin ile etkileşime giren fotonların saçılması veya soğurulması ile bu değer farklılıklar göstermekte ve PV sistemlerin performans parametrelerinin belirlenmesinde en önemli faktörü oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, PV modüllerin çıkış gücünün tahmin edilmesinde farklı YSA metodolojilerin performansı değerlendirilmiştir. YSA yapısının tanımlanmasında giriş parametreleri PV performansını etkileyen en önemli faktörler olan solar radyasyon miktarı, modül sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve rüzgâr değişimi olarak seçilmiştir. Modül gücü ise tahmin edilen çıkış parametresi olarak tanımlanmıştır. Analizde, IEEE PES tarafından open data sets içerisinde sunulan PV generation verilerinden Petrolina FV1/ Enerq/USP sistemine ait (Weather\_Data\_Sao Paulo) 1-10 Haziran 2014 yılına ait kış verilerinden (Southeast of Brazil) faydalanılmıştır. YSA metodolojilerinin performansını değerlendirmek için; ileri yönlü çok katmanlı algılayıcı (Feed Forward ANN (FFANN)), Kaskat ileri yönlü algılayıcı (Cascad-Forward Backproagation Network) ve Elman tipi ileri yönlü algılayıcı (Elman Backproagation Network) yapıları kullanılarak PV modülün çıkış gücünün tahminindeki performansları karşılaştırılmıştır.

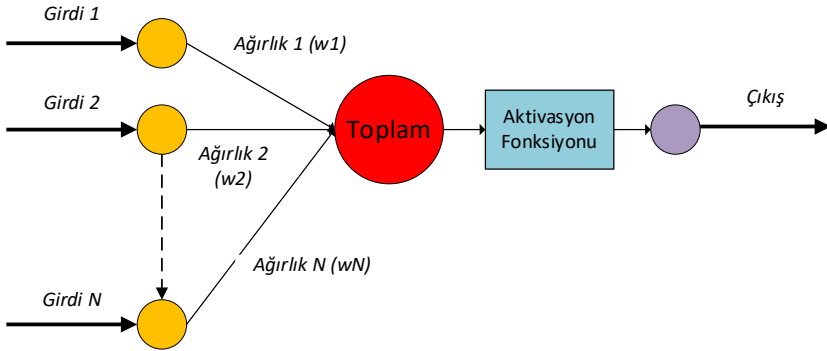
## 2. Yapay Sinir Ağı modelleri

YSA insan beyninin çalışmasından esinlenerek geliştirilmiştir (Basheer I.A., 2000; Graupe D., 2007) Bu çalışmada PV modülün çıkış gücünün tahmininde YSA modeli olarak ileri yönlü çok katmanlı algılayıcı

(Feed Forward ANN (FFANN)), Kaskat ileri yönlü algılayıcı (Cascad-Forward Backprogation Network) ve Elman tipi ileri yönlü algılayıcı (Elman Backprogation Network) yapıları kullanılmıştır. YSA yapısında giriş parametreleri ise dış sıcaklık, modül sıcaklığı, Solar radyasyon ve rüzgâr hızı olarak seçilmiştir.

## 2.1. İleri Yönlü Çok Katmanlı Algılayıcı (Feed-Forward ANN (FFANN))

YSA temel yapı olarak beş kısımdan oluşmaktadır. Bu beş yapıyı; girdiler ( $x_i$ ), ağırlıklar ( $w_i$ ), toplam fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkışlar temsil eder. Girdilerin her biri ağırlık ile çarpılarak elde edilen ürünler basitçe eşik değeri ile toplanır ve sonucu oluşturmak için aktivasyon fonksiyonu ile işlem yapılır ve çıkışı alınır. Bir yapay sinir hücresinin öğrenme yeteneği, seçilen öğrenme algoritması içerisinde ağırlıkların uygun bir şekilde ayarlanmasına bağlıdır(Cho, 2003). Bir YSA yapısını oluşturan temel sinir ağı gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur.

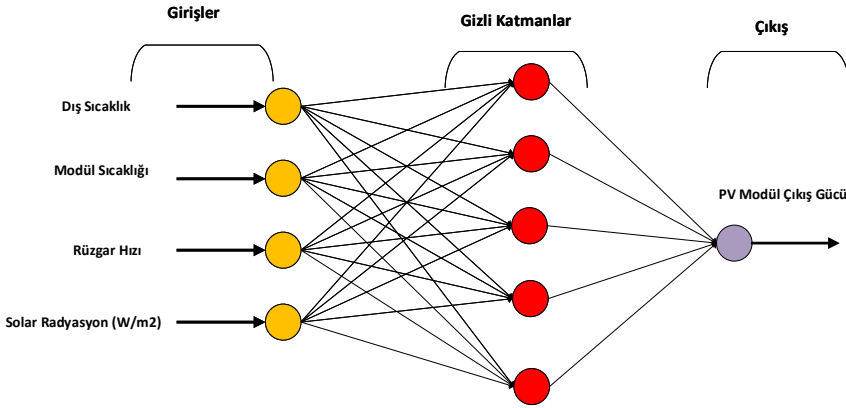


Şekil 1. Yapay Sinir Ağını oluşturan temel blok yapısı.

Bu çalışmada kullanılan 4 giriş, 5 ara katman ve bir çıkış parametresine bağımlı ileri yönlü YSA modeli Şekil 2’de sunulmuştur. Nöronların uygun transfer fonksiyonlarının belirlenmesinde denklem 1’de sunulan lojistik sigmoid transfer fonksiyonu kullanılmıştır. İkinci denklemde tanımlanan  $z_i$  ifadesi girişlerin toplam ağırlığını ifade etmektedir.  $x_j$  ifadesi j. nörondan direk olarak gelen sinyaldir.  $w_{ij}$  j. nörondan i. nörona direk olarak bağlanan ağırlıkları tanımlamaktadır.

$$f(z_i) = \frac{1}{1 + e^{-z_i}} \quad (1)$$

$$z_i = \sum_{j=1}^7 w_{i,j} x_j + \beta_i \quad (2)$$



Şekil 2. PV çıkış gücünün tahmininde kullanılan ileri yönlü çok katmanlı algılayıcı YSA topolojisi

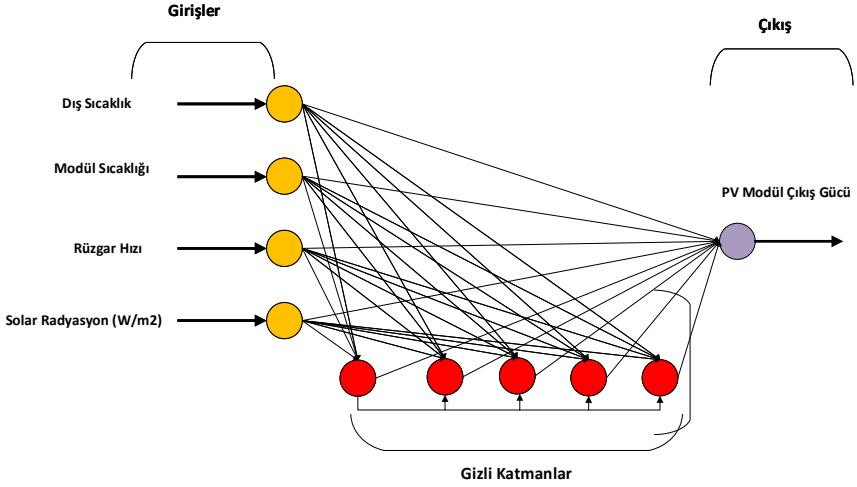
## 2.2. Kaskad ileri yönlü algılayıcı Ağı (Cascad-Forward Backpropagation Network)

Kaskad korelasyon mimarisine sahip YSA modeli Fahlman ve Lebiere tarafından geliştirilmiştir (Fahlman, 1990). Bu mimari yapının iki temel avantajı vardır. İlk olarak, bu mimari yapısında çok sayıda test verisinin olmasına gerek yoktur. İkinci olarak da çok katmanlı karmaşık problemlerin çözümünde ve yorumlanmasında oldukça yetenekli ve hızlıdır.

4 giriş, 5 ara katman ve 1 çıkışa sahip Kaskad ileri yönlü algılayıcı YSA modeli Şekil 3’de sunulmuştur. Bu yapıda eşik fonksiyonu, transfer fonksiyonu olarak kullanılır ve çıkışlar binary olarak sınıflandırma ile belirlenir. YSA çıkışı (3) denklemleri ile tanımlanır (Abid, F., Zouari, 2000).

$$y_j = \theta \left\{ \sum_{i=0}^n w_i^0 \cdot x_{ij} + \min[m, 1] \left[ \sum_{k=1}^m w_{n+k}^0 \cdot \theta \left( \sum_{i=0}^{n+k-1} w_i^k \cdot x_{ij} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

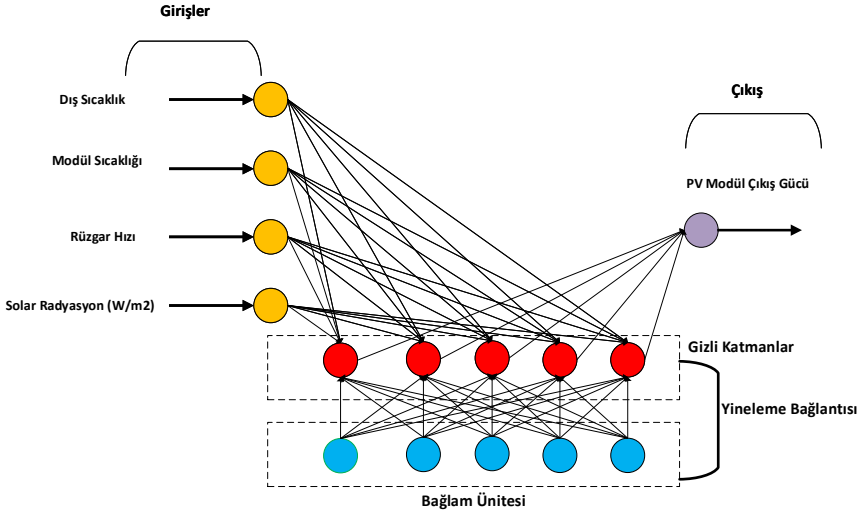
Bu ifadede; m gizli katman sayısı, k gizli katmanların indeks değeri ( $1 \leq k \leq m$ ), n ise seçilen oran katsayısıdır.



Şekil 3. PV çıkış gücünün tahmininde kullanılan kaskad ileri yönlü algılayıcı YSA topolojisi

### 2.3. Elman tipi algılayıcı Ağı (Elman Backpropagation Network)

Elman tipi algılayıcı YSA modeli Şekil 4’de gösterilmiştir (Elman, 1990) . Ağ yapısı birinci kat 4 giriş, 5 ara katman, bir bağlama katmanı ve 1 çıkış katmanı olarak tanımlanmıştır. Bu yapıda gizli katmanlar ve bağlam ünitesi arasında yineleme bağıntısı vardır. Bağlam ünitesi ve gizli katmanlar eşit sayıda bağlantı içerir ve her yapı birbiri ile bağlantılıdır. Bağlam ünitesi gizli katman birimlerinin çıktılarının depolanmasını izin verir.



Şekil 4. Elman tipi ileri yönlü algılayıcı YSA topolojisi.

Bu nedenle yineleme bağlantısı gizli katmanlardaki bilgiyi birden çok zaman adımında yeniden getirmeye izin verir. Bu sayede girdi ve hedef arasındaki zamansal verilerin birbirleri ile bağlantı kurmasına izin verilir. Tekrarlayan bağlantılarında içerik birimleri tarafından sağlanan doğal bir dinamik (veya uyarlanabilir) belleğe sahiptir. burada ağırlık çıkışı yalnızca bağlantı ağırlıklarına ve mevcut giriş sinyaline değil, aynı zamanda aşağıdaki gibi ağırlık önceki durumlarına da bağlıdır (Coulibaly, Anctil, Aravena, & Bobée, 2001):

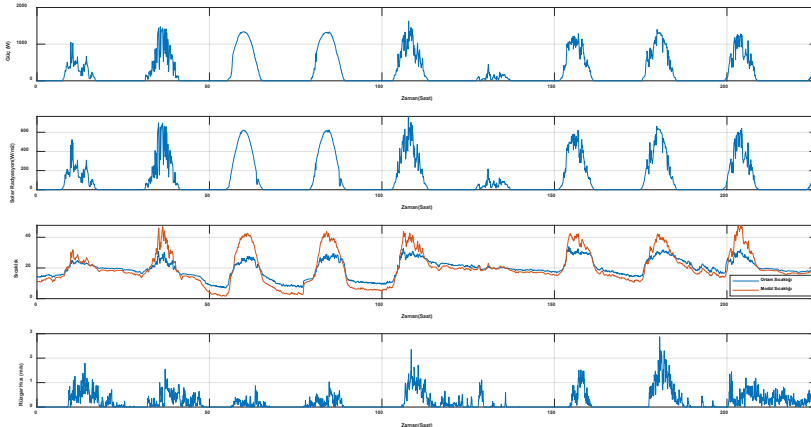
$$y_j = A \cdot x'(t) \quad (4)$$

$$x'(t) = G \cdot [W_h \cdot x'(t-1) + W_{ho} \cdot x'(t-1)] \quad (5)$$

Bu ifade, G gizli katmanların lojistik fonksiyon karakteristiğini göstermektedir.  $x'(t)$ , t zamanında gizli katmanların çıkışıdır.  $X(t)$  giriş vektörüdür.  $W_h$  gizli katmanların ağırlıklarını,  $W_{ho}$  ifadesi ise giriş noktalarına bağlanan gizli birimlerin ağırlık matrisini ifade etmektedir.

### 3. Bulgular

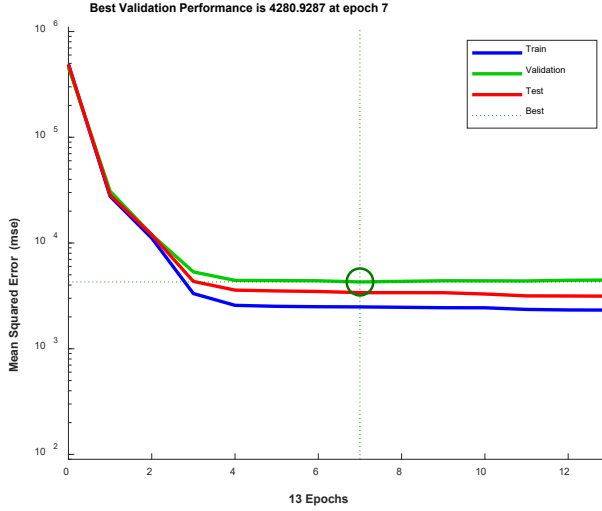
Bölüm 2’de sunulan YSA topolojileri kullanılarak eğitimler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Giriş parametreleri, Solar radyasyon miktarı, dış ortam sıcaklığı, modül sıcaklığı ve rüzgar hızı olarak alınmıştır. YSA çıkışı ise modül çıkış gücü olarak belirlenmiştir. YSA eğitiminde Levenberg-Marquardt (LM) geri yayılımı kullanılmıştır. Analizde IEEE PES tarafından open data sets olarak sunulan PV generation verilerinden 2,550 kWp güce sahip Petrolina FV1/Enerq/USP sistemine ait 1-10 Haziran 2014 tarihleri aralığındaki kış veri seti (Southeast of Brazil) kullanılmıştır (Fernandes et al., 2016). 1728 örnek eğitim verisi için kullanılırken 996 örnek ise test verisi olarak tanımlanmıştır. YSA eğitiminde kullanılan veri kümeleri grafiksel olarak Şekil 5’de gösterilmiştir.



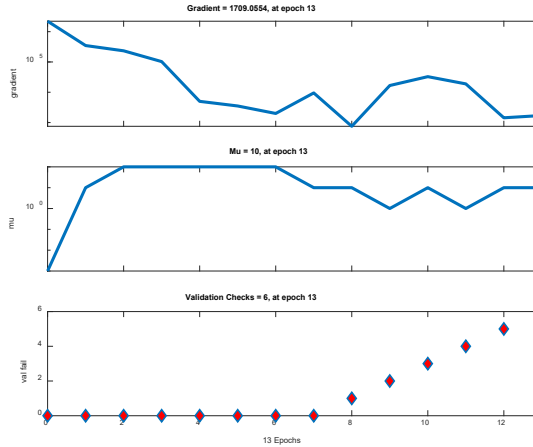
Şekil 5. YSA eğitim ve test işlemlerinde kullanılan veri kümelerinin zamana bağlı değişimi.

### 3.1. İleri Yönlü Çok Katmanlı Algılayıcı YSA yapısı ile edilen test sonuçları

İleri yönlü çok katmanlı algılayıcı (İYÇKA) YSA modeli ile gerçekleştirilen analizi sonucunda, elde edilen doğrulama performansı ve en uygun duruma ulaşmak için YSA'nın eğitim durumu sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. En iyi durum için ölçülen ve tahmin edilen Güç çıkışı arasındaki regresyon analizi ise Şekil 8'da sunulmuştur.

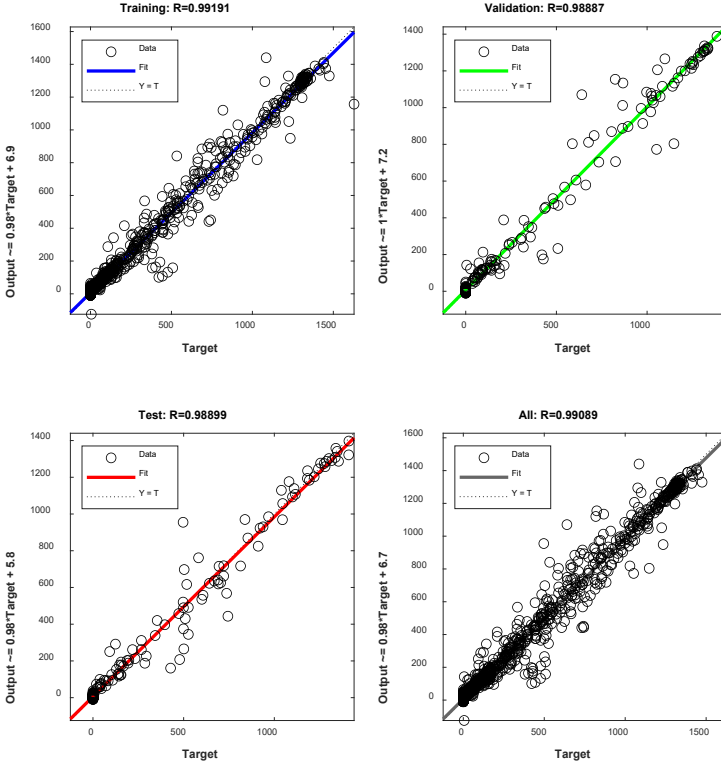


Şekil 6. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın Kare ortalama Hata (KOH) performansı



Şekil 7. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın eğitim durumu

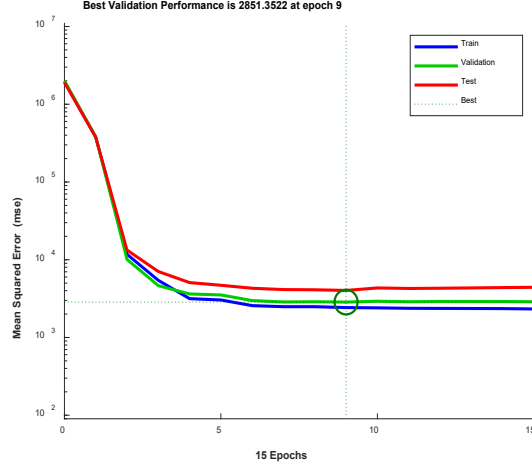




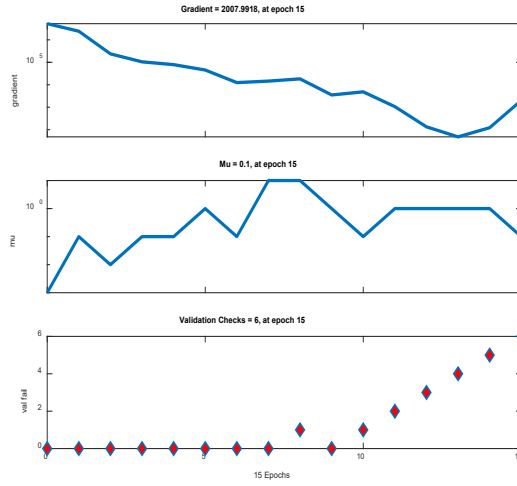
Şekil 8. En iyi uyum için ölçülen ve tahmin edilen Güç çıkışı arasındaki regresyon analizinin karşılaştırılması.

### 3.2. Kaskad ileri yönlü algılayıcı (KİYA) YSA yapısı ile elde edilen test sonuçları

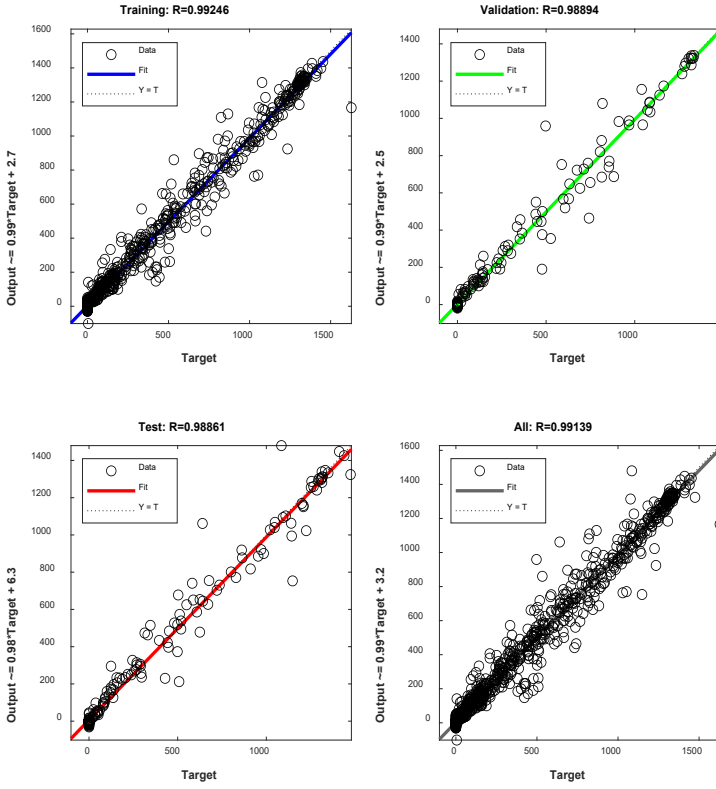
Kaskad ileri yönlü çok katmanlı algılayıcı YSA modeli ile gerçekleştirilen analizi sonucunda, elde edilen doğrulama performansı ve en uygun duruma ulaşmak için YSA'nın eğitim durumu sırası ile Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. En iyi durum için ölçülen ve tahmin edilen Güç çıkışı arasındaki regresyon analizi ise Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 9. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın Kare ortalama Hata (KOH) performansı



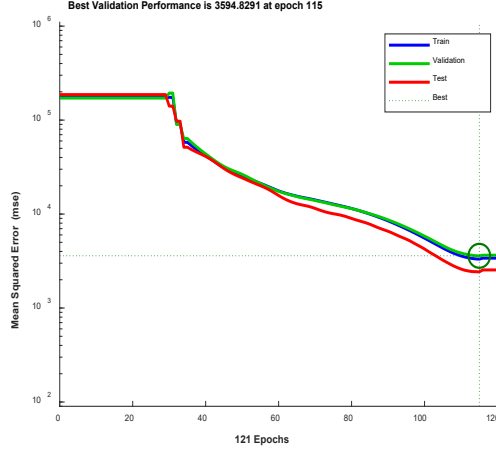
Şekil 10. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın eğitim durumu



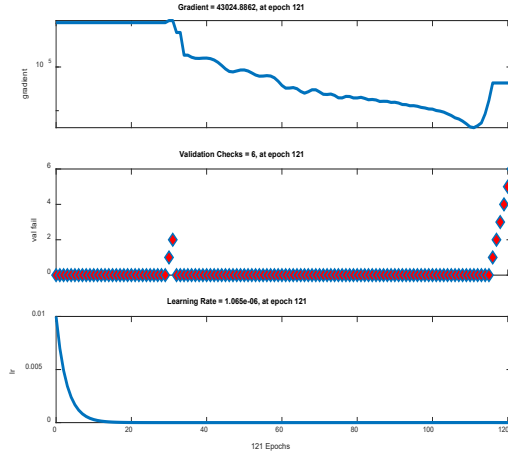
Şekil 11. En iyi uyum için ölçülen ve tahmin edilen Güç çıkışı arasındaki regresyon analizinin karşılaştırılması.

### 3.3. Elman Tipi Algılayıcı YSA Modeli ile elde edilen Test Sonuçları

Elman tipi algılayıcı YSA modeli ile gerçekleştirilen analizi sonucunda, elde edilen doğrulama performansı ve en uygun duruma ulaşmak için YSA'nın eğitim durumu sırası ile Şekil 12 ve Şekil 13'da gösterilmiştir.



Şekil 12. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın Kare ortalama Hata (KOH) performansı



Şekil 13. Tahmin edilen Güç çıkışı için YSA'nın eğitim durumu

### 3.4. Test Sonuçlarının İstatistiksel Olarak Değerlendirilmesi

Bu Çalışmada, YSA ile tahmin edilen Güç çıkış değerlerinin, ölçülen Güç çıkış değerleri ile istatistiksel olarak uygunluğunu belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) kullanılarak incelenmiştir. Belirlilik katsayısı, örnek veriler kullanılarak tahmin yolu ile elde edilen örneklem eğrisinin gerçek değerlere ne kadar uyduğunu ölçmek amacı ile kullanılır.

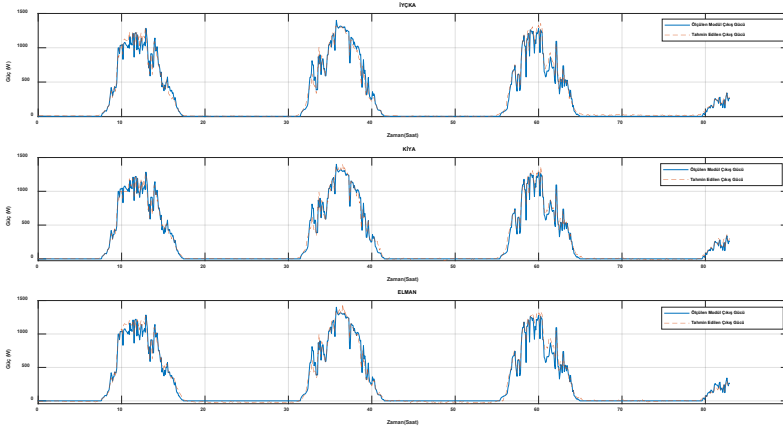
$R^2$  ifadesi hesaplamada kullanılan Pearson ürün momenti korelasyon katsayısı olan  $r$  değeri ile elde edilir. Bu ifadenin karesi alınarak  $R^2$  değeri hesaplanmış olur.  $R^2$  ifadesinin matematiksel denklemi (4) ile ifade edilir.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

Bu ifadede,  $\hat{y}$  model tarafından  $x_i$  için tahmin edilen  $y$  değeridir.  $y$  değerleri tarafından gözlemlenen verilerin ortalamasıdır. Sunulan YSA modelleri için hesaplanan belirlilik katsayıları ( $R^2$  değerleri) Tablo 1’de sunulmuştur. Test verilerine bağlı elde edilen tahmin sonuçları ise grafiksel olarak Şekil 14’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Ölçülen ve tahmin edilen modül çıkış güçlerinin  $R^2$  testi ile karşılaştırılması.

	<b>İYÇKA</b>	<b>KİYA</b>	<b>ELMAN</b>
<b><math>R^2</math></b>	<b>0,9777</b>	<b>0,9760</b>	<b>0,9784</b>



**Şekil 14.** YSA modelleri ile Ölçülen ve Tahmin edilen çıkış güçlerinin değişimi.

#### 4. Sonuçlar

PV sistemlerin üretim tahmini yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanılabilmesi açısından oldukça önemli bir konudur. Bu çalışmada PV modülün çıkış gücünün tahmininde farklı YSA modellerinin uygulanabilirliği ve performansları test edilmiştir. Çalışmada YSA modeli olarak ileri yönlü çok katmanlı algılayıcı (Feed Forward ANN (FFANN)), Kaskat ileri yönlü algılayıcı (Cascad-Forward Backproagation Network) ve Elman tipi ileri yönlü algılayıcı (Elman Backproagation Network) yapıları kullanılmıştır. YSA modelinde giriş parametreleri PV sistemin performansını etkileyen en önemli faktörler olan panel sıcaklığı, ortam sıcaklığı, PV modülün maruz kaldığı solar radyasyon miktarı ve rüzgâr hızı olarak seçilmiştir. Çıkış parametresi olarak da modülün ürettiği güç alınmıştır. Elde edilen sonuçlar sunulan üç modelde verilen giriş

parametrelerine bağlı olarak PV modül gücünün %97' nin üzerinde bir doğruluk sağladığını göstermektedir.  $R^2$  değerine göre Elman tipi YSA modelinin doğruluk oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Giriş değişken parametrelerinin sayısı ve veri eğitim kümesi artırılarak daha yüksek doğrulukta tahmin sonuçları elde edilebilir. Sunulan yaklaşım PV sistemlerin analizinde ihtiyaç duyulabilecek farklı çıkış parametreleri tahmini içinde kullanılabilir.

## KAYNAKÇA

- Abid, F., Zouari, A. (2000). Financial Distress prediction using neural networks: The Tunisian firms experience (pp. 399–406). Spain: International Conference on Modeling and Simulation.
- Aygül, K., Cikan, M., Demirdelen, T., & Tumay, M. (2019). Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–19. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1677818>
- Basheer I.A., H. M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and Application. *Journal of Microbiological Methods*, 43, 3–31.
- Behrang, M.A., Assareh, E., Ghanbarzadeh, A., Noghrehabadi, A. R. (2018). The potetial of different artificial neural network (ANN) techniques in daily global so-lar radiation modelling. In *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*.
- Benghanem, A.M., Mellit, A., Alamri, S. N. (2009). ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: A case study,. *Energy Convers. Manag.*, 50(7), 1644–1655.
- Bora. B., Gupta. K., Kumar, A., Renu, O.S., Dahiya, R. (2013). No Title. In *4th International Conference on Advances in Energy Researche*.
- Ceylan, I., ErKaymaz, E., Gedik, E., Gurel, A.E. (2014). The prediction of photovoltaic module temperature with artificial neural network. *Case Study Therm. Eng.*, 3, 11–20.
- Cho. (2003). Comparison of three different approaches to tourist arrival forecasting. *Tourism Management*, 24, 323–330.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., & Bobée, B. (2001). Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research*, 37(4), 885–896. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2000WR900368>
- D., Elizondo, Hoogenboom, G., McClendon, R. W. (1994). Development of Neural network modl to predict daily solar radiation. *Agric Forest Meteorol*, 71, 115–132.
- Dias, F.M., Antunes, A., Mota, A.M. (2004). Artificial Neural Network: A rewiev of commercial hardware. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 17(8), 945–952.
- Elman, J. . (1990). Finding Structure in Time. *Conginitive Sci.*, 14, 179–211.
- Fahlman, S.E., L. F. F. (1990). The Cascade-Correlation Learning Architecture. *Advances in Neural Information System*, 2, 524–532.
- Fernandes, F., Morais, H., Garcia, V. V., Gomes, L., Vale, Z., & Kagan, N. (2016). Dynamic loads and micro-generation method for a House Management System. *Clemson University Power Systems Conference, PSC 2016*, (318912), 0–6. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/PSC.2016.7462829>

- Gosumbonggot, J., Nguyen, D. D., & Fujita, G. (2018). Partial Shading and Global Maximum Power Point Detections Enhancing MPPT for Photovoltaic Systems Operated in Shading Condition. *Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018*, (1), 1–6. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/UPEC.2018.8541880>
- Graupe D. (2007). *Principles of artificial neural networks* (2th ed.). advanced series on circuits and systems, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., & Mekhilef, S. (2012). An improved particle swarm optimization (PSO)-based MPPT for PV with reduced steady-state oscillation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(8), 3627–3638. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185713>
- Mekhtoup, F.B.S. (2014). PV cell temperature/PV output Relationships Homer Methodology Calculation. *IpcO*, 2(1), 1–12.
- Priya, S.S., Iqbal, M. H. (2015). Solar irradiance prediction using Artificial Neural Network. *International Journal of Computer Application*, 116(16), 28–31.
- Reis, R.J.D., Tiba, C. (2012). Atlas soalrimetrico de minas gerais. *Companhia Energetica de Minas Gerais.*, 2.
- Rezk, H. (2016). A comprehensive sizing methodology for stand-alone battery-less photovoltaic water pumping system under the Egyptian climate. *Cogent Engineering*, 3(1), 1–12. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1242110>
- Rezk, H., & Dousoky, G. M. (2016). Technical and economic analysis of different configurations of stand-alone hybrid renewable power systems – A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 941–953. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.023>
- Zaki Diab, A. A., & Rezk, H. (2017). Global MPPT based on flower pollination and differential evolution algorithms to mitigate partial shading in building integrated PV system. *Solar Energy*, 157, 171–186. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.024>





# Bölüm 13

## FARKLI BİYOMETRİ ÖZELLİKLERİ İLE CİNSİYET TANIMLAMA ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALARIN İNCELENMESİ



*Öğr.Gör. Olcay PALTA<sup>1</sup>*



## 1. GİRİŞ

Dijital teknolojilerin daha yoğun kullanıldığı bu dönemde, bilgi teknolojilerinin işleme gücü ve hızından yararlanılarak gerçekleştirilen görüntü işleme teknikleri, biyometri farklılıkları kullanarak, kimlik tespiti uygulamalarının, gelecek dönemde daha da fazla önem arz edeceği bilinmektedir.

Görüntü işleme tekniğine, görsel verileri etki altında bırakarak çıkan sonuçların analizi ve bu analizlerden çıkarım yapma işlemi diyebiliriz. Görüntü işleme süreci, farklı özellik ve koşullardaki ortamlardan kamera ya da tarayıcı yardımıyla elde edilen ham görüntülerin bir takım işleme tabi tutularak temizlenmesi, filtrelenmesi, ihtiyaç görülen alanlarının belirlenmesi, dönüşüm aşamalarından geçirilmesi gibi ayırt edici özelliklerinin elde edilmesi ve bu özelliklerin sınıflandırılmasını içermektedir.

Biyometri; bireyleri birbirinden ayıran ölçeklenebilir biyolojik veya davranışsal karakteristiklerin kimlik tespitinde belirleyici özellikleridir.

Biyometri farklılığı ise, bireyleri biyolojik, fiziksel ve davranışsal özellikleriyle diğer bireylerden ayıran, her birey için farklılık gösteren özelliklerdir. Parmak izi, avuç içi izi, iris, çehre(yüz), DNA, diş yapısı, ses, imza, yazı yazarken ki kalem veya tuş takımı kullanım şekli vb. özellikler bireyin, kişiye özel karakteristiklerini yansıtır.

Biyometri çalışmaları kişiye ait verileri kullandığından oldukça ilgi görmüş ve verimliliğinin artırılması için birçok algoritmalar geliştirilmiştir [1].

Görüntü işleme teknikleriyle, biyometri özellik farklılıklarından, bireyin cinsiyeti, yaşı, kalem kullandığı eli, davranışı gibi tanımlayıcılar tespit edilmektedir. Bunlardan cinsiyet belirleme de ise, bir fotoğraf veya video üzerinden bireyin yüz hatları, vücut hareketleri ve tepkileri, konuşma davranışından alınan ses sinyali, diş yapısı, iskelet yapısı veya taratılmış parmak izi, avuç içi, imza, el yazısı gibi bir takım biyometri ölçümler kullanılmaktadır.

Görüntü işleme genel olarak, ön işleme, öznelik çıkarım ve sınıflandırma aşamalarından oluşmaktadır.



Şekil 1. Görüntü işleme temel aşamaları

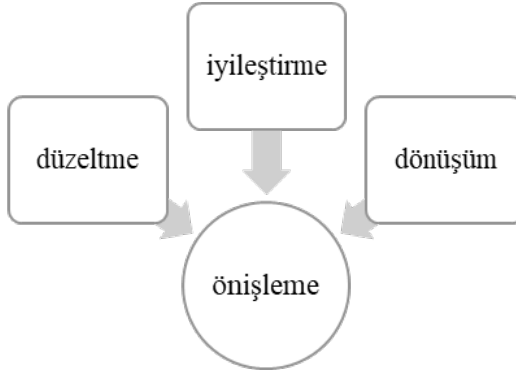
## 2. GÖRÜNTÜ İŞLEME TEMEL AŞAMALARI

### 2.1. Önışleme

Sayısal imaj girdisinin, programlar yardımı ile incelenip sayısal olarak yorum yapılmak istendiğinde imgenin öncelikle amaca en iyi şekilde hizmet etmesi yani önışlemlerden geçirilmesi gerekir.

Elde edilen imaj girdisi bir ön işlemeden geçirilerek, analiz çalışmaları için hazır hale getirilir [2].

Görüntü verisini düzeltme (Restorasyon), daha iyi görsel yorumlama için iyileştirme, görüntüden yeni görüntü elde edilebilmesini sağlayan dönüşüm işlemleri, önışleme sürecinin alt aşamalarıdır [3].



Şekil 2.1. Önışleme alt aşamaları

### 2.2. Öznitelik Çıkarımı

Ön işleme sonrası istenilen düzeyde düzenlenen imajların, aydınlatma, bakış yönü gibi etkiler altında koşulları değişsede değişmeyen yapısal biyomedri özellikleri bulmayı amaçlamaktadır. Değişmeyen biyometri öznitelikler tespit edilerek görüntüden çıkarım yapma sağlanır [4].

Öznitelik çıkartımı, imge sınıflandırma araçlarında en önemli ve belirleyici aşamadır. Bu aşamada veriyi doğrulayacak, mümkün oldukça az boyutlu, öznitelikler belirlenmeye çalışılır. Öz niteliklerin belirleyici olması, sınıflandırma aşamasının başarısını doğrudan etkileyen en önemli adımdır [3]. Bu aşamanın otomatik teşhis sistemlerinde çok önemli bir yeri vardır. İyi karakterizasyon için güçlü vurgular gereklidir [5].

Bir biyometri veri üzerinde yer alan en önemli bilgilerin ortaya çıkarılması, bu bilgilerin uygun bir şekilde sayısallaştırılması ve tanıma olayının, benzer şekilde gerçekleştirilmiş bireyler üzerinde uygulanabilmesi hedeflenmektedir [6].

Veriden öznitelik çıkarmanın üç amacı vardır.

- Sınıflama süresini en aza indirmek,
- İşlem görecekle ve yorumlanacak veri miktarını en aza indirmek,
- Tanıma ve tespitin güvenilirlik katsayısını artırmaktır [7].

### 2.3. Sınıflandırma

Bireyi tanımadaki kullanılacak olan öznitelik kümesini çıkaran ve bireyi temsil eden veri kümelerinin daha önceden aynı koşullarla elde edilip veri tabanına aktarılmış veri kümesi arasında karşılaştırma yapan bir tanımlama, onaylama sonucu sınıflandırma sistemi olarak tarif edilebilmektedir [8]. Ön işlem görmüş ve öznitelikleri çıkarılmış verinin, önceden belirlenen çıkarımlarla oluşan veri ile karşılaştırılarak sınıflama işlemi gerçekleşir [1]. Bir diğer deyişle, üyesi olarak bilinen, gözlemleri içeren bir eğitim seti bütününde, yeni bir gözlemin ait olduğu grubu tanımlamasıdır [9].

## 3. FARKLI BİYOMETRİ ÖZELLİKLERİ İLE CİNSİYET TANIMLAMA

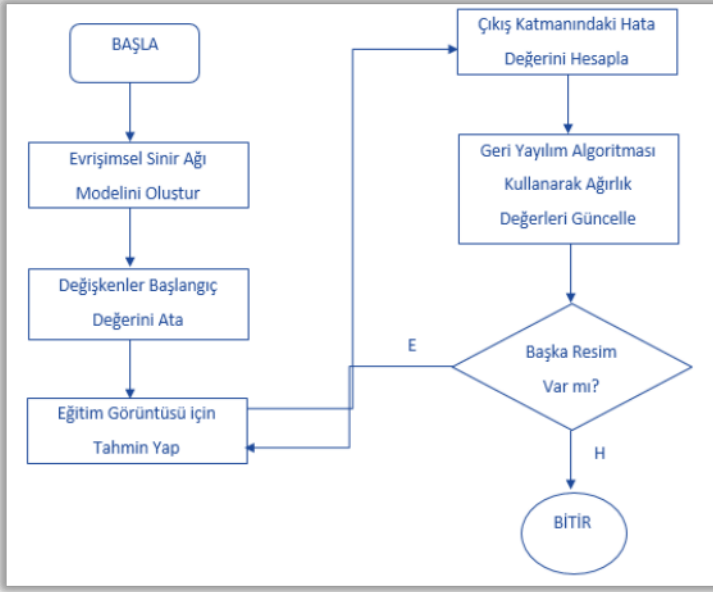
### 3.1. Yüz Tanımlama İle Cinsiyet Tespiti

Yüz belirleme, kimlik tanıma, doğrulama ve tespit etme, yüz şeklinin tamamındaki farklılıkları yansıtan genel parametrelerin ve görüntü segmentlerindeki farklılıkları yansıtan bölgesel parametrelerin belirlenmesi ile yapılır.

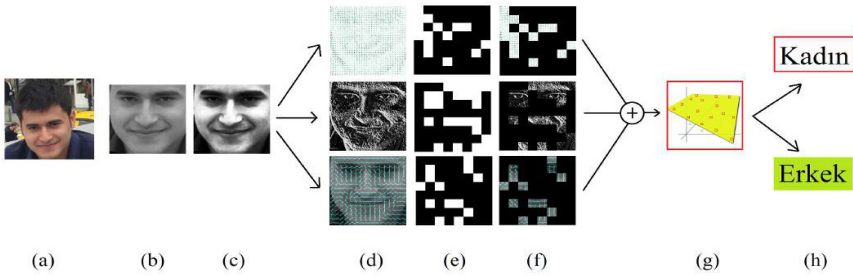
Yüz tanımlama ile cinsiyet tespiti, aslında en ayırt edici biyometrik özelliklerdendir. Bireyler birbirlerini ayırt etmede ilk olarak birbirlerinin yüzlerinden faydalanırlar. Bu yöntem neredeyse insanlığın başlangıcı ile yaşıt bir ayırt etme yöntemidir. Bu yöntemin bilimsel olarak incelenerek bir ayırt edici özellik olarak bilgisayar teknolojileri ile sayısal bir veriye dönüştürülmesi ve kullanılması son dönemlerde oldukça yaygınlaşmıştır [10].

#### 3.1.1. Yüz Tanımlama İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Şafak ve arkadaşları [11], bireylerin yüz imajları evrişimsel sinir ağları yöntemi ile eğitilmiş, cinsiyet tespiti büyük oranda tahmin edilmeye çalışılmıştır. Googlenin, Inception V1 evrişimsel sinir ağı modelleri kullanılmıştır. Inception V1 modeli VGGFace2 veri kümesi yüz üzerine eğitilmiştir. Derin Öğrenmenin, aktarım öğrenme sayesinde cinsiyet veri kümesi yüz imajları üzerine eğitilmiş model üzerinde işlenmiştir. Veri seti olarak 460.723 resim verisi bulunan IMBD veri seti kullanılmıştır. Bunlardan 260.428 resim eğitim için kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunda cinsiyet tahmininde %97 başarı oranı elde edilmiştir.

**Tablo 3. 1.** *Evrimsel Sinir Ağının Eğitilmesi*

Abacı ve arkadaşları [12], yüz imgesindeki piksel alanlarının cinsiyet sınıflandırmadaki başarımını incelemişlerdir. Cinsiyet sınıflamada kullanılan, yerel ikili örüntüler, ayırık cosinüs dönüşümü ve yönlü gradyanlar histogramı da yapılan çalışmalarla, önemsiz piksel alanları silinerek boyutu indirgemişlerdir. Sonrasında yüz bölgesinde önemli görülen bölgeler birleştirilerek yeni bir öznitelik çıkarmışlardır. Sonuç olarak 1275 veri üzerinden %95,1 oranla yüksek başarımlı oranı elde etmişlerdir.

**Şekil 3. 1.** *Abacı ve arkadaşlarının, yapmış oldukları çalışmanın sınıflandırma örneği [12]*

Lu ve arkadaşları [13], cinsiyet tespitinde, bir kişinin yüz bölgesini ayrı ayrı sınıflandırılmış ve bu amaçla yüz görüntüleri için bir destek vektör makine (SVM) sınıflandırıcısı kullanmıştır. Bu çalışma ile farklı yüz bölgelerinin cinsiyet tespitinde önemi ve katkısı bulunmuştur. Sonuç olarak yüz bölgesinin bir bütün olarak alınmaktansa, yüz bölgesini birden

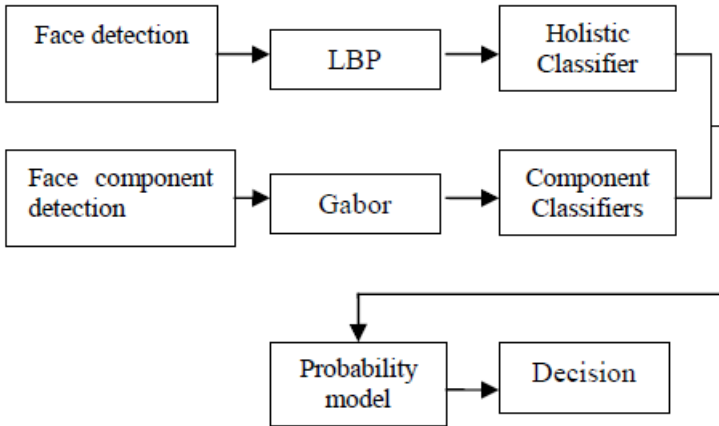
fazla bölütleyerek çıkan sonucu beraber değerlendirilmesinin daha etkili bir sonuç vereceği sonucu çıkarılmıştır. Cinsiyet belirlemede yüzü bütünsel olarak aldığımızda %87,62 doğruluk oranında, yüzün farklı bölgeleri ve bu bölgeler arasında SVM sınıflandırıcısı kullanılması ile %92,55 doğruluk oranı yakalanmıştır.

**Tablo 3.2.** *Cinsiyet sınıflandırma oranlarında, yüzün çok bölgeli ve bütünsel sonuçları*

Metot	Sınıflandırma oranı
Yüzün çoklu bölümleri	92.55%
Yüzün bütünü	87.62%

Wang ve arkadaşları [14], gerçek zamanlı bir yüz görüntüsünün, bir cinsiyet tanıma sisteminde algılanan yüzün hizalanması zor olduğundan, yüz belirli bir sınır içerisine alınır ve çalışmada kullanılır. İlk olarak, eğitim setine hizalanmamış yüz imajları dahil edilir. İkinci olarak yüz görüntüsü ve bileşenlerini çıkarmak için LBP (yerel ikili örüntü) ve Gabor (görüntü üzerinde ayrıtları belirlemek için kullanılan görüntü işleme filtresidir) özellik çıkarma yöntemleri birlikte uygulanır. Yüz imajları için üç veri tabanı (FERET, CAS-PEAL ve çalışma için oluşturulan veri tabanı) hibrit olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak gerçek zamanlı bir yüz imajından cinsiyet tespiti yapmak için yüz görüntüsü ve yüz bileşenleri beraber kullanılmış LBP ve Gabor özellik çıkarım yöntemi ile Holistic(bütünsel) ve component-based (bileşen tabanlı) metotlar kullanılarak %95 doğruluk oranı yakalanmıştır.

**Tablo 3.3.** *Önermiş oldukları cinsiyet tanıma sisteminin akış şeması*

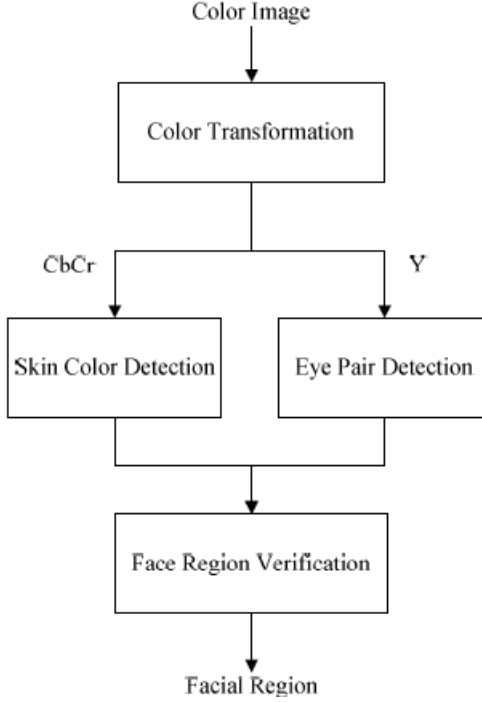


Lin ve arkadaşları [15], cinsiyet tespitinde, yüz imajları ve göz algılama birlikte hibrit olarak kullanılmıştır. Düşük çözünürlüklü görüntülerden elde edilen yüzlerdeki bilgiler cinsiyet tanımlanması açısından kolayca analiz



edilemeyebilir. Burada ise, yüz-temelli düşük çözünürlüklü görüntülerden etkilenmeden cinsiyet tespitinin analiz edilebilmesi sağlanmaktadır. Önerilen uygulamada yüz ve göz koordinatları beraber kullanılarak özellikler çıkarılmış ve sınıflandırıcı olarak da SVM kullanılmıştır. Sonuç olarak %87,4 doğruluk oranında bir sonuç elde edilmiştir.

**Tablo 3. 4. Önerilen yüz algılama algoritmasının blok şeması**



### 3.2. Parmak izi İle Cinsiyet Tespiti

Parmak izleri kimlik belirlemede kullanılan önemli bir veridir. Örnek verecek olursak, bir suç unsuru taşıyan olayı açığa çıkarmada, parmak izi delilinin kime ait olduğu emniyet veri tabanında kayıtlı değilse, bu parmak izini kullanarak zanlı hakkında en fazla bilgiye ulaşma en önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte, parmak izinden cinsiyet tespit edilerek muhtemel zanlı sayısının oranı önemli ölçüde azaltılmaktadır. Böylece, veri tabanlarından faydalanırken cinsiyete bağlı sınıflama ile bu oran azalarak, kişi tespitinde hem zamandan hem de emekten tasarruf sağlanmaktadır.

Cildin üst tarafında bulunun tepelerin kalınlığı, belirli alanda çizgi sayısı, çizgiler arası mesafe, kişiden kişiye değişmektedir. Örneğin, bayanlar baylardan daha yüksek tepe yoğunluğuna sahip olduğundan cinsiyet tahmininde önemli bir özellik oluşturur [16]. Parmak izi ile cinsiyet belirlemede, etnik köken, yaş, boy, kilo gibi özelliklerle, bireyin kimliği hakkında daha etkin bilgiler sağlanır [17].

### 3.2.1. Parmak İzi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Redomero ve arkadaşları [18], parmak izinden cinsiyet tespitinde (İspanya örneği), 100 kadın, 100 erkek olmak üzere 200 kişiden aldıkları parmak izi (20-30 yaş) üzerinde çalışma yapılmıştır. Sırt yoğunluğunu veya belirli bir alandaki sırt sayısını ölçmek için, 5mm-5mm kare alanı 16 kat büyütülerek 20mm-20mm boyutlarında alan içerisinde ki, sırt (tepe) sayısı alınmıştır. Bu alanda en az 8, en fazla 21 sırt bulunmuştur. Erkeklerin ortalama sırt sayısının 13,00-19,22 arasında, kadınların ise 14,60-21,50 arasında bulunmuştur.



**Şekil 3. 2.** Belirlenen Sırt(tepe) sayma alanı bölgesi

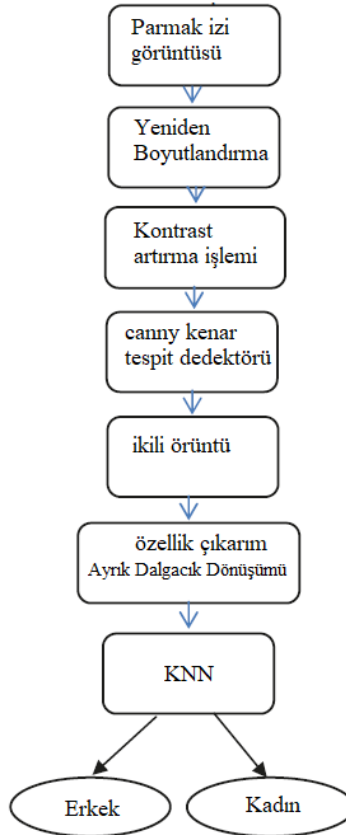
Li ve arkadaşları [19], cinsiyet tahminini ağırlıklı olarak parmak izinden çıkarmaya çalışmış ve yüz imajı ile beraber kullanmıştır. Parmak izi ve yüz bilgilerinin cinsiyet tahmini için karar düzeyinde kaynaştığı Bayes hiyerarşik modeli ile cinsiyet tahmin etmeyi sunmuştur. Veri tabanı olarak, yaşı 10 ila 70 arasında değişen Han uyruklu 197 kadın ve 201 erkek içeren dahili veri tabanı kullanıldı. Parmak izi ve yüz bilgilerinin kaynaşmasının, cinsiyet tahmini için tekli yöntemlerden daha sağlam ve doğru performans elde edebileceği görüldü. Modelle %94 civarı cinsiyet tahmini yapılabildiği görülmüştür [19]. “Bayes teoremi, bir olayın olma olasılığı ile ilgili beklenen olasılık beklentilerinin, olayın olması durumunda elde edilen sonuçlarla güncelleştirilerek, soncul olasılıkların sonuçlanmasını sağlayan bir olasılık teoremidir” [20].



**Şekil 3. 3.** Parmak izi ve yüz bilgilerinin cinsiyet tahmini için karar düzeyinde kaynaştırılması

Shinde ve arkadaşları [21], özellik çıkarımı için Canny Edge (Canny kenar dedektörü) algılama ve sınıflandırma için DWT (discrete wavelet transform) kullanıldı. Önerilen sistem için elde edilen sonuç %98 dir. Yine çalışmaya göre, Kadın parmak izlerinin, erkek parmak izlerine kıyasla cinsiyet tahminindeki doğruluk oranı, yüksek olduğu görülmüştür.

**Tablo 3. 5.** Önerilen Cinsiyet Sınıflandırma Sisteminin akış şeması



Rajesh ve arkadaşları [22], 80 kadın 100 erkek olmak üzere 180 kişilik veri tabanı kullanıldı. Çalışmada, Parmak izlerinin çok yönlü çözümlenmesiyle cinsiyet tahmini etmek için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (DWT), frekans domainindeki parmak izlerini analiz etmek için kullanılır. Sınıflandırma, gauss karışımları tarafından modellenmiştir. Cinsiyet tahmininde, önerilen sistem için elde edilen sonuç %92,67 doğruluk görülmüştür.

Tarare ve arkadaşları [23], 100 kadın 100 erkek olmak üzere 200 kişilik veri tabanı kullanılmıştır. DWT dönüşümü, bilinmeyen parmak izi sınıflandırması için arama tablosu olarak kullanılacak özelliklerin veri tabanını oluşturmak için veri kümesinin bazı parmak izi görüntülerinin özelliklerini verildi ve test için diğer parmak izleri kullanılmıştır. KNN (K-En Yakın Komşu), parmak izlerini, erkek veya kadın parmak izi olarak sınıflandıran bir sınıflandırıcı olarak kullanıldı. Cinsiyet tahmininde, önerilen sistem için elde edilen sonuç cinsiyete bağlı olarak %50-80 aralığında bulunmuştur.

Gornale ve arkadaşları [24], Parmak izlerini kullanarak cinsiyet sınıflandırmasını, 10 çapraz doğrulama tekniği ile vektör desteği makinelerine dayanarak parmak izinden cinsiyet sınıflaması yaptı. Özellik çıkarımında DWT, sınıflandırma yapılırken ise SVM kullanıldı, sonuç olarak cinsiyet tespitinde %89-%91 sınıflandırma oranı bulunmuştur.

Yapılan çalışmalarda; Parmak izinden farklı özellikler çıkarılarak bunların cinsiyet sınıflandırması için kullanılmasıyla birçok teknik önerilmiştir. Yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları DWT, DWT-PCA, DWT- SVD' dir. Bu tekniklerin her birinin sonuçları, her sistem için uygulanan ön işleme bağlı olarak değişir.

### 3.3. El Geometrisi Ve Avuç İçi İzi İle Cinsiyet Tespiti

El geometrisi veya avuç içi izi şekli, adından da anlaşılacağı gibi, elin geometrik yapısını ve avuç içinde bulunan şekilleri ifade eder. El şekli ve izi tabanlı sistemler yeni değildir ve 1970'lerin başından beri mevcuttur. Ancak, bu konuya dayalı kimlik doğrulamanın altında yatan araştırma konularını ele alan çok fazla açık literatür yoktur; çoğu patent veya uygulamaya dönüktür. Bu konuyla ilgili yoğun akademik araştırmalar 90'lı yılların sonlarında başlamıştır [25]. İnsanlar arasında, bir kişinin iki elinin veya ikizlerin avuç içi izi benzersizdir. Son 25 yılda en çok kullanılan biyometrik özellik olan parmak izi ile karşılaştırıldığında avuç içi izinin birkaç avantajı vardır. Düşük çözünürlüklü görüntüden bile veri alınabilir. İşçiler gibi yoğun çalışarak parmak izleri deforme olmuş kişilerden net parmak izi sağlayamayabiliriz, ancak avuç içi izinden daha güvenilir veri alınabilir. Ayrıca, avuç içi izinin görüntüsü parmak izi görüntüsünden daha fazla bilgi sağlayabilir [26].

### 3.3.1. El Geometrisi ve Avuç İçi İzi İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Lin ve arkadaşları [27], el görüntülerinden çoklu evrişimli sinir ağı (CNN) kullanılarak bir nitelik tahmin yöntemi önermektedir. El görüntülerinden birden fazla özelliği tahmin etmeye yarayan yeni çoklu CNN mimarileri tasarlandı. 10.000'den fazla görüntüden oluşan veri tabanından, el imajlarını kullanarak CNN eğitilmiş ve test edilmiştir. 11k hands dataset veri tabanı ile doğrulama yapıldı. Önerilen "FCR + EB" ile cinsiyet tahmininde %93,10 sınıflandırma oranı bulunmuştur.

Wu ve arkadaşları [25], avuç içi görüntüsünün basit, hızlı ve kullanımı kolay geometri özelliklerine dayanan yeni bir cinsiyet sınıflandırma yöntemi sunmaktadır. Geometri özelliklerine dayanan bu cinsiyet sınıflandırma yöntemi iki ana özellik içerir. Birincisi, görüntü işleme ile özellik çıkarmadır. Diğeri polinom pürüzsüz destek vektör makinesi (PSSVM) ile sınıflandırma sistemidir. Önerilen cinsiyet sınıflandırma yaklaşımının geçerliliğini doğrulamak için 30 kişiden toplam 180 avuç içi görüntüsü toplanmıştır ve sonuçlar %85' in üzerinde sınıflandırma oranı bulunmuştur.

### 3.4. İris İle Cinsiyet Tespiti

İrisin biyometrik özellik olarak çalışılabileceği fikrini ilk olarak, Fransız göz doktoru Alphonse Bertillon açıklamıştır. 1992 yılında Dr.John Daugman başkanlığında bir grup ise iris kimlik tanıma sistemi algoritmasının üzerine ilk çalışmayı yapmıştır [28]. İris tanıma ile kimlik tespiti, göç, sınır güvenliği, sağlık, bankacılık, otelcilik, turizm ve kamu güvenliği gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır [29].

Bireylerin biyometrik özelliklerine bakıldığında iris, gözün saydam tabakasının arkasında bulunan, göze rengini veren daire şeklinde bir kas tabakasından oluşan bölümdür. İris renk olarak kişiler arasında benzerlik gösterse bile yapı olarak her bireyde farklıdır.

Bir kişinin sağ ve sol gözünün iris kodları bile birbirinden farklıdır. Tek yumurta ikizleri bile aynı deoksiribo nükleik asit (DNA) yapısına sahip olmasına rağmen farklı iris yapısına sahiptirler. Ayrıca iris insan doğumunun 16. ayından sonra ölüme kadar değişiklik göstermeyen bir yapıya sahiptir. Bu nedenlerden dolayı irisin kimlik belirlemede kullanılan diğer biyometrik özelliklere göre daha güçlü bir biyometrik özellik olduğu düşünülmektedir [28].

İris 'ten cinsiyet' in potansiyel olarak faydalı olmasının birkaç nedeni vardır. Kayıtlı bir veritabanının eşleşme için aranmasında olası bir kullanım ortaya çıkar. Örneğin kişinin cinsiyeti belirlenebilirse, aramayı sipariş etmek ve ortalama arama süresini azaltmak için cinsiyet kullanılabilir. Bir başka olası kullanım, cinsiyete dayalı, ancak kimlik kaydı olmaksızın bir alana girişte cinsiyetin taranmasının yararlı olabileceği sosyal ortamlarda ortaya çıkar.

Cinsiyet sınıflandırması, demografik bilgi toplama, pazarlama araştırması ve gerçek zamanlı elektronik pazarlama için de önemlidir. Örneğin, perakende mağazalardaki ekranlar kişinin cinsiyetine göre ürünler sunabilir. Bir diğer olası kullanım, yüksek güvenilirli senaryolarda, giriş yapmaya çalışan, ancak kayıtlı kişiler içerisinde tanınmayan kişilerin cinsiyetini bilmenin önemli olabileceğidir [30].

### 3.4.1. İris İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Fairhurst ve arkadaşları [31], ilk kez farklı özelliklerde (geometrik özellikler, doku özellikleri ve geometrik-doku özelliklerinin bir kombinasyonu dahil) çok yönlü ve akıllı bir sınıflandırıcı yapısı kullanarak iris görüntülerinden cinsiyet tahmini için bir yaklaşım sunmuşlardır. Özellik çıkarma olarak; Geometrik Özellik Çıkarma ve Korelasyon, Normalizasyon ve Doku Özelliği Çıkarma, Geometrik ve Doku Özelliklerini Birleştirme yapılmıştır. Sınıflandırıcı olarak; deneysel çalışma için temel olarak farklı temel yapılara sahip iyi bilinen sınıflandırıcılar kullanılmıştır. Bunlar; Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Destek Vektör Makinesi (SVM), Optimize Edilmiş IREP, Karar Ağacı (DT), KNN. Yaklaşık %90'a yakın doğruluğa ulaşılmıştır.

Bansal ve arkadaşları [32], I-SCAN-2 kullanılarak oluşturulan 150 deneğin (50 kadın, 100 erkek) 300 iris görüntüsü olan veri kümesi dikkate alınmıştır. Dairesel hough dönüşümü ile lokalizasyon yapıldıktan sonra, Daughman dönüşüm modeli ile polar dönüşümü yapılmıştır. İris görüntüsü için özellik vektörü, iki farklı özellik çıkarma tekniği ile, yani istatistiksel ve dalgacık dönüşümü birleştirilerek elde edilmiştir ve öznitelik olarak kullanılmıştır. Bu özniteliklerle, sınıflandırıcı olarak SVM kullanılmış, RBF çekirdek fonksiyonu ile %80,97, polinom çekirdek fonksiyonu ile %81,27 ve Gauss çekirdek fonksiyonu ile %83.06 doğruluk oranı ile cinsiyet sınıflandırılması yapılmıştır.

Thomas ve arkadaşları [33], İris bölgesini bölümlere ayırarak, normalize edilmiş bir iris görüntüsü oluşturmuşlar ve normalleştirilmiş görüntünün log-Gabor filtrelenmiş versiyonunu oluşturdular. log-Gabor filtre kullanarak ideal hale getirilmiş iris görüntülerinin bileşenlerinden doku özelliklerini çıkarmışlardır. İris ve gözbebeği merkezinden, iris ve gözbebeği alanındaki farklılıklardan bazı geometrik özellikler çıkardılar. Karar ağacı oluşturmak için kullanılan bir algoritma olan C4.5 sınıflandırıcısı kullanarak %80'e yakın bir doğruluk elde edilmiştir.

### 3.5. Yapılan Farklı Çalışmalardan Cinsiyet Tespiti

Gümüştü ve arkadaşları [34], giyilebilir yürüyüş analiz sensörü ile cinsiyet sınıflandırması yapmıştır. Giyilebilir sensörler ile bireyin yürüyüş pozisyonları durumuna göre cinsiyetlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Veri kümesi olarak 23 ü bayan 27 si bay olmak üzere toplam 50 bireyin

yürüyüşü analiz edilmiştir. Sınıflandırma başarı oranları, DVM, KNN ve Karar Ağaçları sınıflandırma algoritmaları üç farklı sınıflandırma algoritması ile ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Oluşturulan bir adet yürüyüş için 321 adet yürüyüş niteliği hesaplanmıştır. DVM ile %84, KNN ile %68 ve karar ağaçları ile de %84 doğruluk oranı ile cinsiyet sınıflandırılması yapılmıştır. Özgüllük, hassasiyet ve işlem süresi bakımından sınıflandırmada en başarılı sonuç karar ağaçları yöntemi ile sağlanmıştır.

**Tablo 3. 6.** *Cinsiyet sınıflandırma başarı parametrelerinin karşılaştırılması*

Sınıflandırma Yöntemi	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Hassasiyet
DVM	0.840	0.857	0.827	0.782
k-EK	0.680	0.640	0.720	0.695
Karar Ağaçları	0.840	0.800	0.880	0.869

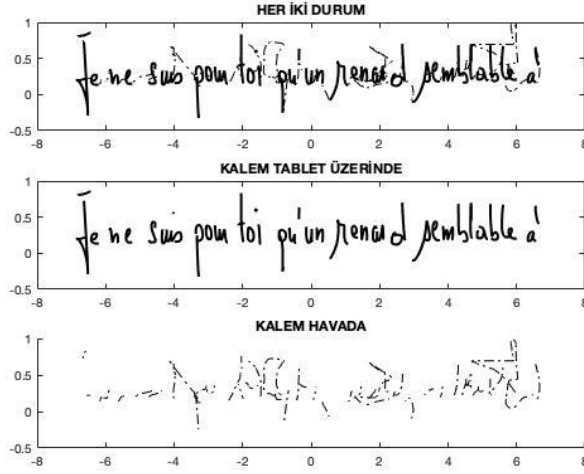
Coşğun ve arkadaşları [35], Solunum fonksiyon testine bağlı cinsiyet sınıflandırması yapmıştır. Makine ile öğrenme yöntemlerinden Gauss Karışım Modeli (GKM) uygulamada kullanılmıştır. Veri tabanı olarak, solunum fonksiyon testlerinden elde edilen değerler kullanılarak cinsiyet tespiti işlemi gerçekleştirilmiştir. Seçilen özneliklerin tek ya da hibrit kullanımının sistemin performansını nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir. Uygulama ile, kişinin grafikte kadını yoksa erkek mi eğri bölgelerine dahil olma oranına bağlı olarak cinsiyet tespiti yapılır. Uygulamada kişinin hangi eğri bölgesine dahil olduğu, sabit bir eşik değeri belirlenerek, bu değerlerin hesaplanan değerlerle karşılaştırılması ile yorumlanır.

Dal ve arkadaşları [36], kalp sesine bağlı olarak, cinsiyet sınıflandırması yapmıştır. Çalışma, öznelik çıkarma, olasılık sal modellerin tanımlanması, modellerin eğitilmesi ve test işleminden oluşmuştur. Kalp seslerinden öznelikler çıkartılmış, çıkartılan öznelikler kullanılarak GKM ile modelleme yapılmış ve bu modeller eğitilmiştir. Önerilen yöntem olabilirlik oranı testine dayanmaktadır. Yöntemin tespit başarısı (49 bayan, 49 erkek) 98 kişilik veri tabanı kullanılarak test yapılmıştır. Farklı test verilerine göre sistemin performansı %87,7 doğruluk oranı ile cinsiyet sınıflandırılması yapılmıştır.

**Tablo 3. 7.** *MFCC özneliklerinin çıkarılma işleminin blok diyagramı*



Arı ve arkadaşları [37], el yazısı örneklerinden, cinsiyet tespiti yapmıştır. Çalışma, NB, KA, DVM, K-EYK sınıflandırıcılarıyla, el yazısı örneklerinden, cinsiyet tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Özellik çıkarımında, metin için kullanılan kalemin durumunu, havada ve metin yazma esnasındaki özellikler çıkarılmıştır. Sınıflandırıcılardan çıkan sonuç ise şöyledir, NB için %79, KA için %73,4, DVM için %85,1, K-EYK için ise %82,4 sonucu elde edilmiştir. En iyi sınıflandırma ise DVM çıkmıştır.



**Şekil 3. 4.** Grafik tablette verilerin kaydedilmesi esnasında oluşan yazı ve geçiş görüntüsü örneği



#### 4. SONUÇLAR

Günümüz dünyasının cinsiyete dayalı değişen, sosyal aktiviteler, giyim-aksesuar ve interaktif reklam tabelaları gibi benzer uygulamalar, biyometri özelliklerinden cinsiyet tanımlamayı ön plana çıkarmaktadır. Diğer taraftan; gelişen görüntü işleme, makine öğrenme ve yapay sinir ağları teknikleri gibi uygulamalar, cinsiyet sınıflandırmada yüksek başarımlar sağlamaktadır. Tüm bunların neticesinde, farklı uygulama alanlarında kullanılan biyometri özelliklerinden çıkarılan cinsiyet tespiti gerek uygulayıcıların gerekse kullanıcıların cephesinde deneyim kazanıldıkça günden güne daha da kabul görmektedir.

Literatür çalışmalarında, genel olarak bir önceki çalışmaların iyileştirilmiş hali veya yöntem-teknikğin farklılaştırılarak yeni bir çalışma yapıldığı görüldü. Bunun yanında kalp sesinden, yazı yazma şekillerinden, konuşmada gerçekleşen ses sinyallerinden, bireyin cinsiyet tanımlamasının yapılması şeklindeki yeni uygulamalarda mevcuttur.

Bu çalışmada, literatür de görüntü işleme ve makine öğrenme uygulamaları ile biyometri özelliklerinden faydalanarak cinsiyet tanımlama ve bu tanımlamada kullanılan, öznelik çıkarımı ve sınıflandırma yöntemleri araştırıldı. Literatür çalışmalarında geçen yöntemler açıklandı. Biyometri özelliklerinin, hibrit olarak da kullanıldığı, sınıflandırma başarımlarının tek özellik kullanılarak sağlanan başarımlarından daha iyi olduğu gözlemlendi. Sonraki çalışmalarda, biyometri özelliklerini çeşitli şekillerde birlikte kullanarak sınıflandırma başarı oranının artacağı düşünülmektedir.

**Tablo 3. 8.** Biyometrik teknolojilerin karşılaştırılması

Biyometrik Karakteristikler	Evrensellik	Eşsizlik	Süreklilik	Elde Edilebilirlik	Performans	Kabul Edilebilirlik	Yaygınlık
DNA	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
Kulak	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek	Orta
Yüz	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yüz Termogramı	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Düşük
Parmak İzi	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Orta
El Geometrisi	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Orta	Orta
İris	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
Retina	Yüksek	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük
İmza	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Ses	Orta	Düşük	Düşük	Orta	Düşük	Yüksek	Yüksek
Damar	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Orta	Düşük

Tablo 3. 8’ de Bireyler arasında farklılık gösteren, biyometrik özelliklerin veri işleme düzeylerinin karşılaştırılması yapılmıştır [10].

**KAYNAKLAR**

- [1] Ceyhan, E.B., Sağıroğlu, Ş. (2018). Parmak izi ile Cinsiyet Arasındaki ilişki: Bir inceleme, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, cilt 6 (1), ss. 54-60
- [2] Durmuş, H. (2019). *Görüntü İşleme Teknikleri İle 3b Yüz Tanıma*, Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [3] Abut, S. (2015). *Yüz Görüntülerinden Cinsiyet Tahmini*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [4] S. Bayrakdar, D. Akgün ve İ. Yücedağ, *Yüz ifadelerinin otomatik analizi üzerine bir literatür çalışması*, SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, cilt 20, no 2, ss. 383-398, 2016.
- [5] Albargathe, S. (2019). *Görüntü İşleme Tekniklerini Kullanarak Fundus Retina Görüntülerinde Kan Damarlarının Bölütlenmesi*, Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [6] Morgül, L. (2010). *Yüz Görüntüsü Esaslı Biyometrik Kimlik Tanıma Ve Doğrulama*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [7] Kılınç, M. (2019). *Aktif Termal Görüntüleme Ve Görüntü İşleme Tekniklerinin Gömülü Mayınların Yerlerinin Belirlenmesinde Kullanılabilirliğinin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü
- [8] Ceyhan, E., Sağıroğlu, Ş., Akyıl, E. (2014). Parmak İzi Öznitelik Vektörleri Kullanılarak Ysa Tabanlı Cinsiyet Sınıflandırma, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 29 (1), ss. 201-207
- [9] Kiani, F., Kutlugün, M.A., ve Çakır, M.Y . (2017). Derin sinir ağları ile konuşma tespiti ve cinsiyet tahmini, *22. Türkiye'de İnternet Konferansı*, İstanbul, Türkiye
- [10] Şan, S. (2013). *Parmak Damar Tanıma Teknolojisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [11] Şafak, E., Barışçı, N. (2018). Age and Gender Prediction Using Convolutional Neural Networks, *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, IEEE
- [12] Abacı, B., Ulucan, E., ve Akgül, T. (2014). Cinsiyet Sınıflandırma İçin Birleşim Tabanlı Öznitelik Vektörü Fusion Based Feature Vector For Gender Classification, *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference*, IEEE
- [13] Lu, L., Xu, Z., ve Shi, P. (2009). Gender classification of facial images based on multiple facial regions, *WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, IEEE

- [14] Wang, J. G., Wang, H. L., Ye, M., ve Yau, W. Y. (2010). Real-time gender recognition with unaligned face images. *5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, IEEE*
- [15] Lin, G. S., ve Zhao, Y. J. (2011). A feature-based gender recognition method based on color information, *First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, IEEE*
- [16] Ceyhan, E. B., Sağıroğlu, Ş. (2015). Parmak izinden cinsiyet tanıma, yeni bir veri tabanı ile test, *International Conference On Information Security And Cryptology, Türkiye*
- [17] Lugini, L., Marasco, E., Cukic, B., ve Dawson, J. (2014). Removing gender signature from fingerprints, *37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, ss. 1283-1287, IEEE
- [18] Gutiérrez-Redomero, E., Alonso, C., Romero, E., & Galera, V. (2008). Variability of fingerprint ridge density in a sample of Spanish Caucasians and its application to sex determination. *Forensic Science International*, cilt 180(1), ss. 17-22
- [19] Li, X., Zhao, X., Liu, H., Fu, Y., ve Liu, Y. (2010). Multimodality gender estimation using bayesian hierarchical model, *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ss 5590-5593, IEEE
- [20] Batuhan, A. Y., ve Namlı, E. (2017). Görüntü İşleme Tabanlı İha Ve Uydu Sistemleri Hibrit Yapay Zekâ Modeliyle Kaçak Yapıların Tespiti, *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, cilt 3 (2), ss. 114-129
- [21] Shinde, S. R., Thepade, S. D. (2015). Gender classification with KNN by extraction of Haar wavelet features from canny shape fingerprints, *International Conference on Information Processing*, ss. 702-707, IEEE
- [22] Rajesh, D. G., Punithavalli, M. (2014). Wavelets and Gaussian mixture model approach for gender classification using fingerprints, *In Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology*, ss. 522-525, IEEE
- [23] Tarare, S., Anjkar, A., Turkar, H. (2015). Fingerprint based gender classification using DWT transform, *International Conference on Computing Communication Control and Automation*, ss. 689-693, IEEE
- [24] Gornale, S. S., Basavanna, M., ve Kruthi, R. (2015). Gender classification using fingerprints based on support vector machines (SVM) with 10-cross validation technique. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, cilt6(7), ss. 588-593
- [25] Wu, M., Yuan, Y. (2014). Gender classification based on geometry features of palm image, *The Scientific World Journal*, ID:34564
- [26] Han, D., Guo, Z., ve Zhang, D. (2008). Multispectral palmprint recognition using wavelet-based image fusion, *9th International Conference on Signal Processing* ss. 2074-2077, IEEE

- [27] Lin, Y. C., Suzuki, Y., Kawai, H., Ito, K., Chen, H. T., ve Aoki, T. (2019). Attribute estimation using multi-CNNs from hand images, *Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, pp. 241-244, IEEE
- [28] Açıl, T. (2019). *Güncel Makine Öğrenmesi Teknikleri İle İris Görüntülerinden Cinsiyet Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [29] Reshma, P. A., Divya, K. V., Therattil, G. J., ve Subair, T. B. (2017). A study of gender recognition from Iris: A literature survey, *International Conference on Intelligent Sustainable Systems*, ss. 888-891, IEEE
- [30] Tapia, J. E., Perez, C. A., ve Bowyer, K. W. (2016). Gender classification from the same iris code used for recognition, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, cilt11(8), ss. 1760-1770
- [31] Da Costa-Abreu, M., Fairhurst, M., ve Erbilek, M. (2015). Exploring gender prediction from iris biometrics, *International Conference of the Biometrics Special Interest Group*, ss. 1-11, IEEE
- [32] Bansal, A., Agarwal, R., ve Sharma, R. K. (2012). SVM based gender classification using iris images, *Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks* ss. 425-429, IEEE
- [33] Thomas, V., Chawla, N. V., Bowyer, K. W., ve Flynn, P. J. (2007). Learning to predict gender from iris images, *First IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*, ss.1-5, IEEE
- [34] Gümüşçü, A., Karadağ, K., Çalışkan, M., Tenekeci, M. E., ve Akaslan, D. (2018). Gender classification via wearable gait analysis sensor, *26th Signal Processing and Communications Applications Conference*, ss.1-4, IEEE
- [35] Coşğun, S., Özbek, İ. Y. (2014). Gender detection based on pulmonary function test, *18th National Biomedical Engineering Meeting* ss. 1-4, IEEE
- [36] Dal, F., Coşğun, S., Özbek, İ. Y. (2015). Gender detection with heart sound, *23rd Signal Processing and Communications Applications Conference*, ss.2362-2365, IEEE
- [37] Arı, B., Ucuz, İ., Arı, A., Özdemir, F., ve Şengür, A. (2020). Grafik tablet kullanılarak makine öğrenmesi yardımı ile el yazısından cinsiyet tespiti, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 32(1), ss. 243-252
- [38] Parlakyıldız S., Gençoğlu M.T., Cengiz M.S. 2018. Development of Rail Systems from Past to Present. International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology (2018 Dubai, BAE)

- [39] Çıbuk M., Reducing Energy Consumption in Single-Hop and Multi-Hop Topologies of Road Lighting Communication Network, 2020. V28, #4 pp. 91–102.
- [40] Parlakyıldız, Ş. Gencoglu, M.T., Cengiz, M.S. ANALYSIS OF FAILURE DETECTION AND VISIBILITY CRITERIA IN PANTOGRAPH-CATENARY INTERACTION, Light & Engineering Vol. 28, No. 6, pp. 127–135, 2020
- [41] Efe S. B., UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2018. V116, #3, pp. 391–406.
- [42] Çıbuk M., Cengiz M.S. Determination of Energy Consumption According to Wireless Network Topologies in Grid-Free Lighting Systems. Light & Engineering, 2020. V28, #2, pp. 67–76.
- [43] Efe S. B., Cebeci M. Power Flow Analysis by Artificial Neural Network. International Journal of Energy and Power Engineering, 2013. V2, #6, pp. 204–208.
- [44] Gencer, G. Eren, M. Yildirim, S. Kaynaklı, M. Palta, O. Cengiz, M.S., Cengiz Ç. Numerical Approach to City Road Lighting Standards, Imeset Book of Abstracts, Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., 12-14 July 2017 Baku.
- [45] Cengiz, Ç., Kaynaklı, M., Gencer, G., Eren, M., Yapıcı, İ., Yildirim, S., Cengiz, MS. (2017) Selection Criteria and Economic Analysis of LED, International Conference on Multidisciplinary, Science, Engineering and Technology Bitlis Book of Abstracts, 1 (1), pp. 27-29.

# Bölüm 14

## FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEMLERİN PARAMETRE ÇIKARIMI İÇİN ÇÖZÜMLER



*Mehmet Fatih TEFEK<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi. Mehmet Fatih TEFEK, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mehmetfatihfefek@osmaniye.edu.tr



## 1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisi basit bir ampulden gelişmiş bir bilgisayara ve son zamanlarda da elektrikli araçlara kadar ihtiyaç duyduğumuz bir numaralı kaynaktır. Buna bağlı olarak enerji üretim ve taleplerinin dengelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda enerji talep tahminleri ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda enerji kaynaklarının daha çok fosil yakıtlı olduğu bildirilmektedir (Apergis ve ark., 2010; Askarzadeh, 2014; Beşkirli ve ark., 2018; Beşkirli ve ark., 2020; Kankal ve ark., 2011; Tefek ve ark., 2019; Uzlu ve ark., 2014). Dünyada fosil yakıt kaynaklarının azalması ve çevresel kaygılar sebebiyle alternatif, yenilenebilir ve çevreyi kirletmeyen enerji kaynağı talebi günden güne artmaktadır (Chegaar ve ark., 2001; Chin ve ark., 2015; Easwarakhanthan ve ark., 1986; Ouennoughi ve ark., 1999; Yu ve ark., 2017). Son zamanlarda iklim değişikliği, küresel ısınma ve klasik fosil yakıtların tükenmesi sorunlarının üstesinden gelmek için, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmıştır (Yu ve ark., 2017). Aynı doğrultuda elektrik üretiminde de yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir rol oynamaktadır (Nunes ve ark., 2018). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, güneşten elde edilen potansiyel enerjiyi fotovoltaik (FV) hücre modülleri aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine çevrilebilmesi sayesinde elektrik enerjisi üretiminde sıklıkla kullanılan bir kaynaktır (Chin ve ark., 2015; Nunes ve ark., 2018; Yu ve ark., 2017). Güneş enerjisi genellikle tükenmez ve temiz kaynakların umut verici yenilenebilir bir enerji alternatifi olarak sunulmaktadır (Muhsen ve ark., 2015). FV sistemleri güneş gören ortama kurulduklarından çevre şartlarından fazlasıyla etkilenmektedir. Doğru bir güneş FV hücre modellemesi, FV enerji sisteminde önemli bir rol oynamaktadır (Premkumar ve ark., 2020; Yazdanifard ve ark., 2017). Bu bağlamda FV sistemlerinden elde edilen enerjinin maksimum verimlilikle elde edilmesi önem arz etmektedir (Colak ve ark., 2014; Gümüş ve ark., 2020). FV sistemlerin simülasyonu ve tasarım hesaplamaları, güneş pillerinin doğrusal olmayan elektrik modelini tanımlayan parametrelerin doğru tahmin etme bilgisini gerektirir (Easwarakhanthan ve ark., 1986). Güneş pili parametrelerinin deneysel verilerden doğru bir şekilde bilinmesi, güneş pillerinin tasarımı ve performanslarının tahmin edilmesi için hayati öneme sahiptir. FV sistemlerinde ana parametreler genellikle diyot doygunluk akımı, seri direnç, ideallik faktörü, foto akım ve şönt iletkenliğidir (Chegaar ve ark., 2001). Literatürde FV sistemlerin parametre tahminleri geleneksel yöntemler ve yapay zeka optimizasyon algoritmaları temelli yöntemlerle yapılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde FV sistemlerin parametre tahmini daha çok klasik matematiksel modellemeler ile yapılmıştır (Chan ve ark., 1987; Chan ve ark., 1986; Chegaar ve ark., 2004; Chegaar ve ark., 2001; Easwarakhanthan ve ark., 1986; Jain ve ark., 2004; Ouennoughi ve ark., 1999). Easwarakhanthan ve



ark. (1986) çalışmasında, FV sistemlerinin parametre tahminleri için deneysel çalışmalarda elde ettikleri sonuçları Levenberg parametresiyle modifiye edilmiş Newton modeline dayalı doğrusal olmayan bir en küçük kareler algoritmasıyla kıyaslamışlardır. Buna ilaveten deneysel çalışmalarda elde ettikleri akım (I) -voltage (V) (I-V) parametrelerini de belirlemişlerdir (Easwarakhanthan ve ark., 1986). Easwarakhanthan ve ark. (1986) çalışmasına benzer olarak Chegaar ve ark. (2001) Newton modeline dayalı doğrusal olmayan bir en küçük kareler optimizasyon algoritması bu nedenle FV parametreleri çıkarım yapmak için kullanmışlardır. Jain ve ark. (2004) geleneksel yöntemlerin büyük hesaplama süresine sahip ya da çeşitli tahminler nedeniyle daha az doğru olduğunu öne sürmüşlerdir. Geleneksel yöntemlere ek olarak Lambert'e dayalı tam kapalı form çözümü  $W$ -fonksiyonu geliştirmişler, seri ve şönt dirençleri gibi parazitik güç tüketen parametreleri içeren transandantal akım-voltage (I-V) karakteristiğini ifade etmek için sunmuşlardır (Jain ve ark., 2004).

FV modellerinin parametre tahmini doğrusal olmayan ve çok değişkenli bir problem olduğundan, geleneksel teknikler kullanılırken yerel optimuma takılma olasılığının yüksek olmasına yol açmaktadır (AlHajri ve ark., 2012; Sellai ve ark., 2005; Ye ve ark., 2009; Yu ve ark., 2017). Bu yüzden son zamanlarda araştırmacılar geleneksel çözümlere alternatif olarak daha iyi çözümler için FV sistemlerinin parametre tahmininde yapay zekâ optimizasyon algoritmaları temelli çözümlere yönelmişlerdir (AlHajri ve ark., 2012; Askarzadeh ve ark., 2013; Premkumar ve ark., 2020; Sellai ve ark., 2005; Xiong ve ark., 2018; Ye ve ark., 2009; Yu ve ark., 2017; Yu ve ark., 2019; Yuan ve ark., 2015). Bu çalışmada FV sistemlerinin tek diyot model, çift diyot model ve FV modellerin parametre tahmini için matematiksel formüller verilmiştir. Aynı zamanda amaç fonksiyonunun Matlab programı kaynak kodları da sunulmuştur.

## 2. FV Modül Problemi

Güneş pili modelinin parametre tahmini, çeşitli çevre koşullarında ölçülen ve simüle edilen güneş pili akımı arasındaki farkları en aza indirmeye odaklanır (Niu ve ark., 2014; Yazdanifard ve ark., 2017; Yu ve ark., 2017; Yuan ve ark., 2015). Tahmin aşamasına geçmeden önce doğru bir matematiksel güneş pili modeline sahip olmak önemlidir. Güneş pillerinin (I-V) karakteristiğini tanımlamak için çok sayıda eşdeğer devre modeli geliştirilmiş ve önerilmiş olmasına rağmen, uygulamada tek diyot modeli, çift diyot modeli ve FV modeli olmak üzere üç model yaygın olarak kullanılmaktadır (Askarzadeh ve ark., 2013; Premkumar ve ark., 2020; Yu ve ark., 2019; Yuan ve ark., 2015). Bu çalışmada ilk olarak tek

diyot modeli, çift diyot modeli ve FV modül modeli dahil olmak üzere üç farklı FV modül matematiksel modeli sunulmuştur. Her bir model sırası ile 5, 7 ve 5 parametreye sahiptir. Bu parametreler ne kadar doğru olursa güneş pilinin performansı da bir o kadar iyi olmaktadır. Daha sonra FV modellerinin parametrelerini tahmin etmek için kullanılan amaç fonksiyonu verilmiştir.

### 2.1. Tek diyotlu model

Bu modelde bir adet diyot ve paralelinde ise bir adet akım kaynağı yer almaktadır. Bunlarda birlikte bir adet kaçak akım için şönt direnci bulunur ve bir adette yük akım kaybını göstermek amaçlı seri direnç bulunmaktadır. Bu modelin sadeliği nedeniyle güneş pilinin statik özelliğini belirlemek için sıklıkla kullanılır (Chin ve ark., 2015). Bu modelin eşdeğer devresi Şekil 1’de gösterilmiştir. Devrenin çıkış akımı ise Denklem 1, 2 ve 3’te sunulmuştur.

$$I_L = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

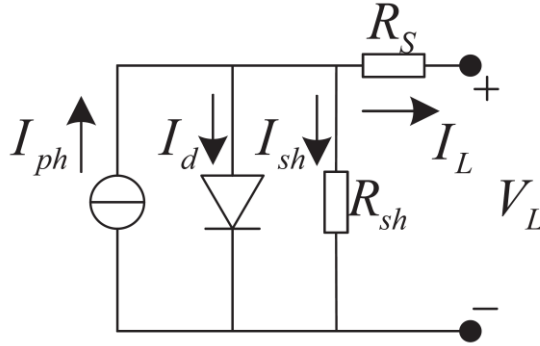
$$I_d = I_{sd} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_L + R_S \cdot I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_L + R_S \cdot I_L}{R_{sh}} \quad (3)$$

Burada,  $I_L$  güneş pilinin çıkış akımını ifade etmektedir.  $I_{ph}$  güneş pilinin ürettiği akımın toplamını ifade eder.  $I_d$  mevcut diyot akımı olup Denklem 2’ye göre Shockley tarafından hesaplanmıştır.  $I_{sh}$  ise Denklem 3’e göre hesaplanan şönt akımı değerini ifade etmektedir.  $R_S$  seri direnci belirtirken,  $R_{sh}$  şönt direncini belirtmektedir.  $V_L$  hücre çıkış voltajını ifade ederken  $I_{sd}$  diyotun ters doyumluk akımını ifade etmektedir.  $n$  diyot ideal faktörüdür.  $k$  Boltzmann sabiti olarak adlandırılmaktadır ve değeri ise  $1.3806503 \cdot 10^{-23}$  J/K dir.  $q$  elektron sabiti olup değeri ise  $1.60217646 \cdot 10^{-19}$  C dir.  $T$  hücrenin mutlak sıcaklığıdır ve kelvin cinsinden ifade edilir. Denklem 1, 2 ve 3’ün birleşiminden elde edilen formül ise Denklem 4’te verilmiştir.

$$I_L = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_L + R_S \cdot I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_S \cdot I_L}{R_{sh}} \quad (4)$$

Denklem 4’de bakıldığında tek diyot modeli için beş farklı parametre olduğu görülmektedir. Bu parametreler doğru tahmin edildiğinde güneş pilinin gerçek davranışı ortaya çıkacaktır.



Şekil 1. Tek diyot modeli

## 2.2. Çift diyotlu model

Aydınlatma altında ideal bir güneş pili, doğrultucu bir diyotla paralel olarak ışıkla üretilen bir akım kaynağı olarak modellenir. Bununla birlikte, uygulamada akım kaynağı, boşluk şarjı rekombinasyon akımını ve hücrenin kenarlarının yakınındaki yarı iletken ve ideal olmayanla ilgili kısmi kısa devre akım yolunu hesaba katmak için bir şönt kaçak direncini dikkate almak için başka bir diyotla da şöntlenir (Askarzadeh ve ark., 2012; Chin ve ark., 2015; Ishaque ve ark., 2011). Ayrıca, güneş hücresi metal kontakları ve yarı iletken malzeme yığın direnci nedeniyle hücre şönt elemanlarına bir seri direnç bağlanır (Wolf ve ark., 1977).

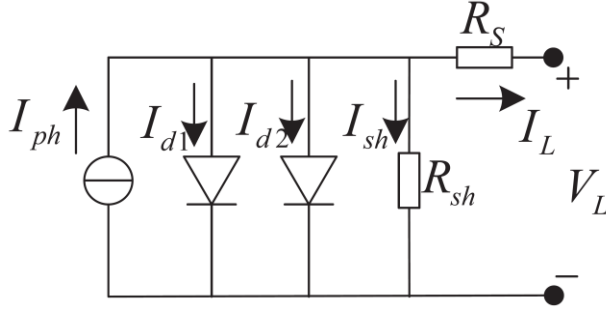
Bu modelde, iki adet diyot ve paralelinde ise bir adet akım kaynağı yer almaktadır. Bunlarda birlikte bir adet kaçak akım için şönt direnci bulunur ve bir adette yük akım kaybını göstermek amaçlı seri direnç bulunmaktadır. Bu devre rekombinasyon akım kaybı etkisi dikkate alınarak elde edilmiştir. Bu modelin eşdeğer devresi Şekil 2’de gösterilmiştir. Devrenin çıkış akımı ise Denklem 5’te sunulmuştur. Denklem 6’da ise Denklem 5’in açık hali verilmiştir.

$$I_L = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (5)$$

$$I_L = I_{ph} - I_{sd1} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_L + R_S \cdot I_L)}{n_1 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sd2} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (V_L + R_S \cdot I_L)}{n_2 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_S \cdot I_L}{R_{sh}} \quad (6)$$

Burada  $I_{sd1}$  difüzyon akımı ifade ederken,  $I_{sd2}$  ise doyma akımı ifade etmektedir.  $n_1$  difüzyon diyot ideal faktörünü belirtirken,  $n_2$  ise rekombinasyon diyot ideal faktörünü belirtmektedir.

Denklem 4’de bakıldığında çift diyot modeli için yedi farklı parametre olduğu görülmektedir. Bu parametreler doğru tahmin edildiğinde güneş pilinin gerçek davranışı ortaya çıkacaktır.



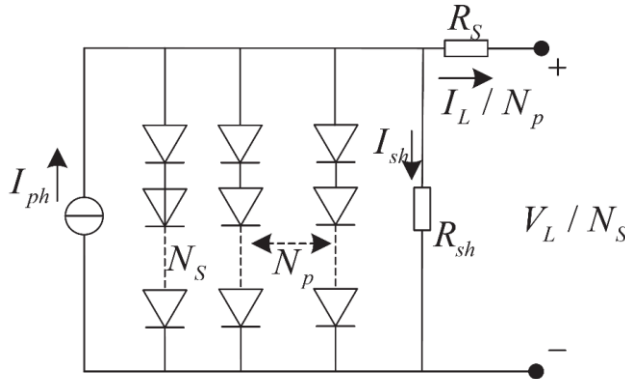
Şekil 2. Çift diyot modeli

### 2.3. FV modül modeli

Bu modelde, çok sayıda seri ve paralel bağlı diyot ve paralelinde ise bir adet akım kaynağı yer almaktadır. Bunlarda birlikte bir adet kaçak akım için şönt direnci bulunur ve bir adette yük akım kaybını göstermek amaçlı seri direnç bulunmaktadır. Bu modelin eşdeğer devresi Şekil 3'te gösterilmiştir. Devrenin çıkış akımı ise Denklem 7'te sunulmuştur.

$$\frac{I_L}{N_p} = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (V_L / N_s + R_s \cdot I_L / N_p)}{n_1 \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L / N_s + R_s \cdot I_L / N_p}{R_{sh}} \quad (7)$$

Burada  $N_p$  paralel dizilen güneş pillerinin sayısını belirtmektedir.  $N_s$  ise seri dizilen güneş pillerinin sayısını belirtmektedir. Tek diyot modelinde olduğu gibi bu modelde de beş farklı parametre olduğu Denklem 7'de görülmektedir. Bu parametreler doğru tahmin edildiğinde güneş pilinin gerçek davranışı ortaya çıkacaktır.



Şekil 3. FV modül modeli

## 2.4. Problemin amaç fonksiyonu

FV modellerinin matematiksel modellemesini oluşturmanın nihai amacı, gerçek FV hücreleri ve FV modüllerinden ölçülen I-V verilerine dayanarak bu modellerin bilinmeyen parametrelerini doğru bir şekilde tahmin etmektir. Literatürde, parametre tahminlerinde sıklıkla kullanılan optimizasyon teknikleri FV modül probleminin parametre tahmini içinde kullanılmaktadır (Kler ve ark., 2017; Premkumar ve ark., 2020; Xiong ve ark., 2018; Yu ve ark., 2019; Yuan ve ark., 2015). Her bir deneysel ve simüle edilmiş noktalar arasındaki hata hesaplama fonksiyonu tek diyot için Denklem 8, çift diyot için Denklem 9 kullanılmaktadır.

$$\begin{cases} f_k(V_L, I_L, \mathbf{x}) = I_{ph} - I_{sd} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V_L + R_S I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_S I_L}{R_{sh}} - I_L \\ \mathbf{x} = \{I_{ph}, I_{sd}, R_S, R_{sh}, n\} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_k(V_L, I_L, \mathbf{x}) = I_{ph} - I_{sd1} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V_L + R_S I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - I_{sd2} \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V_L + R_S I_L)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V_L + R_S I_L}{R_{sh}} - I_L \\ \mathbf{x} = \{I_{ph}, I_{sd1}, I_{sd2}, R_S, R_{sh}, n_1, n_2\} \end{cases} \quad (9)$$

Deneysel ve simüle edilen akım verilerinin arasındaki farkı ölçmek amacıyla gerçekleştirilen amaç fonksiyonun yaygın olarak kullanılan denklemleri verilmiştir. Burada,  $\mathbf{x}$  (RMSE) (root mean square error) olarak adlandırılmaktadır. Optimizasyon problemlerini amaç fonksiyonu Denklem 10'da, arama uzayındaki standart data  $V_L$  ve  $I_L$ 'ya bağlı  $\mathbf{x}$  vektörü ile elde edilen RMSE değerini minimum yapmaktadır.

$$\text{RMSE}(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(V_L, I_L, \mathbf{x})^2} \quad (10)$$

Burada  $\mathbf{x}$ , çözüm vektörünün bilinmeyen parametrelerinden oluştuğunu ifade etmektedir.  $N$  ise deneysel veri sayısını belirtmektedir.

## 3. Similasyon Verileri

Güneş pilleri ve güneş modülü akım voltaj verileri kullanılarak işlemler gerçekleştirilir. Güneş pilleri için kullanılan veriler 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım altında 33 °C'de 57mm çapında FV hücresinden ölçülmüştür. Güneş modülü için kullanılan veriler 1000 W/m<sup>2</sup> ışınım altında 45 °C'de seri olarak 36 polikristalin silikon FV hücresinden ölçülmüştür (Easwarakhanthan ve ark., 1986). Tek diyot, çift diyot ve FV modül çözümü için gerekli olan parametre değerleri literatüre göre alınmış olup Tablo 1'de verilmektedir. Denklem 10'da N deneysel veri sayısı için tek ve çift diyot modellerde Tablo 2'deki gibi 26 veri, FV modül içinde Tablo 3'teki gibi 25 veri seti kullanılmaktadır.

Tablo 1. Tek ve çift diyotlu modelleri ile FV modül modeli için parametre değer aralıkları

Parametre	Tek diyot/Çift diyot		FV modül	
	Alt sınır	Üst sınır	Alt sınır	Üst sınır
$I_{ph}$ (A)	0	1	0	2
$I_{sd}, I_{sd1}, I_{sd2}$ ( $\mu A$ )	0	1	0	50
$R_s$ ( $\Omega$ )	0	0.5	0	2
$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	0	100	0	2000
$n, n_1, n_2$	1	2	1	50

Tablo 2. Tek ve çift diyotlu modüller için veri seti    Tablo 3. FV modül için veri seti

Ö.N <sup>1</sup>	Tek ve çift diyotlu modül verileri		
	V (V)	I (A)	P (W)
1	-0.2057	0.764	-0.157154800
2	-0.1291	0.762	-0.098374200
3	-0.0588	0.7605	-0.044717400
4	0.0057	0.7605	0.004334850
5	0.0646	0.76	0.049096000
6	0.1185	0.759	0.089941500
7	0.1678	0.757	0.127024600
8	0.2132	0.757	0.161392400
9	0.2545	0.7555	0.192274750
10	0.2924	0.754	0.220469600
11	0.3269	0.7505	0.245338450
12	0.3585	0.7465	0.267620250
13	0.3873	0.7385	0.286021050
14	0.4137	0.728	0.301173600
15	0.4373	0.7065	0.308952450
16	0.459	0.6755	0.310054500
17	0.4784	0.632	0.302348800
18	0.496	0.573	0.284208000
19	0.5119	0.499	0.255438100
20	0.5265	0.413	0.217444500
21	0.5398	0.3165	0.170846700
22	0.5521	0.212	0.117045200
23	0.5633	0.1035	0.058301550
24	0.5736	-0.01	-0.005736000
25	0.5833	-0.123	-0.071745900
26	0.59	-0.21	-0.123900000

Ö.N	FV modül verileri		
	V (V)	I (A)	P (W)
1	0.1248	1.031500	0.128731200
2	1.8093	1.030000	1.863579000
3	3.3511	1.026000	3.438228600
4	4.7622	1.022000	4.866968400
5	6.0538	1.018000	6.162768400
6	7.2364	1.015500	7.348564200
7	8.3189	1.014000	8.435364600
8	9.3097	1.010000	9.402797000
9	10.2163	1.003500	10.252057050
10	11.0449	0.988000	10.912361200
11	11.8018	0.963000	11.365133400
12	12.4929	0.925500	11.562178950
13	13.1231	0.872500	11.449904750
14	13.6983	0.807500	11.061377250
15	14.2221	0.726500	10.332355650
16	14.6995	0.634500	9.326832750
17	15.1346	0.534500	8.089443700
18	15.5311	0.427500	6.639545250
19	15.8929	0.318500	5.061888650
20	16.2229	0.208500	3.382474650
21	16.5241	0.101000	1.668934100
22	16.7987	-0.008000	-0.134389600
23	17.0499	-0.111000	-1.892538900
24	17.2793	-0.209000	-3.611373700
25	17.4885	-0.303000	-5.299015500

<sup>1</sup> Ölçüm Numarası

#### 4. FV Sistemlerin Matlab Program Yazımı

FV sistemler için Denklem 1-9'de sırasıyla tek, çift diyotlu ve FV modüllerin formülasyonu verilmiştir. Denklem 10'da I-V tahminini minimum RMSE için formülasyonuna göre program kodları Matlab 2016a ile kodlanmıştır. Şekil 4'te tek diyot modelin, Şekil 5'te çift diyot modelin ve Şekil 6'da FV modelin kaynak kodları verilmiştir.

```
% Tek diyotlu model
function y = FnkTekDiyot(x)
veriseti=[-0.2057 0.7640;-0.1291 0.7620;-0.05880 0.7605;0.005700 0.7605;
0.06460 0.76;0.1185 0.7590;0.1678 0.7570;0.2132 0.7570;
0.2545 0.7555;0.2924 0.7540;0.3269 0.7505;0.3585 0.7465;
0.3873 0.7385;0.4137 0.7280;0.4373 0.7065;0.4590 0.6755;
0.4784 0.6320;0.4960 0.5730;0.5119 0.4990;0.5265 0.4130;
0.5398 0.3165;0.5521 0.2120;0.5633 0.1035;0.5736 -0.010;
0.5833 -0.1230;0.5900 -0.2100];
V_Verisi = veriseti(:,1); % Gerilim değerleri alınıyor
I_Verisi = veriseti(:,2); % Akım değerleri alınıyor.
data_len = length(V_Verisi); %veriseti boyutu hesaplanıyor
% RMSE değeri hesaplanıyor
i=1;
[pop,dim]=size(x);
for k=1:pop %tek diyotlu modülde parametre sayısı (din)
for j=1:data_len
hata_degeri(j,k) = tek_diyot_hesapla(x,i,V_Verisi(j), I_Verisi(j));
if mod(j,data_len)==0
i=i+1;
end
end
end
amac_fonk = sum(hata_degeri.^2);
y = (amac_fonk/data_len)^2;
y='y';
end
function sonuc = tek_diyot_hesapla(x,i,VL,IL)
% amaç fonksiyonu hesabı için
x(1)=x(1,1); x(2)=x(1,2); x(3)=x(1,3); x(4)=x(1,4); x(5)=x(1,5);
Iph = x(1);Isd = x(2);Rs= x(3);Rsh = x(4);n= x(5);
q = 1.60217646e-19;k = 1.3806503e-23;
T = 273.15 + 33.0; % Stacklğı 33 derece yapmak için
VT = k * T / q;
sonuc = Iph - Isd * ( exp( (VL + IL*Rs) / (VT*n) ) - 1.0 ) - ( (VL + IL*Rs)/Rsh )
end

% Çift diyot modeli
function y = FnkCiftDiyot(x)
veriseti=[-0.2057 0.7640;-0.1291 0.7620;-0.05880 0.7605;0.005700 0.7605;
0.06460 0.76;0.1185 0.7590;0.1678 0.7570;0.2132 0.7570;
0.2545 0.7555;0.2924 0.7540;0.3269 0.7505;0.3585 0.7465;
0.3873 0.7385;0.4137 0.7280;0.4373 0.7065;0.4590 0.6755;
0.4784 0.6320;0.4960 0.5730;0.5119 0.4990;0.5265 0.4130;
0.5398 0.3165;0.5521 0.2120;0.5633 0.1035;0.5736 -0.010;
0.5833 -0.1230;0.5900 -0.2100];
V_Verisi = veriseti(:,1); % Gerilim değerleri alın
I_Verisi = veriseti(:,2); % Akım değerleri alınyc
data_len = length(V_Verisi); %veriseti boyutu hesapla
% RMSE değeri hesaplanıyor
i=1;
[pop,dim]=size(x);
for k=1:pop %çift diyotlu modülde parametre sayısı (din)
for j=1:data_len
hata_degeri(j,k) = cift_diyot_hesapla(x,i,V_Verisi(j), I_Verisi(j));
if mod(j,data_len)==0
i=i+1;
end
end
end
amac_fonk = sum(hata_degeri.^2);
y = (amac_fonk/data_len)^2;
y='y';
end
function sonuc = cift_diyot_hesapla(x,i,VL,IL)
x(1)=x(i,1);x(2)=x(i,2);x(3)=x(i,3); x(4)=x(i,4);
x(5)=x(i,5);x(6)=x(i,6); x(7)=x(i,7);
Iph = x(1);Isd1 = x(2);Rs= x(3);Rsh = x(4);
n1 = x(5);Isd2 = x(6);n2 = x(7);
q = 1.60217646e-19;k = 1.3806503e-23;
T = 273.15 + 33.0;
sonuc = Iph - Isd1 * ( exp( (q*(VL + IL*Rs)) / (n1*k*T) ) - 1.0 ) ...
- Isd2 * ( exp( (q*(VL + IL*Rs)) / (n2*k*T) ) - 1.0 ) ...
- ( (VL + IL*Rs)/Rsh - IL;
end
```

Şekil 4. Tek diyot modelin Matlab kaynak kodu

Şekil 5. Çift diyot modelin Matlab kaynak kodu

```

% Fotovoltaik (FV) modeli
function y = FnkFVModel(x)
veriseti=[0.1248 1.0315;1.8093 1.0300; 3.3511 1.0260; 4.7622 1.0220;
6.0538 1.0180;7.2364 1.0155;8.3189 1.0140;9.3097 1.0100;
10.2163 1.0035;11.0449 0.9880;11.8018 0.9630;12.4929 0.9255;
13.1231 0.8725;13.6983 0.8075;14.2221 0.7265;14.6995 0.6345;
15.1346 0.5345;15.5311 0.4275;15.8929 0.3185;16.2229 0.2085;
16.5241 0.1010;16.7987 -0.0080;17.0499 -0.1110;17.2793 -0.2090;
17.4885 -0.3030];
V_Verisi = veriseti(:,1); % Gerilim değerleri alınıyor
I_Verisi = veriseti(:,2); % Akım değerleri alınıyor.
data_len = length(V_Verisi); %veriseti boyutu hesaplanıyor
% RMSE değeri hesaplanıyor
i=1;
[pop,dim]=size(x); %FV modülde parametre sayısı (dim=5)
for k=1:pop
for j=1:data_len
hata_degeri(j,k) = FV_hesapla(x,i,V_Verisi(j), I_Verisi(j));
if mod(j,data_len)==0
i=i+1;
end
end
end
amac_fonk = sum(hata_degeri.^2);
y = (amac_fonk/data_len)^2;
y=y';
end
function sonuc = FV_hesapla(x,i,VL,IL)
x(1)=x(i,1);x(2)=x(i,2);x(3)=x(i,3); x(4)=x(i,4);x(5)=x(i,5);
Iph= x(1);Isd= x(2);Rs= x(3);Rsh= x(4);n= x(5);
q = 1.60217646e-19;k = 1.3806503e-23;
T = 273.15 + 45.0; % Sıcaklık 45 derece için hesaplanıyor
Vt = k * T / q;
NS=1;
NP=1;
sonuc = NP*Iph - NP*Isd * ( exp( (VL/NS + (IL*Rs/NP)) / (Vt*n) ) - 1.0 ) ...
- ( NP*(VL/NS + (IL*Rs/NP))/Rsh ) - IL;
end

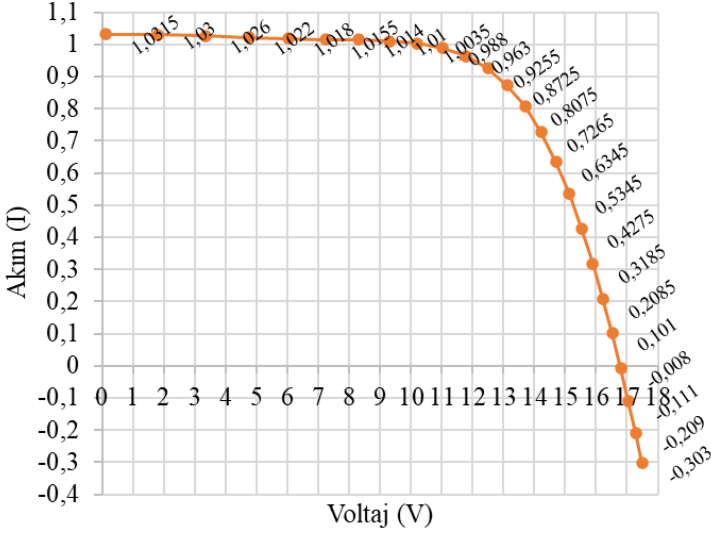
```

Şekil 6. FV modelin Matlab kaynak kodu

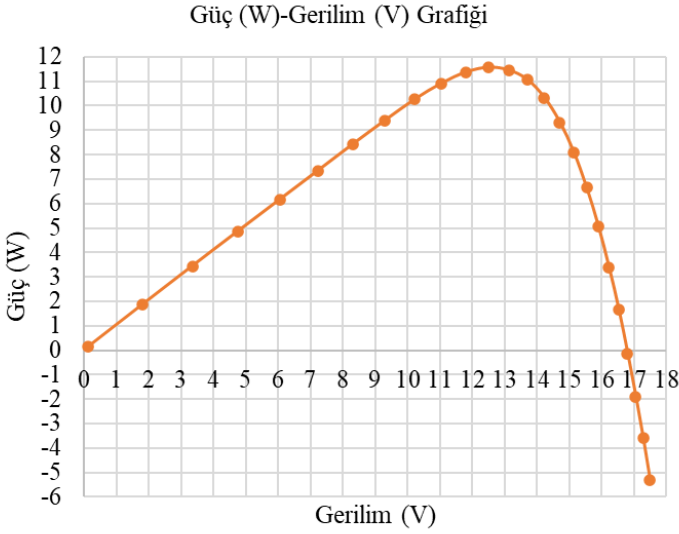
## 5. FV sistemlerin simülasyonu

FV sistemlerini kontrol etmek ve optimize etmek için, ölçülen akım-gerilim (I-V) verilerine dayalı doğru modeli kullanarak FV dizilerinin çalışma sırasındaki gerçek davranışını değerlendirmek için Tablo 3'teki veri seti kullanılarak Şekil 7'deki akım-gerilim grafiği oluşturulmuştur. Şekil 7'deki I-V karakteristik grafiğinin doğrusal olmadığı görülmektedir. Şekil 8'de FV sistemlerin güç-gerilim (W-V) grafiği Tablo 3'teki verilere göre oluşturulmuştur. Şekil 8'de maksimum güç noktasının da FV sistemlerin parametrelerine bağlı olduğu görülmektedir.





Şekil 7. FV modül Akım-Gerilim (I-V) karakteristik eğrisi



Şekil 8. FV modül Güç-Gerilim (W-V) karakteristik eğrisi

## 6. Sonuçlar

Literatürde FV sistemlerin parametre çıkarımı için ilk zamanlarda klasik matematiksel yöntemler işe koşülürken son zamanlarda yapay zeka optimizasyon algoritmalarına bağlı sezgisel yöntemler ile çözümler

geliştirilmekte olduğu görölmektedir. Bu çalışmada tek diyotlu, çift diyotlu ve FV modöllerin parametre tahmini çıkarımının matematiksel denklemleri verilmiştir. Yapay zekâ optimizasyon algoritmaları ile çözüm için amaç fonksiyonları Matlab kaynak koduyla yazılmıştır. FV sistemlerin Akım-Gerilim (I-V) ve Güç-Gerilim (W-V) grafiklerinin karakteristik eğrilerinin doğrusal olmadığı Şekil 7 ve Şekil 8'de görölmektedir. Bundan dolayı parametrelerin doğru bir Şekilde bilinmesi güneş pilinin performans değerlendirmesi ve kalite kontrolü için önemlidir. Aynı zamanda PV sistemlerinin doğru parametre çıkarımı maksimum güç noktasının izlenmesinde (Güç-Gerilim (W-V)) de önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

- AlHajri, M. F., El-Naggar, K. M., AlRashidi, M. R., & Al-Othman, A. K. (2012). Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search. *Renewable Energy*, 44, 238-245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.082>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656-660. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.002>
- Askarzadeh, A. (2014). Comparison of particle swarm optimization and other metaheuristics on electricity demand estimation: A case study of Iran. *Energy*, 72, 484-491. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.070>
- Askarzadeh, A., & Rezazadeh, A. (2012). Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms. *Solar Energy*, 86(11), 3241-3249. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.018>
- Askarzadeh, A., & Rezazadeh, A. (2013). Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models. *Applied Energy*, 102, 943-949. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.052>
- Beşkirli, A., Beskirli, M., Hakli, H., & Uguz, H. (2018). Comparing Energy Demand Estimation Using Artificial Algae Algorithm: The Case of Turkey. 10.18178/JO CET.2018.6.4.486
- Beşkirli, A., Temurtas, H., & Özdemir, D. (2020). Determination with Linear Form of Turkey's Energy Demand Forecasting by the Tree Seed Algorithm and the Modified Tree Seed Algorithm. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 20, 27-34. 10.4316/AECE.2020.02004
- Chan, D. S. H., & Phang, J. C. H. (1987). Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34(2), 286-293. 10.1109/T-ED.1987.22920
- Chan, D. S. H., Phillips, J. R., & Phang, J. C. H. (1986). A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. *Solid-State Electronics*, 29(3), 329-337. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(86\)90212-1](https://doi.org/10.1016/0038-1101(86)90212-1)
- Chegaar, M., Ouenoughi, Z., & Guechi, F. (2004). Extracting dc parameters of solar cells under illumination. *Vacuum*, 75(4), 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.001>
- Chegaar, M., Ouenoughi, Z., & Hoffmann, A. (2001). A new method for evaluating illuminated solar cell parameters. *Solid-State Electronics*, 45(2), 293-296. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(00\)00277-X](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(00)00277-X)
- Chin, V. J., Salam, Z., & Ishaque, K. (2015). Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. *Applied Energy*, 154, 500-519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.035>

- Colak, I., Demirtas, M., & Kabalci, E. (2014). Design, optimisation and application of a resonant DC link inverter for solar energy systems. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 33(5), 1761-1776. [10.1108/COMPEL-06-2013-0200](https://doi.org/10.1108/COMPEL-06-2013-0200)
- Easwarakhanthan, T., Bottin, J., Bouhouch, I., & Boutrif, C. (1986). Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameters with Microcomputers. *International Journal of Solar Energy*, 4(1), 1-12. [10.1080/01425918608909835](https://doi.org/10.1080/01425918608909835)
- Gümüş, Z., & Demirtaş, M. (2020). Comparison of the Algorithms Used in Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems under Partial Shading Conditions. *Journal of Polytechnic*, 1-15. [10.2339/politeknik.725255](https://doi.org/10.2339/politeknik.725255)
- Ishaque, K., Salam, Z., & Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 586-594. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>
- Jain, A., & Kapoor, A. (2004). Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 81(2), 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.11.018>
- Kankal, M., Akpınar, A., Kömürçü, M. İ., & Özşahin, T. Ş. (2011). Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. *Applied Energy*, 88(5), 1927-1939. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.005>
- Kler, D., Sharma, P., Banerjee, A., Rana, K. P. S., & Kumar, V. (2017). PV cell and module efficient parameters estimation using Evaporation Rate based Water Cycle Algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 35, 93-110. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.02.005>
- Muhsen, D. H., Ghazali, A. B., Khatib, T., & Abed, I. A. (2015). Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management*, 105, 552-561. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.023>
- Niu, Q., Zhang, H., & Li, K. (2014). An improved TLBO with elite strategy for parameters identification of PEM fuel cell and solar cell models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(8), 3837-3854. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.110>
- Nunes, H. G. G., Pombo, J. A. N., Mariano, S. J. P. S., Calado, M. R. A., & Felipe de Souza, J. A. M. (2018). A new high performance method for determining the parameters of PV cells and modules based on guaranteed convergence particle swarm optimization. *Applied Energy*, 211, 774-791. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.078>
- Ouenoughi, Z., & Chegaar, M. (1999). A simpler method for extracting solar cell parameters using the conductance method. *Solid-State Electronics*, 43(11), 1985-1988. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00174-4](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00174-4)

- Premkumar, M., Babu, T. S., Umashankar, S., & Sowmya, R. (2020). A new metaphor-less algorithms for the photovoltaic cell parameter estimation. *Optik*, 208, 164559. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164559>
- Sellai, A., & Ouennoughi, Z. (2005). Extraction of illuminated solar cell and Schottky diode parameters using a genetic algorithm. *International Journal of Modern Physics C*, 16, 1043-1050. 10.1142/S0129183105007704
- Tefek, M. F., & Uğuz, H. (2019). Solution of economic dispatch problem for wind-thermal power systems by a modified hybrid optimization method *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 1871-1895.
- Uzlu, E., Kankal, M., Akpınar, A., & Dede, T. (2014). Estimates of energy consumption in Turkey using neural networks with the teaching-learning-based optimization algorithm. *Energy*, 75, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.078>
- Wolf, M., Noel, G. T., & Stirn, R. J. (1977). Investigation of the double exponential in the current—Voltage characteristics of silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 24(4), 419-428. 10.1109/T-ED.1977.18750
- Xiong, G., Zhang, J., Shi, D., & He, Y. (2018). Parameter extraction of solar photovoltaic models using an improved whale optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 174, 388-405. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.053>
- Yazdanifard, F., Ameri, M., & Ebrahimmia-Bajestan, E. (2017). Performance of nanofluid-based photovoltaic/thermal systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 323-352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.025>
- Ye, M., Wang, X., & Xu, Y. (2009). Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization. *Journal of Applied Physics*, 105(9), 094502. 10.1063/1.3122082
- Yu, K., Liang, J. J., Qu, B. Y., Chen, X., & Wang, H. (2017). Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 150, 742-753. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.063>
- Yu, K., Qu, B., Yue, C., Ge, S., Chen, X., & Liang, J. (2019). A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module. *Applied Energy*, 237, 241-257. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.008>
- Yuan, X., He, Y., & Liu, L. (2015). Parameter extraction of solar cell models using chaotic asexual reproduction optimization. *Neural Computing and Applications*, 26(5), 1227-1239. 10.1007/s00521-014-1795-6

# Bölüm 15

## GÜNCEL METASEZGİSEL ALGORİTMALAR



*Mehmet Fatih TEFEK<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi. Mehmet Fatih TEFEK, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mehmetfatihfefek@osmaniye.edu.tr



## 1. Giriş

Optimizasyon mümkün olan en düşük maliyeti göz önünde bulundurarak tüm tasarım gereksinimlerini karşılamak için belirli bir sistemin belirli parametreleri için en uygun değerleri bulma sürecine denir. Optimizasyon problemleri bilimin tüm alanlarında bulunabilir, bu nedenle yeni optimizasyon algoritmaları geliştirmek çok önemlidir ve zorlu bir araştırma görevidir (Hashim ve ark., 2019). Metasezgisel algoritmalar, optimizasyon problemlerinin klasik matematik yöntemler ile çözüm üretmediği problemlerin çözümüne odaklanmaktadır. “Metasezgisel” kelimesi ilk olarak Glover (1986) tarafından öne sürülmüştür. Metasezgisel algoritmalar, birçok zorlu optimizasyon problemi çözümü için etkili yaklaşımlar olarak yaygın şekilde kabul edilmektedir (Boussaïd ve ark., 2013).

Optimizasyon robotik, bilgisayar ağları, güvenlik, mühendislik tasarımı, veri madenciliği, finans, ekonomi ve diğerleri gibi birçok farklı uygulama alanlarını kapsamaktadır (Fausto ve ark., 2020) ve son zamanlarda metasezgisel algoritmalar bu alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, mühendislik uygulamalarında giderek daha popüler hale gelmesinin nedeni aşağıdaki maddelerde verilmiştir (Hashim ve ark., 2019; Mirjalili ve ark., 2016):

- i. Oldukça basit kavramlara dayanmaktadır ve uygulaması kolaydır;
- ii. Gradyan bilgisi veya Hessian matrisi kullanımı gerektirmez;
- iii. Yerel optimayı atlayabilir;
- iv. Farklı disiplinleri kapsayan çok çeşitli problemlerde kullanılabilir.

Metasezgisel algoritmalar temelinde doğadan ilham alınarak oluşturulmuş algoritmalar. Doğadan ilham alan metasezgisel algoritmalar, literatürde evrime dayalı, sürü tabanlı, fizik tabanlı ve insan davranışına dayalı algoritmalar olmak üzere 4 ana grupta sınıflandırılmıştır (Askari, Saeed, ve ark., 2020). Evrimsel algoritmalar, doğal evrim kavramından esinlenmiştir. Literatürde sıklıkla üzerinde durulan evrimsel algoritmalar genellikle, Genetik Algoritma (GA) (Holland, 1992), Diferansiyel Evrim (DE) (Lampinen ve ark., 2004; Storn ve ark., 1997) algoritmalarıdır. Sürü tabanlı algoritmalar: Kuşların veya balıkların besin aramasından ilham alan parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması (Kennedy ve ark., 1995), bal arılarının güneşe doğru halka dansı yaparak diğer arıları besin kaynağı olan çiçeklere yönlendirilmesinden ilham alan yapay arı koloni algoritması (YAK) (Karaboga ve ark., 2008), karıncaların bir biri ile iletişimi, besin arayışı, fenomen salgılaması özelliklerinden ilham alan Karınca Koloni Algoritması (KKA) (Dorigo ve ark., 1999); fizik tabanlı algoritmalar: Yerçekimi ve Newton kanunlarından ilham alan



Yerçekimi Arama Algoritması (YAA) (Rashedi ve ark., 2009), Isı Transfer Algoritması (ITA), Tavlama Benzetim Algoritması (TBA) (Kirkpatrick ve ark., 1983); insan davranışlarından ilham alan algoritmalar: Bir sınıftaki öğretmen ve öğrencinin etkileşiminden ilham alan Öğretme-Öğrenme Temelli Optimizasyonu (ÖÖTO) (Rao ve ark., 2011), futbol liglerinden ve takımlar ile oyuncular arasındaki yarışmalardan esinlenen Futbol Ligi Rekabet (FLR) algoritması (Moosavian ve ark., 2014), emperyalist rekabetten esinlenen bir optimizasyon algoritması emperyalist rekabetçi algoritma (ERA) (Atashpaz-Gargari ve ark., 2007) örnek olarak verilebilir. Bunlar haricinde bu algoritmaların modifiye ve hibrit yöntemlerine de literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır (Al-Tashi ve ark., 2020; Beşkirli, Temurtas, ve ark., 2020; Gupta ve ark., 2020; Mafarja ve ark., 2020; Tefek ve ark., 2019).

Metasezgisel algoritmalar literatürde, tek çözüm tabanlı algoritma ve popülasyon tabanlı algoritma olarak iki kategoride incelenmektedir (Dhiman ve ark., 2017). Tek çözüm tabanlı algoritmalar: Benzetimli tavlama (Kirkpatrick ve ark., 1983), tabu arama algoritması (Glover, 1986), GRAPS (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) yöntemi (Feo, Thomas A. ve ark., 1989; Feo, T. A. ve ark., 1995), değişken yakın komşuluk araması (Mladenović ve ark., 1997), rehberli yerel arama (Voudouris ve ark., 1999), yinelenen yerel arama (Stutzle, 1998) yöntemleri örnek verilebilir. Bununla birlikte, tek çözüm tabanlı algoritmalar, küresel optimum bulmamızı engelleyen yerel optimuma takılabilir. Bunun nedeni, belirli bir problem için rastgele üretilen tek bir çözümü yeniden biçimlendirmesidir. Öte yandan, popülasyon tabanlı algoritmalar küresel optimumu bulabilir. Bu nedenle, araştırmacılar günümüzde popülasyon temelli algoritmalarla yönelmişlerdir (Dhiman ve ark., 2019). Popülasyon tabanlı algoritmalar yukarıda bahsedilen ve dört gruba ayrılan doğadan ilhamlı algoritmalar olan Genetik Algoritma (GA) (Holland, 1992), parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması (Kennedy ve ark., 1995), Yerçekimi Arama Algoritması (YAA) (Rashedi ve ark., 2009) ve güncel optimizasyon algoritmaları örnek verilebilir.

Tek çözüm tabanlı algoritmada rastgele bir çözüm oluşturulur ve en uygun çözüm elde edilene kadar geliştirilir. Popülasyon tabanlı algoritmalar, çözümler belirli bir arama alanında rastgele geliştirilir ve en uygun çözüm elde edilene kadar iyileştirmeye çalışır. Tek çözüm tabanlı algoritmaların çoğu, rastgele çözüm üretme nedeni ile küresel optimum çözüme ulaşamamaktadır (Kaur ve ark., 2020). Bu durum tek çözüm tabanlı metasezgisel algoritmaların bir dezavantajıdır. Tek çözüm tabanlı metasezgisel algoritmalar daha çok sömürü odaklıdır. Popülasyon tabanlı metasezgisel algoritmalar ise daha çok keşif odaklıdır (Boussaïd ve ark., 2013). Meta sezgisel algoritmaların ana bileşenleri keşif ve sömürüdür (Alba ve ark., 2005; Fausto ve ark., 2020; Olorunda ve ark., 2008). Keşif,

algoritmanın arama alanının farklı ümit vaat eden bölgelerine ulaşmasını sağlarken, sömürü, belirli bir bölgede optimal çözümlerin aranmasını sağlar (Lozano ve ark., 2010).

Optimizasyon probleminin stokastik doğası nedeniyle bu bileşenler arasında denge kurmak zordur (Dhiman ve ark., 2017; Fausto ve ark., 2020). Metasezgisel algoritmalar, çözümlerin çeşitliliğini artırmak için arama alanını keşfetmeyi hedeflerken, sömürü operatörleri gelecek vaat eden bölgelerdeki araştırmayı yoğunlaştırmaktadır. Metasezgisel bir algoritmanın başarısı temelde keşif ve sömürü dengesine bağlıdır (Tan ve ark., 2009). Keşif ve sömürü dengesi problemin zorluk derecesi ve boyutuna da bağlı olduğu için optimal bir denge bulmak kolay değildir (Fausto ve ark., 2020; Tan ve ark., 2009). Bir metasezgisel, keşif (çeşitlendirme) ve sömürü (yoğunlaştırma) arasında bir denge sağlayabilirse, belirli bir optimizasyon probleminde başarılı olacaktır. Arama alanının bazı kısımlarını yüksek kaliteli çözümlerle belirlemek için sömürüye ihtiyaç vardır. Sömürü, birikmiş arama deneyiminin bazı umut verici alanlarında aramayı yoğunlaştırmak için önemlidir (Boussaïd ve ark., 2013). Keşif ve sömürü dengesini sağlamak amacıyla her geçen gün yeni metasezgisel algoritmalar önerilmektedir.

## 2. Güncel Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon problemlerinin çoğu, doğrusal olmayan kısıtlamalardan oluşan çok sayıda çözüm alanına sahiptir. Bu tür sorunların, dışbükey olmayan ve karmaşık doğası ile birlikte yüksek hesaplama maliyeti de vardır (Kaur ve ark., 2020). Büyük ölçekli optimizasyon problemlerinin çözülmesinde, mevcut optimizasyon algoritmalarının çoğunun performansı, boyutluluk arttığında çok hızlı bir şekilde bozulmaktadır (Beşkirli, Özdemir, ve ark., 2020; Boussaïd ve ark., 2013; Yapıcı ve ark., 2019). Optimizasyon problemleri bahsedildiği gibi kendi içerisinde farklılaşmasından dolayı bu problemlerin çözümü için bir tek metasezgisel yöntem yetersiz kalmaktadır (Wolpert ve ark., 1997). Bundan dolayı literatürde optimum çözüm veya optimum çözüme yakın en iyi çözümü vermeye çalışan metasezgisel algoritmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Tablo 1’de güncel metasezgisel optimizasyon algoritmalarının bazıları verilmiştir. Tablo 1’deki algoritmalara yenileri eklenerek sayı her geçen gün artmakla beraber literatürdeki diğer algoritmalar için Boussaïd ve ark. (2013) ve (Dokeroglu ve ark., 2019) derleme çalışmalarına bakılabilir.

Tablo 1. Güncel Optimizasyon Algoritmaları

Algoritma	Yazar ve Yıl	İlham Kaynağı
Tunikat Sürü Algoritması	Kaur ve ark. (2020)	Biyolojik esinli
Politik Optimize Edici Algoritması	Askari, Saeed, ve ark. (2020)	Sosyal (insan) esinli
Yığın Tabanlı Algoritma	Askari, Saeed, ve ark. (2020)	Sosyal (insan) esinli
Göçebe insanlar algoritması	Salih ve ark. (2020)	Sosyal (insan) esinli
Henry gaz çözünürlük optimizasyonu	Hashim ve ark. (2019)	Fizik esinli
Martı optimizasyon algoritması	Dhiman ve ark. (2019)	Biyolojik esinli
Yol Bulucu Algoritması	Yapici ve ark. (2019)	Sürü esinli
Atom arama optimizasyonu	Zhao, Weiguo ve ark. (2019)	Fizik esinli
Yelken Balığı algoritması	Shadravan ve ark. (2019)	Biyolojik sürü esinli
Harris Şahin algoritması	Heidari ve ark. (2019)	Sürü esinli
Ludo oyun tabanlı algoritma	Singh ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Güve-alev optimizasyon algoritması	Xu ve ark. (2019)	Biyolojik sürü esinli
Geyik avı optimizasyon algoritması	Brammya ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Fakir-zengin optimizasyon algoritması	Samareh Moosavi ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Beklenti algoritması	Shastri A.S. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Sosyal medya optimizasyon algoritması	Crawford ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Arz Talebe Dayalı Optimizasyon	Zhao, W. ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Sosyal mimik optimizasyon algoritması	Balochian ve ark. (2019)	Sosyal (insan) esinli
Ağaç büyüme algoritması	Cheraghalipour ve ark. (2018)	Biyolojik sürü esinli
Takım oyun algoritması	Mahmoodabadi ve ark. (2018)	Sosyal (insan) esinli
Yapay flora optimizasyon algoritması	Cheng ve ark. (2018)	Biyolojik sürü esinli
İmparator penguen algoritması	Dhiman ve ark. (2018)	Biyolojik sürü esinli
Ağızda kuluçka balık algoritması	Jahani ve ark. (2018)	Biyolojik sürü esinli
Çok iyimser yöntem algoritması	Vommi ve ark. (2018)	Sosyal (insan) esinli
Kuyruk arama algoritması	Zhang ve ark. (2018)	Sosyal (insan) esinli

### 3. Bazı Güncel Metasezgisel Algoritmaların İncelenmesi

Bu çalışmada Tablo 1’de verilen özellikle 2019 ve 2020 yıllarında öne sürülen Politik Optimize Edici Algoritması (POEA), Yığın Tabanlı Algoritması (YTA), Yol Bulucu Algoritmalarının (YBA) incelenmesi yapılmıştır.

#### 3.1. Politik Optimize Edici Algoritması (POEA)

Çok aşamalı siyaset sürecinden esinlenen Politika Optimize Edici algoritması (POEA) yeni bir küresel optimizasyon algoritmasıdır. POEA, seçim bölgesi tahsisi, parti değiştirme, seçim kampanyası, partiler arası seçimler ve parlamento işleri gibi siyasetin tüm ana aşamalarının matematiksel haritasını ortaya koymuştur. Önerilen algoritma, nüfusu mantıksal olarak siyasi partilere ve seçim bölgelerine bölerek her çözüme ikili bir rol atar, bu da her adayın parti lideri ve seçim bölgesi galibi ile ilgili konumunu güncellemesini kolaylaştırır (Askari, Younas, ve ark., 2020). POEA’nın matematikle modeli beş aşamada gerçekleşmektedir. Birinci aşamada parti oluşumu ve seçim bölgelerinin tahsisi yapılmaktadır. Bu aşamada arama uzayında her bir birey kendi seçim bölgesinde rastgele olarak belirlenir. İkinci aşamada keşif ve sömürü amaçlı seçim kampanyası yapılmaktadır. Bu aşama aday çözümlerin performansına yardımcı olmaktadır. Üçüncü aşamada keşif ve sömürüyü dengelemek için parti değiştirme aşamasıdır. Bu aşamada en iyi çözümler ile aday çözümler karşılıklı yer değiştirmektedir. Dördüncü aşamada seçim yapılmaktadır. Bir seçim bölgesinde yarışan tüm adayların uygunluğu değerlendirilmektedir. Beşinci aşamada ise sömürü ve yakınsama için parlamento işlemi yapılmaktadır.

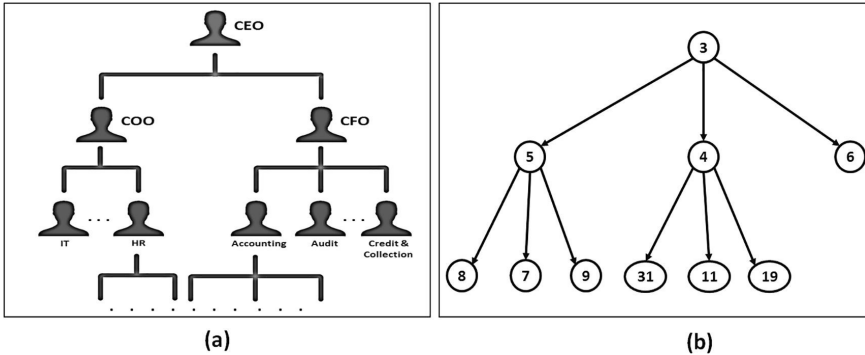
POEA’nın performansını değerlendirmek için kıyaslama (benchmark) fonksiyonları ve son teknoloji algoritmalar (state of art) kullanılmıştır. Deneysel çalışma ve istatistiksel sonuçlar, POEA’nın ya son teknoloji algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini ya da eşdeğer performans gösterdiğini göstermektedir. Dahası, POEA’nun gerçek dünyadaki problemlere uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Kısıtlı mühendislik tasarım problemleri ve sonuçlar POEA’nın etkili çözümler ürettiğini göstermektedir. Ayrıca, yüksek boyutluluğun POEA performansını üzerindeki etkisi kıyaslama fonksiyonları performansının, fonksiyonların boyutları yükseltile bile tutarlı kaldığı gösterilmiştir (Askari, Younas, ve ark., 2020).

POEA’nın vurgulanması gereken bazı zayıf noktaları vardır. Birincisi, POEA’nın parti değiştirme ve parlamento işleri aşamaları nedeniyle biraz zaman karmaşıklığı artmaktadır; ancak bu ek yük POEA’nın maliyetini asimptotik olarak artırmamaktadır. İkinci olarak, Askari, Younas, ve ark. (2020) çalışmasında toplam parti sayısının, parti üye sayısının ve toplam

seçim bölgesi sayısının eşit olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, eşleştirmeyi çok basit hale getirmekte ve ayrıca ayarlanabilir parametrelerin ek yükünü azaltmaktadır. Bununla birlikte, POEA'nın genel performansının, bu varsayımı hafifletmek suretiyle, ancak ek parametreler ve gelecekteki bir yön olarak bırakılmış farklı bir seçim bölgesi tahsis planı önerisi pahasına iyileştirilebileceğine inanılmaktadır. Üçüncüsü, en iyi sonuçları elde etmek için parti değiştirme oranının üst sınırını iyi ayarlamak gerekmektedir. Bu bağlamda Askari, Younas, ve ark. (2020) çalışması, algoritma geliştiricileri tarafından bahsedilen bu üç dezavantajlı durum göz önünde bulundurularak yeni veya geliştirilmiş POEA öne sürülebilir.

### 3.2. Yığın Tabanlı Algoritma

Yığın tabanlı algoritma (YTA), bir organizasyonda, ortak bir amaç için çalışan bir grup insan, Kurumsal Derece Hiyerarşisi (KDH) adı verilen bir hiyerarşide kendilerini organize etmedikçe hedeflerine ulaşamayabilir. Bu genel kaideye bağlı, arama araçlarını uygunluklarına göre bir hiyerarşide mantıksal olarak düzenleyen yeni bir optimizasyon algoritması önermek için KDH kavramını haritalandırma önerilmektedir. Önerilen algoritma, KDH kavramını haritalamak için yığın veri yapısını kullandığı için yığın tabanlı optimize edici (YTA) olarak adlandırılmıştır (Askari, Saeed, ve ark., 2020). YTA'nın matematiksel modeli üç temel üzerine inşa edilmiştir: astlar ve onların acil patronları arasındaki etkileşim, meslektaşlar arasındaki etkileşim ve çalışanların kendi katkıları. Şekil 1'de YTA'nın temeline oturtulan hiyerarşik model verilmiştir. Şekil 1 (a)'da gerçek yaşamda bir şirketteki ast ve üst ilişkisi (b)'de ise üç dereceli minimum hiyerarşik ağaç yığın veri modeli gösterilmiştir (Askari, Saeed, ve ark., 2020).



Şekil 1. a) Hiyerarşik model (ast-üst ilişkisi) b) Hiyerarşik yığın ağaç veri yapısı modeli (Askari, Saeed, ve ark., 2020)

Hiyerarşinin temel amacı, resmi faaliyetlere organize bir şekil vermek ve nihai hedeflere en uygun şekilde ulaşmaktır. Üst düzeyler genellikle yönetim kurulu yöneticilerini ve üyelerini temsil eder, orta düzey yöneticileri ve denetçileri temsil eder ve alt düzeyler çalışanları temsil eder. Üst düzeydeki kişiler, alt düzeydekiler için başkan / üst, aynı düzeydeki

kişiler meslektaş / iş arkadaşı, alt düzeydekiler ise alt düzeydeki kişiler üst seviyeler. Bu bağlamda YTA algoritması dört temel adımda matematiksel formüllerle ifade edilmektedir (Askari, Saeed, ve ark., 2020):

- i. Kurumsal sıralama hiyerarşisini (KDH) modellemek,
- ii. astlar ile yakın patron arasındaki etkileşimi matematiksel olarak modellemek,
- iii. arasındaki etkileşimi matematiksel olarak modellemek meslektaşlar ve
- iv. bir çalışanın bir görevi yerine getirmesi için kendi katkısını eklemektir.

Askari, Saeed, ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada YTA'nın keşif ve sömürü arasında uygun bir denge sağlamak ve sürdürmek için, matematiksel denklemler üç ana KDH öne sürmüşlerdir. Yerel optimalden kaçmak ve önerilen algoritmanın kullanım kapasitesinden ödün vermeden erken yakınsamayı önlemek için, keşif ve kullanma yeteneklerini periyodik olarak birleştiren kendi kendine uyarlanabilir bir parametre tasarlamışlardır. Önerilen algoritmanın etkinliğini doğrulamak için, tek modlu, çok modlu ve CEC-BC-2017 kıyaslama fonksiyonları dahil olmak üzere çok çeşitli kıyaslama fonksiyonlarını çözmek için yedi adet son teknoloji ve yüksek performanslı optimizasyon algoritması ile karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmalar ve istatistiksel sonuçlara göre CEC-BC-2017 kıyaslama fonksiyonlarında ve gerçek dünya problemlerinde YTA etkili çözümler bulduğu görülmüştür. Askari, Saeed, ve ark. (2020) önerilen algoritmanın başlangıç niteliği göz önüne alındığında, gelecekte birçok uzantı, iyileştirme ve değerlendirme yapılacağını öngörmektedirler. YTA'nın geliştirilmesi için öneriler sunmuşlardır. Bunlar:

- İkili veya daha yüksek dereceli yığınları denemek mümkündür.
- Rastgele görevlilerle etkileşim veya meslektaşlar yerine aynı patronun astları arasındaki etkileşim araştırılabilir.

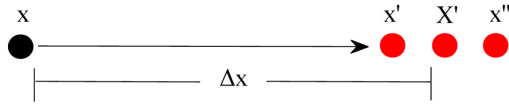
Yığın, her arama aracısını güncelledikten hemen sonra heapify'ı çağırmak yerine tüm popülasyonu güncelledikten sonra yeniden yapılandırılabilir (Askari, Saeed, ve ark., 2020).

### 3.3. Yol Bulucu Algoritması

Yol bulucu algoritma (YBA), Yapıcı ve ark. (2019) tarafından hayvan sürülerinin arama, kullanma ve avlanma yetenekleri ilham alarak geliştirilmiştir. Sürüdeki tüm davranışlar, tüm bireylerin ortak eylemi temelinde gerçekleştirilir. Bununla birlikte, bir birey sürüye önderlik eder ve bu birey birçok eylemi yönetir. Ayrıca bu birey sürüleri mera, su ve beslenme alanı gibi hedeflere götürür. Lider, hedefe ulaşma yeteneğine bağlı olarak değişebilmektedir (Lee ve ark., 2012; Peterson ve ark., 2002; Yapıcı ve ark., 2019). YBA'da hayvan sürülerinin liderlik, lidere

bağlı diğer bireyler ve alt bireyler ile olan hiyerarşik yapısı matematiksel modellerle açıklanmıştır.

YBA'da, yol bulucu en iyi yiyecek alanını (avı) bulmaya çalışır. En iyi yiyecek alanı küresel optimum olduğu varsayılmıştır. Herhangi bir yinelemede, yol bulucunun konumu mevcut yinelemede mevcut optimum olarak atanır, böylece diğer üyeler ona doğru hareket eder. Bununla birlikte, asıl sorun, belirsizliği nedeniyle küresel optimizasyon problemlerinin optimumunu bulmaktır. Bu nedenle, şimdiye kadar tespit edilen en iyi çözümün küresel optimum olduğunu varsayılır ve sürü tarafından yararlanılacak yiyecek alanı (av) olarak kabul edilmiştir. Önerilen yöntem, sürü üyelerinin pozisyonlarının rastgele bir şekilde başlatılmasıyla başlar. Daha sonra her bireyin uygunluğu hesaplanır ve en iyi uygunluğa sahip bireyin konumu izlenecek yol gösterici olarak seçilir. Yol bulucu hareketini konum vektörleri ile tanımlanmaktadır. Şekil 2'de yol bulucunun (liderin) vektörel konumu temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Yol bulucu (lider) konum vektörü (Yapıcı ve ark., 2019)

Yol bulucunun şu andaki konumu  $X$ , bir sonraki konumları ise sırasıyla  $x'$ ,  $X''$  ve  $x'''$  olduğu varsayılırsa yol bulucu keşif ile bu konumlardaki avı tespit etmektedir. Bu durum, YBA'nın arama alanını küresel olarak keşfetmesine olanak tanımaktadır.  $\Delta x$ , yol bulucunun bir noktadan diğerine geçmesi için aldığı mesafeyi göstermektedir. Yapıcı ve ark. (2019) çalışmasında çok amaç (multi-objective) fonksiyonlu problem çözümlerini de geliştirmişlerdir.

YBA'da lider ve sürünün diğer üyeleri arasındaki hiyerarşiyi kullanarak sürülerin kolektif hareketlerini taklit etmektedir. Yapıcı ve ark. (2019) çalışmalarında, lider ve diğer üyelerin konumunu güncellemek için iki ayrı matematiksel formül kullanmışlardır. YBA yöntemi, farklı test modellerinde simüle edilmiştir. 2B ve 3B uzaydaki simülasyonlar, sunulan modelin en uygun çözümleri arayabileceğini göstermiştir. İstatistiksel çalışmalarda YBA'nın çözümleri diğer yöntemlerden anlamlı bir şekilde daha iyi bir performans gösterdiği saptanmıştır.

YBA yönteminin literatürdeki yöntemler arasında dikkate değer olduğu ve farklı alanlardaki diğer problemlere de uygulanabileceği Yapıcı ve ark. (2019) tarafından tespit edilmiştir. Ek olarak, YBA'nın mutasyon operatörü ve ikili (binary) sürümü yapılabileceği öngörülmektedir.

#### 4. Niçin Güncel Metasezgisel Algoritmalara Gerekseim Var?

Bunu açıklayabilmek için Wolpert ve ark. (1997) “Optimizasyon için bedava öğle yemeği yok (No free lunch) teoremi” veya No free lunch (NFL) çalışmasında bir metasezgisel algoritma, tüm optimizasyon problemlerini çözmek için uygun olmadığını, bir metasezgisel algoritmanın bazı optimizasyon problemlerinde çok iyi çözümler verebileceğini, ancak tüm optimizasyon problemlerinde iyi performans gösteremeyeceğini kanıtlamıştır. Bu nedenle, NFL teorisıyla yeni metasezgisel algoritmaların önerilmesine veya mevcut algoritmaların geliştirilmesine gerekseim duyulduğu fikri öne sürülmüştür.

#### 5. Sonuç

Bu çalışmada giriş bölümünde metasezgisel algoritmaların kullanım alanları, gerekliliği ve sınıflandırılması yapılmıştır. Daha sonra bazı güncel metasezgisel algoritmaların (özellikle 2018-2020 yılları arasındaki) Tablo 1’de verilmiştir. İnsan davranışlarından esinlenerek önerilen popülasyon tabanlı Politik Optimize Edici Algoritma (POEA), Yığın Tabanlı Algoritma (YTA) ve Yol Bulucu Algoritma (YBA) ana hatları ile bahsedilmiştir. Özellikle bu üç algoritmanın yeni veya modifiye formlarının algoritma geliştiricileri tarafından ele alınabileceği düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Al-Tashi, Q., Abdulkadir, S. J., Rais, H. M., Mirjalili, S., Alhussian, H., Ragab, M. G., & Alqushaibi, A. (2020). Binary Multi-Objective Grey Wolf Optimizer for Feature Selection in Classification. *IEEE Access*, 8, 106247-106263. 10.1109/ACCESS.2020.3000040
- Alba, E., & Dorronsoro, B. (2005). The exploration/exploitation tradeoff in dynamic cellular genetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(2), 126-142. 10.1109/TEVC.2005.843751
- Askari, Q., Saeed, M., & Younas, I. (2020). Heap-based optimizer inspired by corporate rank hierarchy for global optimization. *Expert Systems with Applications*, 161, 113702. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113702>
- Askari, Q., Younas, I., & Saeed, M. (2020). Political Optimizer: A novel socio-inspired meta-heuristic for global optimization. *Knowledge-Based Systems*, 195, 105709. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2020.105709>
- Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007, 25-28 Sept. 2007). *Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition*. Paper presented at the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation.
- Balochian, S., & Baloochian, H. (2019). Social mimic optimization algorithm and engineering applications. *Expert Systems with Applications*, 134, 178-191. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.035>
- Beşkirli, A., Özdemir, D., & Temurtaş, H. (2020). A comparison of modified tree-seed algorithm for high-dimensional numerical functions. *Neural Computing and Applications*, 32(11), 6877-6911. 10.1007/s00521-019-04155-3
- Beşkirli, A., Temurtas, H., & Özdemir, D. (2020). Determination with Linear Form of Turkey's Energy Demand Forecasting by the Tree Seed Algorithm and the Modified Tree Seed Algorithm. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 20, 27-34. 10.4316/AECE.2020.02004
- Boussaïd, I., Lepagnot, J., & Siarry, P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237, 82-117. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.02.041>
- Brammya, G., Praveena, S., Ninu Preetha, N. S., Ramya, R., Rajakumar, B. R., & Binu, D. (2019). Deer Hunting Optimization Algorithm: A New Nature-Inspired Meta-heuristic Paradigm. *The Computer Journal*. 10.1093/comjnl/bxy133
- Cheng, L., Wu, X.-h., & Wang, Y. (2018). Artificial Flora (AF) Optimization Algorithm. *Applied Sciences*, 8, 329. 10.3390/app8030329
- Cheraghali-pour, A., Hajiaghayi-Keshteli, M., & Paydar, M. M. (2018). Tree Growth Algorithm (TGA): A novel approach for solving optimization

- problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 72, 393-414. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.04.021>
- Crawford, B., Soto, R., Cabrera, G., Salas-Fernández, A., & Paredes, F. (2019) Using a Social Media Inspired Optimization Algorithm to Solve the Set Covering Problem. In: *Vol. 11578 LNCS. 11th International Conference on Social Computing and Social Media, SCSM 2019, held as part of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction, HCI International 2019* (pp. 43-52): Springer Verlag.
- Dhiman, G., & Kumar, V. (2017). Spotted hyena optimizer: A novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications. *Advances in Engineering Software*, 114, 48-70. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.05.014>
- Dhiman, G., & Kumar, V. (2018). Emperor penguin optimizer: A bio-inspired algorithm for engineering problems. *Knowledge-Based Systems*, 159, 20-50. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.06.001>
- Dhiman, G., & Kumar, V. (2019). Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems. *Knowledge-Based Systems*, 165, 169-196. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.11.024>
- Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T., & Cosar, A. (2019). A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106040. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106040>
- Dorigo, M., & Caro, G. D. (1999, 6-9 July 1999). *Ant colony optimization: a new meta-heuristic*. Paper presented at the Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406).
- Fausto, F., Reyna-Orta, A., Cuevas, E., Andrade, Á. G., & Perez-Cisneros, M. (2020). From ants to whales: metaheuristics for all tastes. *Artificial Intelligence Review*, 53(1), 753-810. [10.1007/s10462-018-09676-2](https://doi.org/10.1007/s10462-018-09676-2)
- Feo, T. A., & Resende, M. G. C. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 8(2), 67-71. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(89\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0167-6377(89)90002-3)
- Feo, T. A., & Resende, M. G. C. (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6(2), 109-133. [10.1007/BF01096763](https://doi.org/10.1007/BF01096763)
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533-549. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(86\)90048-1](https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1)
- Gupta, S., Deep, K., Mirjalili, S., & Kim, J. H. (2020). A modified Sine Cosine Algorithm with novel transition parameter and mutation operator for global optimization. *Expert Systems with Applications*, 154, 113395. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113395>

- Hashim, F. A., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., Al-Atabany, W., & Mirjalili, S. (2019). Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm. *Future Generation Computer Systems*, 101, 646-667. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.015>
- Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, 97, 849-872. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
- Holland, J. H. (1992). Schemata. *Adaptation in Nature and Artificial Systems*, 2003, 66.
- Jahani, E., & Chizari, M. (2018). Tackling global optimization problems with a novel algorithm – Mouth Brooding Fish algorithm. *Applied Soft Computing*, 62, 987-1002. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.09.035>
- Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.05.007>
- Kaur, S., Awasthi, L. K., Sangal, A. L., & Dhiman, G. (2020). Tunicate Swarm Algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 90, 103541. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103541>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, 27 Nov.-1 Dec. 1995). *Particle swarm optimization*. Paper presented at the Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.
- Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680. [10.1126/science.220.4598.671](https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671)
- Lampinen, J., & Storn, R. (2004). Differential Evolution. *New Optimization Techniques in Engineering* (pp. 123-166). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, P. C., & Moss, C. J. (2012). Wild female African elephants (*Loxodonta africana*) exhibit personality traits of leadership and social integration. *Journal of Comparative Psychology*, 126(3), 224-232.
- Lozano, M., & García-Martínez, C. (2010). Hybrid metaheuristics with evolutionary algorithms specializing in intensification and diversification: Overview and progress report. *Computers & Operations Research*, 37(3), 481-497. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.010>
- Mafarja, M., Qasem, A., Heidari, A. A., Aljarah, I., Faris, H., & Mirjalili, S. (2020). Efficient Hybrid Nature-Inspired Binary Optimizers for Feature Selection. *Cognitive Computation*, 12(1), 150-175. [10.1007/s12559-019-09668-6](https://doi.org/10.1007/s12559-019-09668-6)
- Mahmoodabadi, M. J., Rasekh, M., & Zohari, T. (2018). TGA: Team game algorithm. *Future Computing and Informatics Journal*, 3(2), 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2018.03.002>

- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11), 1097-1100. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00031-2)
- Moosavian, N., & Kasaei Roodsari, B. (2014). Soccer league competition algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for optimal design of water distribution networks. *Swarm and Evolutionary Computation*, 17, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2014.02.002>
- Olorunda, O., & Engelbrecht, A. P. (2008, 1-6 June 2008). *Measuring exploration/exploitation in particle swarms using swarm diversity*. Paper presented at the 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence).
- Peterson, R. O., Jacobs, A. K., Drummer, T. D., Mech, L. D., & Smith, D. W. (2002). Leadership behavior in relation to dominance and reproductive status in gray wolves, *Canis lupus*. *Canadian Journal of Zoology*, 80(8), 1405-1412. 10.1139/Z02-124
- Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2011). Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>
- Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., & Saryazdi, S. (2009). GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004>
- Salih, S. Q., & Alsewari, A. A. (2020). A new algorithm for normal and large-scale optimization problems: Nomadic People Optimizer. *Neural Computing and Applications*, 32(14), 10359-10386. 10.1007/s00521-019-04575-1
- Samareh Moosavi, S. H., & Bardsiri, V. K. (2019). Poor and rich optimization algorithm: A new human-based and multi populations algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 86, 165-181. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.025>
- Shadravan, S., Naji, H. R., & Bardsiri, V. K. (2019). The Sailfish Optimizer: A novel nature-inspired metaheuristic algorithm for solving constrained engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 80, 20-34. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.01.001>
- Shastri A.S., J. A., Sehgal A., Patel M., Kulkarni A.J. (2019). Expectation Algorithm (ExA): A Socio-inspired Optimization Methodology. S. P. K. In: Kulkarni A.J., Satapathy S.C., Husseinzadeh Kashan A., Tai K. (Ed.), *Socio-cultural Inspired Metaheuristics*.

- Singh, P. R., Elaziz, M. A., & Xiong, S. (2019). Ludo game-based metaheuristics for global and engineering optimization. *Applied Soft Computing*, 84, 105723. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105723>
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359. 10.1023/A:1008202821328
- Stutzle, T. G. (1998). *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems: Analysis, Improvements, and New Applications*. Ph.D, Darmstadt University of Technology.
- Tan, K. C., Chiam, S. C., Mamun, A. A., & Goh, C. K. (2009). Balancing exploration and exploitation with adaptive variation for evolutionary multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 701-713. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.025>
- Tefek, M. F., Uğuz, H., & Güçyetmez, M. (2019). A new hybrid gravitational search-teaching-learning-based optimization method for energy demand estimation of Turkey. *Neural Computing and Applications*, 31(7), 2939-2954. 10.1007/s00521-017-3244-9
- Vommi, V. B., & Vemula, R. (2018). A very optimistic method of minimization (VOMMI) for unconstrained problems. *Information Sciences*, 454-455, 255-274. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.04.046>
- Voudouris, C., & Tsang, E. (1999). Guided local search and its application to the traveling salesman problem. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 469-499. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00099-X)
- Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 67-82. 10.1109/4235.585893
- Xu, Y., Chen, H., Heidari, A. A., Luo, J., Zhang, Q., Zhao, X., & Li, C. (2019). An efficient chaotic mutative moth-flame-inspired optimizer for global optimization tasks. *Expert Systems with Applications*, 129, 135-155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.03.043>
- Yapici, H., & Cetinkaya, N. (2019). A new meta-heuristic optimizer: Pathfinder algorithm. *Applied Soft Computing*, 78, 545-568. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.03.012>
- Zhang, J., Xiao, M., Gao, L., & Pan, Q. (2018). Queuing search algorithm: A novel metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Applied Mathematical Modelling*, 63, 464-490. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.06.036>
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2019). A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater. *Future Generation Computer Systems*, 91, 601-610. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.037>
- Zhao, W., Wang, L., & Zhang, Z. (2019). Supply-Demand-Based Optimization: A Novel Economics-Inspired Algorithm for Global Optimization. *IEEE Access*, 7, 73182-73206. 10.1109/ACCESS.2019.2918753

# Bölüm 16

## **MİNERAL PUZOLANLARIN BETON VE ÇİMENTODA KULLANILABİLİRLİĞİNİN PUZOLANİK AKTİVİTE DENEYİ İLE ARAŞTIRILMASI**



***Yüksel Furkan YILDIRIM<sup>1</sup>***  
***Korkmaz YILDIRIM***

---

<sup>1</sup> Contact information: a: University of Beykent, Beykent Vocational School, Beylikdüzü, İstanbul, Turkey; b: University of Aydın Adnan Menderes, Aydın Vocational School, Efeler, Aydın, Turkey

\*Corresponding author: [furkanyildirim@beykent.edu.tr](mailto:furkanyildirim@beykent.edu.tr)



## Giriş

Doğal ham maddelerin hızla azaldığı günümüzde atık maddelerin değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması tüm dünyada araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Çimento ve beton imalatlarında maliyeti düşürmenin bir yolu, yapay puzolan olarak isimlendirdiğimiz yüksek fırın cürufu(YFC), uçucu kül (F ve C sınıfı), silis dumanı, metakaolin, fındık kabuğu külü vb. mineral katkıların kullanılabilirliği puzolanik aktivite deneyi yapılarak araştırılmıştır.

Uygulanmakta olan standart deneylerde puzolan miktarı %25 oranında ikame edilmekte isede, yaptığımız deneylerde puzolan ikmesi %20 seviyesinde tutulmuştur.

Binaların çevreye ve atmosfere verdiği etkiler insanoğlunu yeni arayışlara yönlendirmektedir. Gelişmiş ülkelerden ABD’de inşaa edilen konut, ticari ve sanayi yapıları toplam enerji miktarının; hammaddelerin %40’ını, tatlı su miktarının %12’ni ve elektriğin %70’ni tükettiğini tespit etmiştir. Bu bilinçsiz tüketim dünyadaki toplam sera gazı emisyonunun % 30’una neden olmakta ayrıca 136 milyon ton inşaat artığı üretmektedir ABD’de kullanılan doğal ham maddelerin %60’ı yapılarda kullanılması nedeniyle yapı malzemesinin seçiminde sürdürülebilirlik ve tasarım açısından önem arz etmektedir[1]. Sürdürülebilir yapılar için üretilmekte olan yeni malzemelerin servis ömürleri süresince en az düzeyde enerji tüketen, hammaddelerinin üretimi, işlenmesi, kullanımı, bakım-onarımı ve atık oluşumları esnasında çevreye, atmosfere ve insan sağlığına yararlı özellikler sunan malzemeler üretilmelidir. Malzemelerin yaşam döngüleri göz önüne alındığında, yapı malzemeleri ile üretilen ürünlere evrensel sürdürülebilirlik özelliği kazandırılmalıdır. Malzemelerin üretim sürecinde yeni yöntemler ve çeşitli önlemler uygulanmalıdır. Bu önlemlerden bazıları; atmosferde oluşan hava kirliliğini, atık malzeme miktarını azaltma ve geri dönüşümü yapılabilen bileşen atık miktarını artırmak olmalıdır[3].

Günümüzde ülkelerin uyguladığı sürdürülebilir malzeme üretim sürecinde; enerjinin, doğal kaynakların ve çevrenin korunması gibi üç önemli faktör bulunmaktadır.

Dünyamızda toplam CO<sub>2</sub> sera gazı emisyonunun yaklaşık % 5-10’unun çimento üretiminde ortaya çıktığı bilinmektedir.

Halen küresel ısınmanın temel sebebi olarak bilinen CO<sub>2</sub> sera gazı emisyonunun azaltılması amacıyla önemli girişimler başlatılmış ve araştırmalar devam ettirilmektedir. Ayrıca CO<sub>2</sub> sera gazı emisyonunu azaltmanın yolları olarak; enerji tüketiminin, çimento üretiminin neden olduğu çevresel etkinin azaltılması sayılabilir[4].

Çimento üretiminde maliyetin ve enerji tüketiminin azaltılmasında; bağlayıcı özelliğe sahip yapay puzolan malzemeler kullanılabilir.



Atık puzolanik özellik gösteren bu malzemelerin ekonomiye kazandırılması amacıyla üretilen katkılı çimentolar; portland CEM-1 çimentosuna göre daha az enerji tüketimi sağlaması ve ilave katkıların betonun bazı özelliklerinin değiştirmedeğinden dolayı inşaat sektöründe geniş, uygun kullanım alanı bulmaktadır.

Çimento ve beton üretiminde maliyeti düşüren bu malzemeler endüstriyel atıklar olup, yapay puzolanlar ve doğal puzolanlar adıyla bilinmektedir.

İnşaat yapılaşma sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olan endüstriyel yapay atıkların başında; uçucu kül (F ve C sınıfı), yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi organik atık külleri ile mermer tozu olarak bilinmektedir. Doğal puzolanlar olarak; volkanik kökenli olan tüfler, camlar, küller olmakla birlikte diatomitler, ısıl işlem görmüş killer doğal puzolan grubunda bulunmaktadır[5,6].

Bu çalışma kapsamında beton ve çimento katkıları olarak kullanılmakta olan yapay puzolanlar (mineral katkıları) olarak tanıdığımız uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve fındık kabuğu külü dediğimiz puzolanların puzolanik aktiviteleri araştırılmış, sonuçları paylaşılmıştır.

### **Puzolanik Aktivite Deneyi**

Puzolanik aktiviteyi belirleyen kabul edilebilir üç farklı ölçüm yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler kimyasal, fiziksel ve mekanik olmak üzere üç gruptur.

Bu çalışma kapsamında mekanik deney yöntemini kullandık. Mekanik yöntem kireç-puzolan veya portland çimentosu-puzolan karışımlarından oluşmaktadır. Portland çimentosu-puzolan karışımları ile hazırladığımız deneysel çalışma sürecimizde deneyleri gerçekleştirdiğimiz dönemde etkin olan ilgili standartlardan yararlanılmıştır.

TS EN 197-1'e göre puzolanların aktivite deneyinde yapılan deneme numunelerinde 28 günlük dayanım, referans numune karşılaştırılmasında aynı zaman ve koşullar altında basınç dayanımları %70 inden az olmamalıdır. Her bir deney serisinde minimum 3 adet numune dökülmeli gerekli malzeme karışım oranları birbiriyle bağlantılı olmalıdır [7].

Karşılaştırma numuneleri ve deneme numuneleri için ilgili standartlar çerçevesinde deney prosedürü uygulanmalıdır. Bütün deney numuneleri aynı şartlar altında imal edilmeli ve kürlenmelidir.

Aktivite deneyi verilerinde yalnız 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları kullanılır.

Bu numuneler uygun koşullarda saklanıp 28 günün sonunda basınç deneyine tabii tutulur.

Puzolanik aktivite oranı (Puzolanik aktivite =  $A/B \cdot 100$ ) bağıntısıyla hesaplanır.

Burada,

$A = \text{Çimento} / \text{Kül karışımı numunelerinin ortalama basınç dayanımı, kgf/cm}^2$

$B = \text{şahit numunelerinin (yalnız çimento) ortalama basınç dayanımı kgf/cm}^2 \text{ dir.}$

*Tablo 1. Referans ve Katkılı Numunelere Ait Karışım değerleri*

Malzeme	Kontrol numune	Katkılı deneme numunesi
Çimento	450 gr.	338 gr
Mineral Katkı	0000	112 gr % 25
Standart Kum	1350 gr	1350 gr
Karışım Suyu	225 gr	225 gr

### **DeneySEL Süreç**

#### **Malzeme Hazırlığı**

#### **Standart Kum**

Deneylerde, TS EN 196-1 de çimentonun dayanım testi için silis esaslı “RILEM CEMBUREAU Standart Kumı” kullanılmıştır.

Aşağıda granülometrik özellikleri verilen kumun birim ağırlığı 2,01 gr/cm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. [8]

*Tablo 2. Standart kum granülometri değerleri*

Elek Göz Açıklığı (mm)	Elek Üzerinde Kalan (%)
0,08	98 ±2
0,16	87 ±2
0,50	67 ±2
1,00	33 ±2
1,60	9 ±2
2,00	0

### **Yapay Puzolanlar**

#### **Uçucu kül**

Doğal kaynakların hızla tükenmesi, girdi maliyetlerinin ve kirliliğin azaltılması düşüncesiyle endüstriyel atık kullanımı ülkelerin ekonomik yönden ilgilendikleri konuların başında gelmektedir. Mineral katkılardan puzolan sınıfında olanları atıkların değerlendirilmesi adına inşaat

sektöründe kullanımı artmış durumdadır.

Termik santrallerde baca külü olarak elde edilen uçucu kül çeşitleri çimento ve beton imalatların üretilmesinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Bu nedenle uçucu kül en çok kullanılan puzolandır.

Çimento ve beton üretiminde uçucu külün kullanımının iki ana nedeni vardır;

1. Birincisi çimento ve beton maliyetlerini düşürmek,

2. İkincisi de yeni üretilen plastik kıvamda ve sertleşmiş betonda özelliklerin iyileştirilmesidir.

Uçucu kül çeşitlerinin ekonomiye kazandırılması, kullanılabilirliği, gerekli nakliye ve planlanan tasarımlara bağlıdır. ASTM-C 618'e standardına göre uçucu kül grup olarak iki ana sınıfa ayrılmıştır. Bunlar F tipi uçucu ve C tipi uçucu küllerdir. Genellikle F tipi uçucu kül içerisinde %10 dan daha az CaO içerir. Ayrıca F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün kullanılması sonucu üretilir, bu da düşük seviye kireçli uçucu kül olarak isimlendirilir. İkinci grup olan C tipi uçucu kül, içerisinde %15 - %35' aralığında CaO içermektedir. [9]

### **Yüksek fırın cürufu**

Demir cevherinin içinden demirin ayrıştırılabilmesi için cevher "yüksek fırın" adı verilen bir fırında çok yüksek sıcaklıkta ısıtılıp eritilmektedir. Kok kömürü yanma süreci sonrasında içerisinde bulunan karbon, cevherin demir oksitinde bulunan oksijenle birleşip CO ve CO<sub>2</sub> gazları olarak fırında ayrışması sonucunda 1400-1600 °C sıcaklıkta eriyik halinde "yüksek fırın cürufu (YFC)" oluşur [10].

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonun dayanımını; cürufun ince öğütülmüş olması, aktivite indeksi ve karışım içerisine katılan cüruf-çimento miktarı etkilemektedir.

Yüksek fırın cürufunun çimento yerine ikame olarak ince öğütülerek betonda kullanıldığında; betonda işlenebilirliği artırmakta olduğu, betonun az su absorbe etmesi nedeniyle betonun terlemesini azalttığı bilinmektedir.

Cüruf katkılı betonun geçirgenliğinin daha yüksek olduğu, donma-çözülme deneylerinde çok iyi sonuç gösterdiği de rapor edilmiştir [11]. Bileşim bakımından bağlayıcı potansiyeli veya doğrudan bağlayıcı etkinliği olan bazı karakterli yüksek fırın cürufları günümüzde;

1. Çimento katkı maddesi olarak,

2. Cürüflü çimentoların ana maddesi olarak,

3. Beton üretim tesislerinde kuru toz halinde betona katılarak, kullanılmaktadır [12].

Taze beton özellikleri açısından cürüflü betonlara bakıldığında;

1. Cüruf işlenebilirliği arttırmaktadır,
2. Normal sıcaklıklarda priz süresi normal betonlardan farklı değildir,
3. Cürüflü betonların terleme hızları ve miktarları daha yüksek ama hidratasyon ısıları düşüktür [13].
4. Sertleşmiş beton özellikleri açısından bakıldığında, geç dayanımı ve elastisite modülü daha yüksektir [14].

Dayanıklılık (dürabilite) açısından cürüflü betonlar;

1. Sülfat ve deniz sularına karşı dayanıklıdır,
2. Dayanımları gün geçtikçe artmaktadır,
3. Alkali-Silis reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeler daha az görülmektedir,
4. Klorür iyonları için düşük geçirimsizliğe sahiptir.

Lewis ve Spellman, yapmış oldukları çalışmalarda cürufun kullanılması ile elde edilecek betonların yararını aşağıdaki şekilde sıralamışlardır [12].

1. Dayanımları gün geçtikçe artmaktadır,
2. Sülfat ve deniz sularına karşı dayanıklıdır,
3. Alkali-Silis reaksiyonundan kaynaklanan genleşmeler daha az görülmektedir,
4. Klorür iyonları için daha düşük geçirimsizliğe sahiptir,
5. Yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır.

### **Silis (mikrosilis) dumanı**

Silis (mikrosilis) dumanı, silisyum veya demir silisyum karışımından oluşan alaşımların ergitme yöntemi sürecinde elde edilen, içeriğinde 1 µm'den küçük, amorf, yamuk boyutta, camsı silis (SiO<sub>2</sub>) partikül danelerinden meydana gelen yan üründür. Aynı zamanda silis dumanı yüksek mukavemette puzolanik aktiviteye sahip olan mineral katkı olarak kullanılan bir üründür. [15].

Standartlarda, silis dumanı mineralinin ana bileşenleri kristalize olmayan amorf haldeki silis partikülleridir. Genellikle, beton ürünlerinin içerisinde mineral katkı olarak kullanılmakta olan silis dumanının SiO<sub>2</sub> içeriği %85'in üzerinde bulunmaktadır. (Tablo 5.6). Silis dumanının ikinci ana bileşeni yanmamış karbon kalıntıları olarak bilinmektedir. Silis dumanında Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerik miktarı %1 ile %2 dolayındadır. Ayrıca içinde bulunan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O gibi oksitler genellikle %1'den az bulunmaktadır. Silis dumanı deneysel çalışmada kızdırma kaybı en fazla % 5 olması istenmektedir.

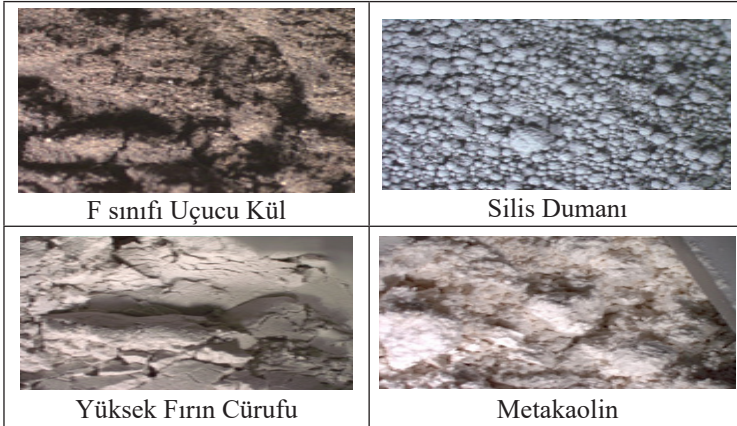
Tablo 3. Silis Dumanında Silikon oranına göre SiO<sub>2</sub> miktarları

Ferrosilikon alaşım / metal	SiO <sub>2</sub> 'nin silis dumanı içindeki miktarı
% 50 Ferro-silikon	%72-77
% 75 Ferro-silikon	%84-88
Silikon (%98)	%93-98

Silis dumanı içinde bulunan aşırı silis miktarı, silis dumanını etkin kılan puzolan haline getiren özelliğidir. Silis dumanının inceliğinin yüksek olması ve çok fazla silis içerdiğinden genellikle yüksek puzolanik aktiviteye sahip mineral katkıdır. Beton imalatında çimento ile birleştiği ortamda en önemli ve hassas işlevi, C<sub>2</sub>S ve C<sub>3</sub>S hidratasyonları neticesinde oluşan Ca(OH)<sub>2</sub>'i bağlamak, yeni bir CSH jeli meydana getirmektir [16].

### Metakaolin

Metakaolin; son yıllarda yüksek performans sağlayan çimento bazlı malzemelerin imalatında kullanılmaya başlanan yeni bir mineral katkıdır. Metakaolin saf kaolin kilinin ortalama 700–800 °C’lerde termal aktivasyonu ile elde edilen reaktif alümina-silikat yapı içeren mineral bir katkıdır. Silis dumanıyla (SD) rekabet edebilecek özelliklere sahip olması, Metakaolin ile ilgili araştırmalara hız kazandırmıştır. Metakaolinin çimento esaslı malzemelerin dayanım ve durabilite özellikleri üzerinde üç önemli etki mekanizması vardır. Bu etkiler; filler etkisi, portland çimentosunun hidratasyonunu hızlandırması ve puzolanik reaksiyon göstermesi olarak sıralanabilir. Metakaolin yapısında SiO<sub>2</sub> içeren bir malzemedir, ayrıca Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girdiğinde kalsiyum silikat hidrate yapı oluşturmaktadır.[17]. Şekil 1.’de kullanılan mineral katkılara ait stereo mikroskopta çekilen görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Mineral katkıların stereo mikroskop görüntüleri

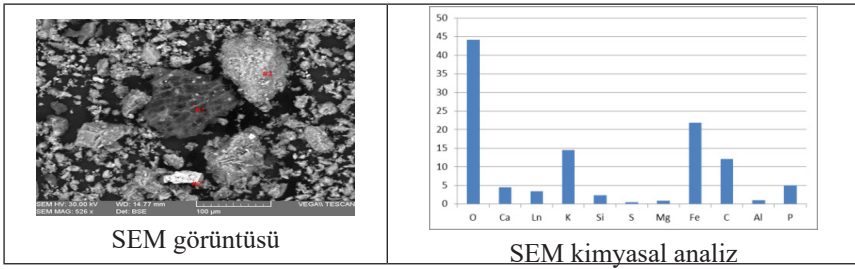
### Fındık kabuğu külü

Hasat sezonu sonrasında toplanan fındık kabuğu kalorifer kazanında yakılmış, fındık kabuğu külü elde edilmiştir. Elde edilen fındık külü haçlı

değirmende öğütülmüş ve elenerek inceltirilmiştir. Tablo 2’de küle ait kimyasal analiz Oyak Bolu Çimento fabrikası laboratuvarında yapılmıştır. [18]

Organik atık olan fındık kabuğu yakılarak kül haline getirilmiştir. Fındık külüne ait kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında potasyumoksit ( $K_2O$ ) fazla çıkmıştır. Aynı zamanda  $CaO$  kalsiyum oksit çok az miktarda çıkmıştır.

ACI 221’ e göre çimento eşdeğer alkali miktarı ( $Na_2O+0,658K_2O$ ) en fazla % 0,6 olması gerekirken bu limitin % 0,4 olması tavsiye edilmektedir. Deneyde kullanılan çimentonun alkali miktarı ( $Na_2O+0,658(K_2O)$ ) =  $0,22*0,658*0,46=0,52$  ( $Na_2O$ ) oranında olup %0.6 değerinin altındadır.[19] Fındık kabuğu külünün kimyasal analizleri tablo 2’de SEM ve mikroskop görüntüleri şekil 2’de verilmiştir.



Şekil.2 Fındık kabuğu külüne ait Steriomikroskop ve SEM görüntüleri

Deneyisel çalışmada kullanılan çimento ve puzolanlara ait kimyasal Analiz Değerleri tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4. Çimento ve puzolanlara ait Kimyasal analiz değerleri

	CEM I 42,5 R	YFC- Öğütülmüş Cüruf	F sınıfı UK	Silis Dumanı Fe-Si (%75)	Fındık Kabluğu Külü	Metakaolin	Yatağan Uçucu Kül - 2
SiO <sub>2</sub>	19,95	35,27	53,69	93,22	17,36	53,68	46,71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,12	14,81	20,29	0,31	2,38	42,44	21,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,75	2,13	11,83	1,12	3,34	1,40	6,16
CaO	63,82	28,79	3,4	0,44	12,73	0,60	17,08
MgO	1,64	8,32	4,09	1,08	5,56	0,73	2,99
SO <sub>3</sub>	3,36	0,51	0,99	-	2,77	0,00	0,88
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,50	-	0,10	0,33	0,00	0,96
K <sub>2</sub> O	0,46	1,17	2,53	1,37	45,04	0,68	2,48
Na <sub>2</sub> O Eşdeğer	0,52	1,27	-	-	-----		2,59
Kızdırma Kaybı	1,11	0,21	2,01	3,10	-----		0,14
sCaO	1,23	-	-	-	-----	2,6	-
45 Mikron	1,90	0,20	27,25	1,8	57,2	D50	4,38
90 Mikron	-	-	-	-	---	8600	2,05
Özgül Ağırlık	3,13	2,95	1,98	2,26	2,62		2,13
Blaine	3971	5074	4020	17200	2837		1555

### **Deneysel süreç;**

Standartlarda mineral katkıların beton üretiminde kullanılabilirliği puzolanik aktivite deneyi yapılması sonrasında belirlenebilmektedir.

Genellikle bu deneysel çalışma sürecinde aşağıda izah edilen maddelere göre hareket edilmesi doğru sonuçları vermektedir.

- Birinci aşamada referans çimento hamuru hazırlanır.
- Referans numune betonun içine katılan çimentonun %20'si veya %25'i kadar deney puzolanı çimento yerine ikame edilerek yeni numuneler üretilir.
- Üretilen numune betonları ile yayılma deneyi yapılır. Üretilen numune betonlarının +%5'ten fazla yayılmaması gerekmektedir.
- Üretilen numune betonlara 7. ve 28. günlük eğilme ve basınç deneyleri uygulanır.
- Numunelerde basınç dayanım sonuçları, referans numune karışım dayanımının %70'ini sağladığında, bu malzeme puzolan olarak kullanılabilir denilmektedir.

Puzolanların kullanılabilirliği, mekanik ve kimyasal deneyler sonucu belirlenmektedir. ASTM C618 - 12'ye göre, ilgili standartlarda puzolanik aktivite deneyinde kullanılmak için üretilen beton harç numunelerinin karışım oranları tablo 5'te verilmektedir[9].

Her ne kadar puzolan karışım oranı bazı standartlarda % 25 alınması önerilmekte ise de yaptığımız bu deneysel çalışmada mineral katkı puzolan karışım oranı %20 ve son beton numunesinde YFC, yüksek fırın cürufunda % 50 olarak alınmıştır.

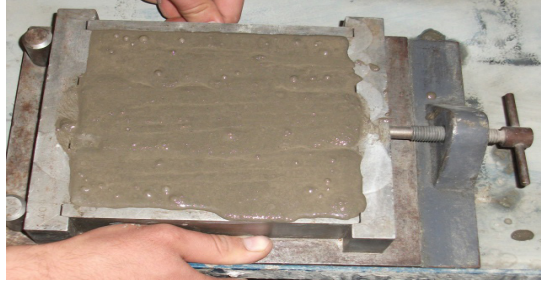
*Tablo 5. Puzolanik aktivite harç karışım miktarları*

Numune Cinsi	Puzolan Katkısı (%20) ( gr)	Çimento (gr)	Standart Kum (gr)	Su/çimento : 0,5 (gr)
Şahit Numune	0	500	1320	250
F sınıfı UK	100	400	1320	250
Silis Dumanı	100	400	1320	250
Y.Fırın Cürufu	100	400	1320	250
Metakaolin	100	400	1320	250
Fındık Kabuğu Külü	100	400	1320	250
C sınıfı UK	100	400	1320	250
Yüksek Fırın Cürufu(%50)	250	250	1320	250

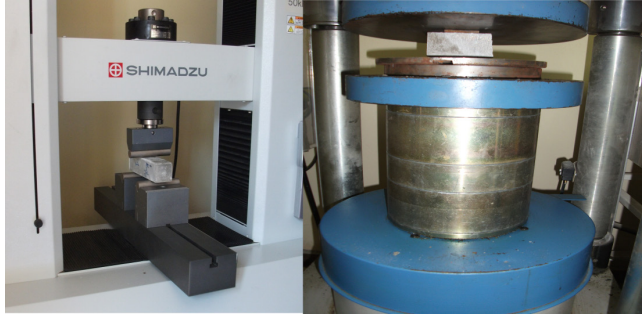




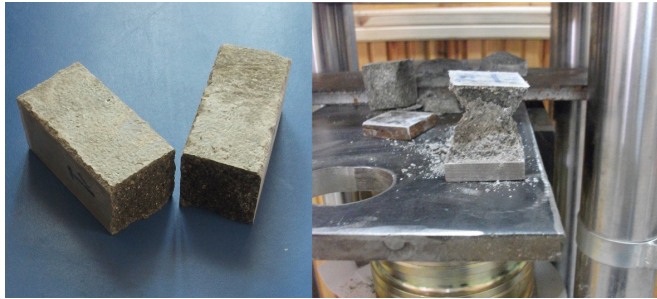
Şekil 3. Puzolanik aktivite deneyi betonlarda numune beton yayılma tablası görüntüsü



Şekil 4. Puzolanik aktivite deneyi betonlarda 40\*40\*160 mm numune beton dökümü görüntüsü



Şekil 5. Puzolanik aktivite deneyi betonlarda 40\*40\*160 mm numuneler uygulanan eğilme ve basınç dayanımı ölçümü görüntüleri



Şekil 6. Puzolanik aktivite deneyi betonlarda 40\*40\*160 mm numuneler uygulanan eğilme ve basınç dayanımı sonrası numune görüntüleri



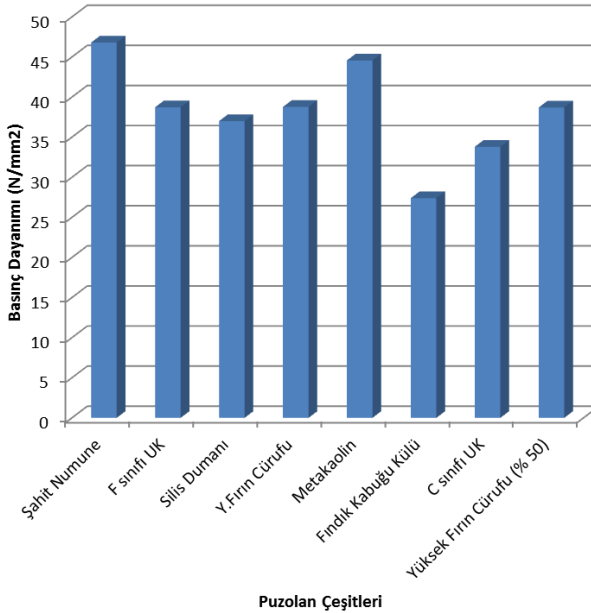
Bu karışım oranlarında 40\*40\*160 mm boyutunda her gruptan 6'şar adet döküldü. Dökülen numune beton harçlarında ilk olarak sarsma tablasında yayılma miktarı belirlendi. Şekil 3 ve 4

Uygun kür koşullarında bekleyen numune gruplarına 7 günlük ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanım deneyleri yapılarak sonuçlar tespit edildi. Şekil 5 ve 6.

Bu çalışma kapsamında 28 günlük basınç dayanımları tablo 6 ve grafiği şekil 7'de ve eğilme dayanımları tablo 7 ve grafiği şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 6. Mineral katkılara ait puzolanik aktivite deneyi basınç dayanımı sonuçları

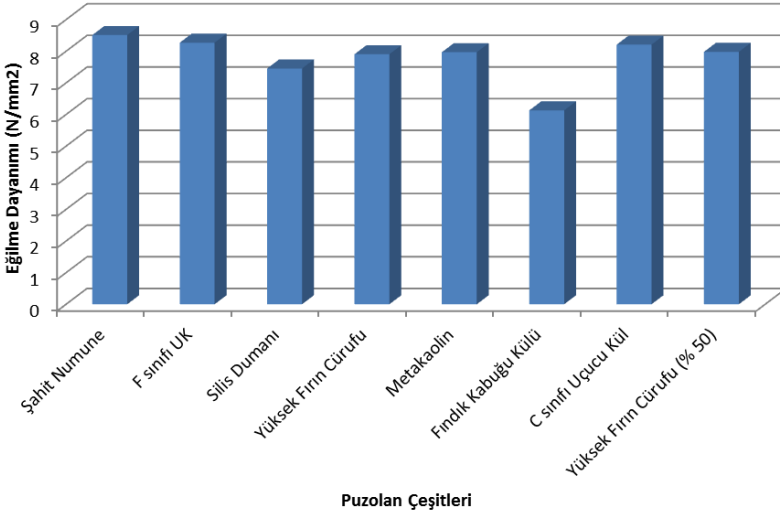
Numune Grubu, Puzolanlar	28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç Dayanım Yüzdesi
Şahit Numune	46,8	1,00
F sınıfı UK	38,73	0,827
Silis (mikrosilis) Dumanı	37,00	0,79
YFC Yüksek Fırın Cürufu	38,77	0,823
Metakaolin	44,57	0,95
Fındık Kabuğu Külü	27,4	0,59
C sınıfı UK	33,8	0,72
Yüksek Fırın Cürufu(%50)	38,7	0,82



Şekil 7. Yapay puzolanların puzolanik aktivite basınç dayanımı deney sonuçları grafiği

Tablo 7. Yapay puzolanların puzolanik aktivite eğilme dayanımı deney sonuçları

	28 günlük Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
Şahit Numune	8,510747
F sınıfı Uçucu Kül	8,269047
Silis (mikrosilis) Dumanı (SD)	7,45361
Yüksek Fırın Cürufu (YFC)	7,9049
Metakaolin	7,96753
Fındık Kabuğu Külü	6,12793
C sınıfı Uçucu Kül	8,206077
Yüksek Fırın Cürufu (% 50)	7,97974



Şekil 8. Yapay puzolanların puzolanik aktivite eğilme dayanımı deney sonuçları grafiği

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Puzolanik aktivite deneyleri yapımında standartların birçoğu Amerika standartları çerçevesinde uygulanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Basınç dayanım değerlerine göre kullanılan tüm mineral katkıların puzolanik aktivite deneylerinde aktif bir puzolan olduğu görülmüştür.

Puzolanik aktivite basınç dayanım sonuçlarına göre; referans numune dayanım sonucu ile karşılaştırıldığında % 20 ikame katkı kullanılan metakaolin % 95 değerini, F sınıfı uçucu külün % 83 değerini, yüksek fırın cürufunun %82 değerini, silis dumanının % 79 değerini, C sınıfı Uçucu külün %72 değerini ve fındık kabuğu külünün % 59 değerini aldığı tespit edilmiştir.

Yüksek fırın cürufunun % 50 ikame edilen numune grubunda %82 değerini aldığı tespit edilmiştir.

Gerek basınç dayanım değerleri gerekse eğilme dayanım değerlerine göre fındık kabuğu külü standart değer olan %70'in altında kalmış, diğer tüm mineral katkıların standart değer üzerinde dayanım kazanarak aktif puzolan olarak kullanılabilirliğini tespit ettiğimiz bu çalışma ile atık malzemelerin ekonomiye kazandırılması amaçlanmıştır.

Metakaolin, F sınıfı ve C sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı deney sonuçlarına bakıldığında basınç dayanımının standart değerlerin üzerinde bulunduğundan kullanılan mineral katkıların TS EN 197-1'e göre uygun puzolan olduğu görülmüştür.

Fındık kabuğu külünün mineral katkıların ilgili standart gereği puzolanik özellik için ön görülen kriteri sağlamadığı görülmüştür.

Atık ve organik kökenli malzemelerin geri dönüşümüyle ekonomiye kazandırılması, çimento ve beton ürünlerinin maliyetinin düşürülmesi açısından bu tür çalışmaların yeni malzemeler ile devam ettirilmesi gerekmektedir.

**KAYNAKLAR**

- [1] ABD Enerji Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ağı (EREN) Sürdürülebilir Gelişim için Mükemmellik Merkezi, ( 2003).
- [2] Çelebi, G. ve Aydın, A.B., “Sürdürülebilir Mimarlık Yaklaşımında Yapı Malzemelerinin irdelenmesi”, IV. Ulusal Ekoloji ve Çevre Kongresi, Bodrum, 457 - 464, (2001).
- [3] Vatan Kaptan, M., “Yapım Teknolojisi Ders Notları”, Yıldız Teknik Üniversitesi, (2011-2012).
- [4] Sağlık, A., Sümer, O., Tunç, E., vd., “Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu ve DSİ Projelerinde Uygulanabilirliği” DSİ Teknik Bülteni Sayı: 105, (2009).
- [5] Camacho. R.E.R.. Afif. R.U.. “Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability”. Cement and Concrete Research. Elsevier. 32: 1851-1858. (2002).
- [6] Erdoğan, T.Y., 2003. Beton. Ankara, Semih Ofset Matbaacılık yayıncılık ve Ambalaj San. Tic. Ltd. ğti., ISBN 975-7064-67-X, 760 s., Ankara.
- [7] TS EN 197-1 “ Genel Çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri-Bölüm 1”. Nisan. (2012).
- [8] TS EN 196-1 “Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini”. Temmuz. (2016).
- [9] ASTM C618 - 12a “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” ASTM International, West Conshohocken PA, 2012, www.astm.org
- [8] YILDIRIM, K. ‘Betonda Alkali Silika Reaksiyonunun Azaltılmasında Mineral Katkı Kombinasyonlarının Optimizasyonu’ Yayınlanmamış Doktora Tezi Sakarya, 2013
- [10] BİLİR, T., Donatısız Beton Eleman Üretiminde Çeşitli Endüstriyel Yan Ürünlerin Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 2005.
- [11] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. Concrete Microstructure, Properties and Materials, Indian Edition, India. 1997.
- [12] LEWIS, D., Blast Furnace Slag as a Mineral Admixture for Concrete, Concrete Construction, Cilt: 27, Sayı: 5, s. 448-449.1982.
- [13] STUTTERHEIM, N., Portland Blast Furnace Cements –A Case for Separate Grinding of Slag, Proceedings, 5. th. International Symposium on the Chemistry of Cement, Cement Association of Japan, Part IV, s. 270-274, Tokyo.1969.
- [14] TOKYAY, M., ERDOĞDU, K., Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, TÇMB AR-GE Enstitüsü, Yayın No: Y97-2, 3. Baskı, Ankara. 2001.

- [15] KOCA, C., Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394. 1996.
- [16] YEĞİNOBALI, M.A., Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. (Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu: 18-19 Kasım 1993) Bildiriler Kitabı. Ankara: Bizim Büro 149-167, 1993.
- [17] TOSUN, K., FELEKOĞLU, B., BARADAN, B., Metakaolin ve Silika Dumanı Kullanımının Çimento Harcının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Etkileri. 3. Uluslararası Çimento ve Beton Sempozyumu, 2007.
- [18] YILDIRIM, K., SÜMER, M. YILDIRIM, Y.F., Investigation of the usability to nut shell ash as a mineral additive in concrete, INTERNATIONAL ADVANCED RESEARCHES and ENGINEERING JOURNAL, Volume 02 Issue 03 December, 2018
- [19] Yıldırım, K., Sumer, M., (2014), Comparative Analysis of Fly Ash Effect with three Different Method in Mortars that are Exposed to Alkali Silica Reaction, Composites: Part B, 2014, 61: 110–115.
- TS 25/T1 “ Doğal Puzolan- Çimento ve betonda kullanılan tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri”. Ocak. (2015).
- TS EN 12390-5 Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 5- Beton Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini ”. Eylül. (2015).
- TS EN 12390-5 Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 3- Beton Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini ”. Nisan. (2003).

# Bölüm 17

## TERMAL İLETKENLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİNDE $Y_2O_3$ SİNERLEME YARDIMCISI İLE ÜRETİLMİŞ $Si_3N_4$ İÇİN ISIL İŞLEMİN ROLÜ



*Pınar UYAN<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, MYO, Makine Metal Teknolojileri Bölümü, Metalurji Programı Bilecik, Türkiye

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bilecik, Türkiye

İlgili yazar / Corresponding author: [puyan@bilecik.edu.tr](mailto:puyan@bilecik.edu.tr), +90-228-214-1608



## 1. Giriş

Elektronik cihazlarda altlık olarak kullanılan malzemelerde düşük elektrik ve yüksek termal iletkenlik olması gerekmektedir (Hirao vd., 2012). Bu nedenle,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramikler, yüksek mukavemet, yüksek termal iletkenlik, elektriksel direnç ve kırılma tokluğu özelliklerinden dolayı elektrikli cihazlarda önemli bir kullanım oranına sahiptir (Watari ve Shinde, 2001). Sinterleme teknolojilerindeki gelişmeler, başlangıç tozlarının özelliklerinin iyileştirilmesi, etkili sinterleme ilavelerinin kullanımı ve yüksek sıcaklıklarda sinterleme imkanları ile  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin termal iletkenliği geliştirilebilir (Watari, 2001).

Bu çalışmada, ısı alıcılarda kullanım için,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  katkılı numuneler,  $1775^\circ\text{C}$ 'de 5 bar azot gaz basıncı altında 2 saat sinterlenmiş ve sonrasında  $1950^\circ\text{C}$ 'de 5 bar azot gaz basıncı altında 4 saat süre ile ısıl işleme tabi tutulmuşlar ve sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmasının mikroyapı ve termal iletkenliğe etkisi incelenmiştir.

## 2. Literatür Araştırması

Basınçsız sinterleme(PS), sıcak izostatik presleme (HIP) ve gaz basınçlı sinterleme (GPS) gibi sinterleme teknikleri kullanılarak ve yüksek saflıkta (>%99) ve yüksek yüzey alanına sahip başlangıç tozları kullanılarak yüksek yoğunluk değerlerine daha düşük sinterleme sıcaklıklarında ulaşılması mümkündür (Watari, 2001). Farklı ilavelerle yoğunlaştırılmış  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin ısıl iletkenlik sonuçlarına göre  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha$ - $\beta$  dönüşümünü hızlandırması ve katı çözelti oluşturmamasından dolayı ideal bir ilavedir (Hirosaki vd., 1996). GPS'te uygulanan yüksek  $\text{N}_2$  basıncı,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'de dekompozisyonu engeller ve yüksek sıcaklıklara çıkmaya imkan verir. Ayrıca sinterleme sıcaklığının artmasıyla ince matris yapı içinde büyük çubuksu tanelerin oluşumu da sağlanır. Isıl iletkenlik artışı, yüksek sıcaklık sinterlemesine bağlı olup,  $2273\text{ K}$ 'de GPS ile  $120\text{ W/m.K}$  termal iletkenlikli  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  üretilebilmiştir (Hirosaki vd., 1996). Artan termal iletkenlik değerleri, elektronik cihazlarda ısı alıcılar ve entegre devreler için altlıklar olarak  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ün yeni teknolojik uygulamalarının önünü açmaktadır.

Farklı ilavelerle sinterlenen  $\text{Si}_3\text{N}_4$  seramiklerin termal özelliklerine sinterleme sonrası ısıl işlemin etkisi araştırılmış pek çok çalışma mevcuttur (Wasanapiarnpong vd., 2006)(Wasanapiarnpong vd., 2005), (Wasanapiarnpong vd., 2007) (Sekimoto vd., 2007). Bu çalışmada ise, sözü edilen alanlarda kullanım için, numuneler  $1775^\circ\text{C}$ 'de 5 bar azot gaz basıncı altında 2 saat sinterlenmiş ve sonrasında  $1950^\circ\text{C}$ 'de 5 bar azot gaz basıncı altında 4 saat süre ile ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. XRD ile faz analizi, SEM/EDX ile ayrıntılı içyapı görüntü/kimyasal analizleri yapılmış, Lazer Flash Metodu ile termal difüvizite ölçülmüş ve yüksek sıcaklıklarda, sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmasının mikroyapı ve termal iletkenliğe etkisi incelenmiştir.



### 3. Materyal ve Yöntem

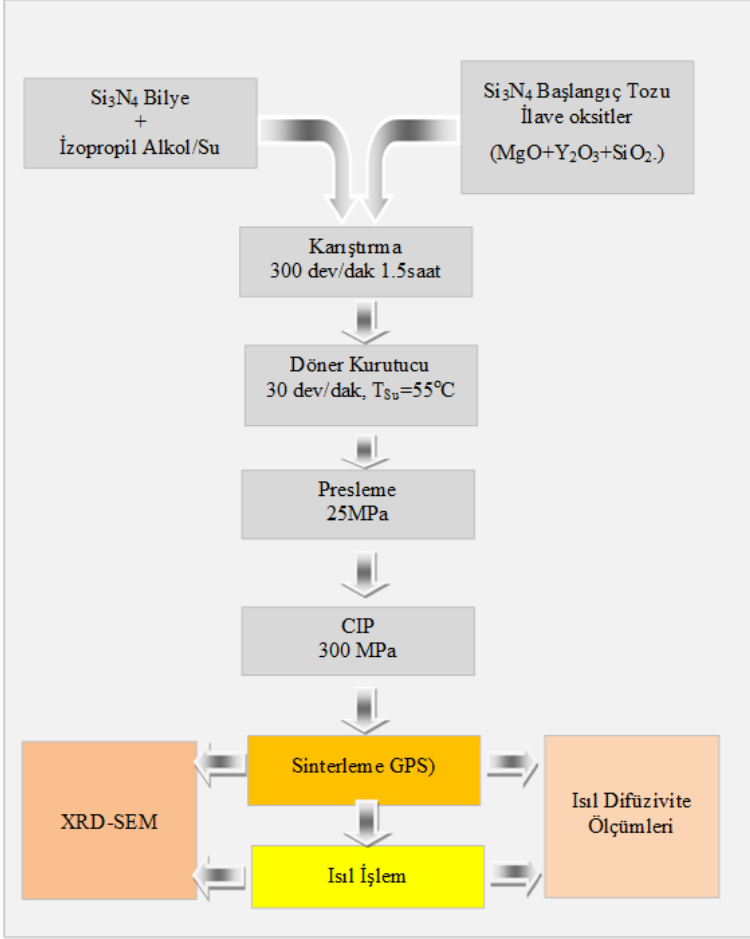
#### 3.1. Üretim

Çalışmada,  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozu (UBE Industries, Ltd., Japan, 98 $\alpha$ /2 $\beta$ ) başlangıç tozu olarak kullanılmıştır. Sinterleme ilavesi olarak MgO (% 99,9 purity, Sigma Aldrich Chemical Co.), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 99,9 purity, Sigma Aldrich Chemical Co.), ve SiO<sub>2</sub> (% 99,9 purity, Sigma Aldrich Chemical Co.) tozları kullanılmıştır. Numuneleri üretmek için uygulanan prosesleri özetleyen şema Şekil 1’de verilmiştir. Homojen karışım sağlamak için öğütme (Fritsch-Pulverisette 5) işlemi yapılmıştır. Hazırlanan çamurlar, alkolden arındırmak amacıyla, sıcaklık ve dönme hızı kontrol edilerek, döner kurutucuda (Heidolph 4001, Germany) kurutulmuşlardır. Döner kurutucuda kurutularak toz haline getirilen karışımlar, 300 $\mu$ m’lik elekten geçirilmiş ve şekillendirmeye hazır hale getirilmişlerdir. Hazırlanan tozlar önce 25 MPa basınçta tek eksenli el presiyle (Alfa marka) şekillendirilmiştir. Peletlerin, tek yönlü presle ilk şekillendirilmesinden sonra, soğuk izostatik pres (CIP-Stansted Fluid Power marka FPG2568/2569) ile numunelere 300 MPa basınç uygulanmıştır. Gaz basınçlı sinterleme işlemleri, grafit ısıtıcılı fırında (KCE-FPW 100/150-2200-25) yapılmıştır. Sinterleme işlemi, 1775 °C’de, 2 saat süre ve 5 bar N<sub>2</sub> gazı basıncı altında gerçekleştirilmiş ve sonrasında 1950 °C’de 5 bar N<sub>2</sub> gaz basıncı altında 4 saat süre ile ısıl işleme tabi tutulmuşlardır.

#### 3.2. Karakterizasyon

Sinterlenmiş numunelerin içerdikleri fazlar hakkında bilgiye sahip olmak için X-ışını difraksiyon (XRD) tekniği kullanılmıştır. X-ışınları difraktometresi (Panalytical Empyrean) ile XRD çekimleri yapılmıştır. Numunelerin yığınsal yoğunluk ölçümü Arşimet, su ile yer değiştirme, prensibine göre yapılmıştır. Kullanılan başlangıç Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozlarının tane şekli ve tane boyutu incelemeleri SEM (Zeiss Supra 50 VP marka) geri yansıyan elektron görüntü modunda (BSE) yapılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin mikroyapı incelemeleri ise, SEM (Zeiss Supra 40 VP marka) ikincil elektron görüntü modunda (SE) yapılmıştır.

Termal difüzyivite ölçümleri lazer-flaş cihazı (Netzsch LFA-457, Germany) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler oda sıcaklığı ile 1000°C aralığında yapılmış olup, numuneler için ölçümler oda sıcaklığından 1000°C’ye kadar her bir sıcaklıkta en az üç kez yapılarak ortalama değerler alınmıştır. Sonuçların tutarlılıkları tespit edilerek, ortalama termal difüzyivite değerlerinden, sıcaklık-termal difüzyivite grafikleri çizilmiştir. Termal difüzyivite grafiklerinde çizilmiş olan her bir nokta ortalama termal difüzyivite değerlerini göstermektedir. Cp değeri 0.7 J/(g.K) alınmıştır (Watari vd., 1989).

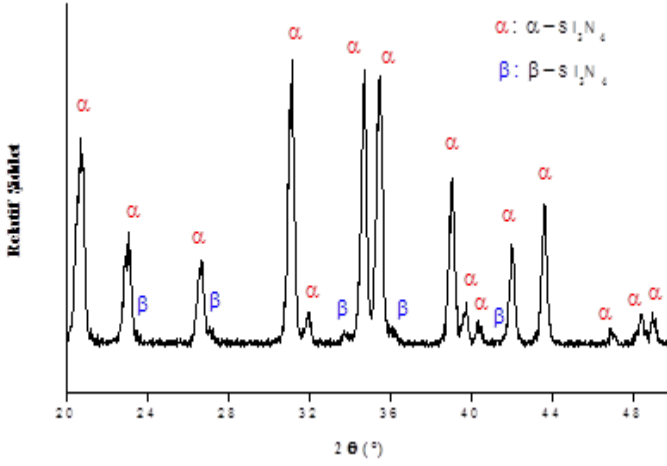


Şekil 1. Üretim proses akış diyagramı

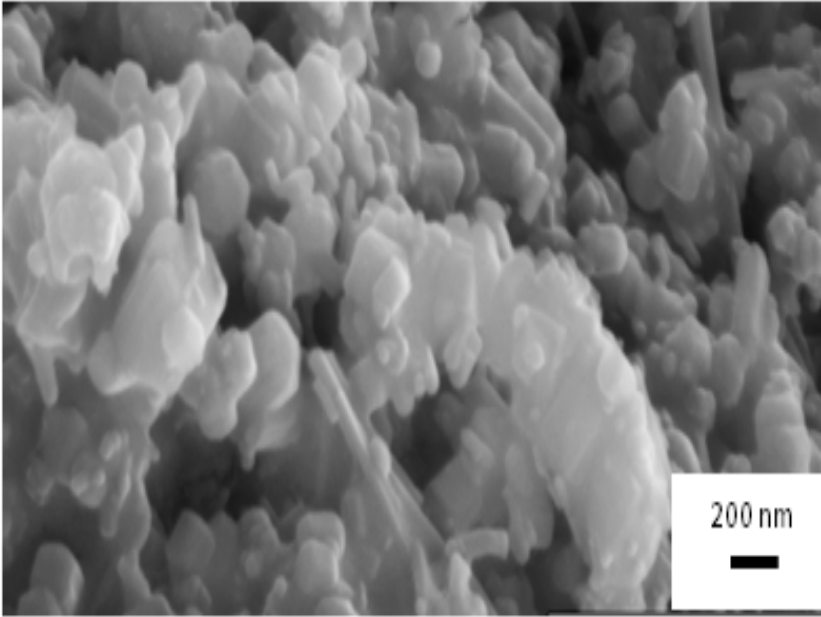
#### 4. Deneysel Sonuçlar

##### 4.1. Başlangıç Tozlarının Faz ve Mikroyapı Karakterizasyon Sonuçları

Kullanılan  $\text{Si}_3\text{N}_4$  başlangıç tozunun XRD paterni, Şekil 2’de verilmiştir.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tozunun ikincil elektron SEM görüntüsü ise, Şekil 3’de verilmiş olup, tozun küresel yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozunun XRD paterni

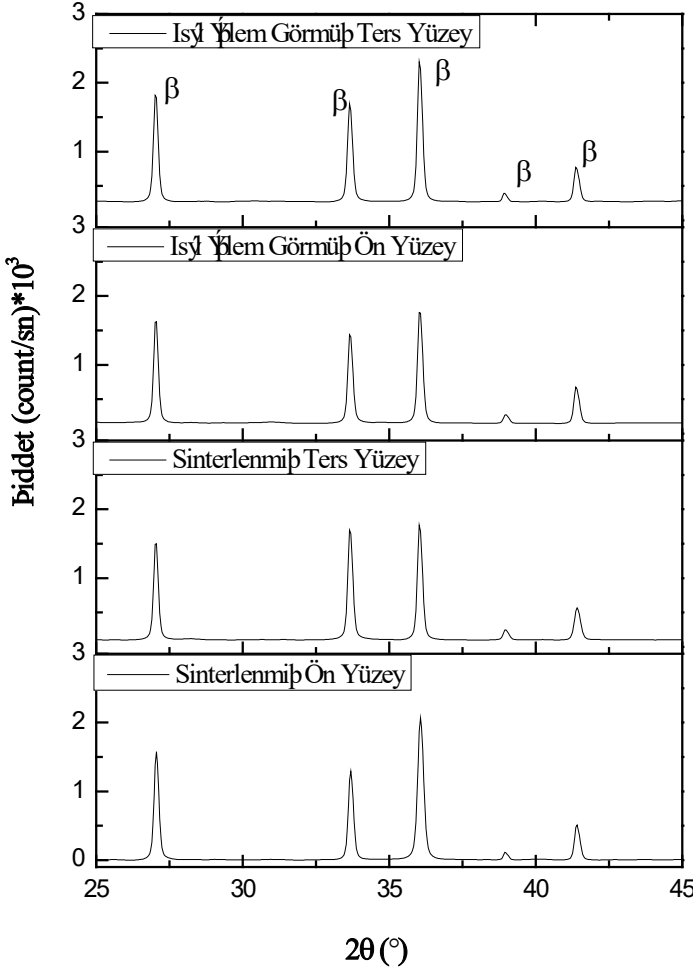


Şekil 3. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tozunun SEM görüntüsü (30KX)

#### 4.2. Yoğunluk ve Faz Analizi Sonuçları

Sinterlenmiş ve sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmış numunelerin XRD paternleri, Şekil 4’de, yoğunluk ve faz analizi sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. XRD paternlerinde hem sinterlenmiş hem de 1950°C’de 5 bar azot gaz basıncı altında 4 saat sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmış numunelerde, β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>’den farklı ikincil bir kristalin faz oluşumu gözlenmemiştir. Yoğunluk sonuçlarından görüldüğü gibi, 1775°C’de 5

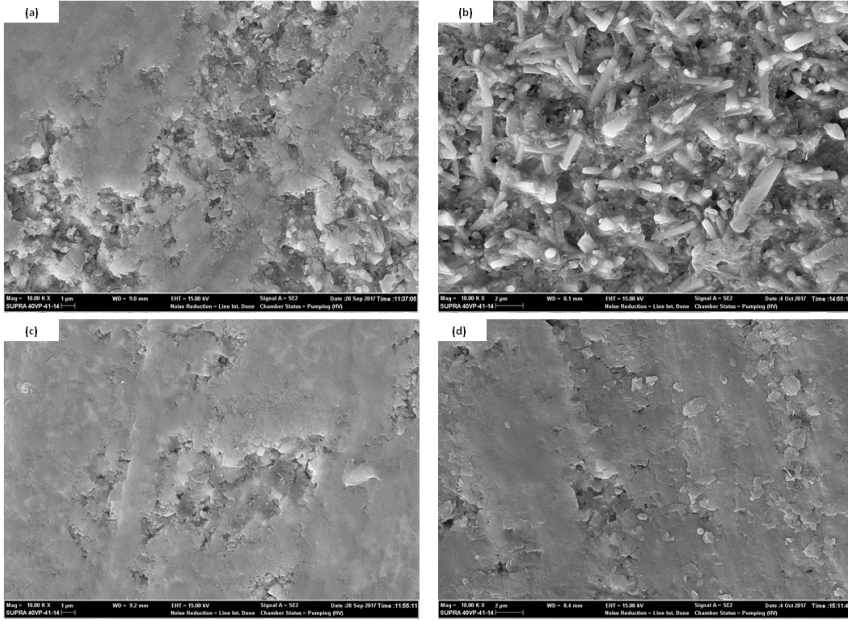
bar azot gaz basıncı altında 2 saat sinterlenmiş numunelerin yoğunluğu, sinterleme sonrası ısıl işlem yapıldıktan sonra  $3,24 \text{ g/cm}^3$ 'den  $3,25 \text{ g/cm}^3$ 'e artmıştır.



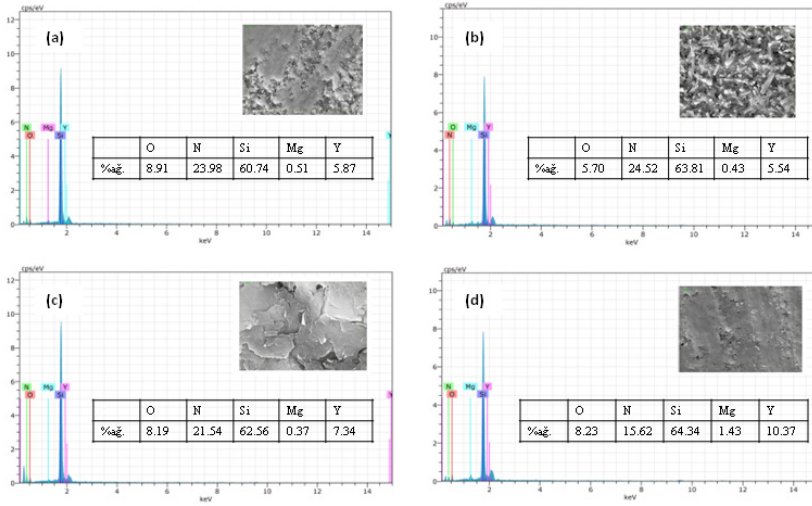
Şekil 4. Numunelerin XRD paternleri

### 4.3. Mikroyapı sonuçları

1775°C'de, 5bar azot gaz basıncı altında 2 saat sinterlenmiş ve sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanmış numunelerin görüntü ve EDX analizleri sırasıyla, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. 1775°C'de 5 bar azot gaz basıncı altında 2 saat sinterlenmiş numunelerde sinterleme sonrası ısıl işlem uygulandıktan sonra gözeneklerin azaldığı ve tane büyümesinin bir miktar arttığı görülmüştür. Sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanması sonucunda yüksek yoğunluk elde edilmiş ( $3.25 \text{ g/cm}^3$ ), numunelerin düşük poroziteye ve daha büyük tanelere sahip olduğu görülmüştür. Isıl işlem ile ağırlık kaybı artmıştır.



**Şekil 5.** Isıl işlem öncesi numunelerin (a) ön yüzey, (b) ters yüzeyi ve ısıl işlem sonrası numunelerin (c) ön yüzey, (d) ters yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri



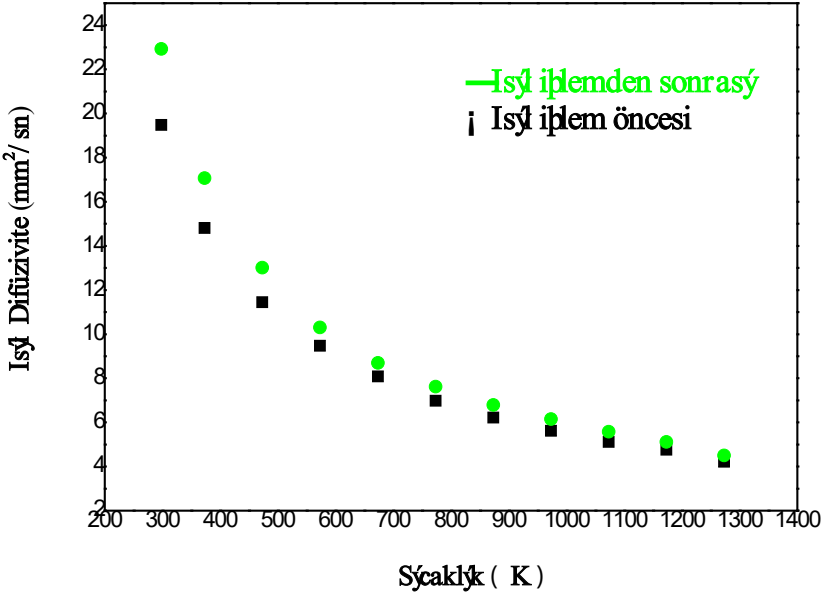
**Şekil 6.** Isıl işlem öncesi numunelerin (a) ön yüzey, (b) ters yüzeyi ve ısıl işlem sonrası numunelerin (c) ön yüzey, (d) ters yüzeylerinin EDX spektrumları

Isıl işlem sırasındaki ağırlık kaybı, hacimden yüzeye maddenin difüzyonu ve numunenin yüzeyinden buharlaşma yoluyla meydana geldiğinin göstergesidir (Wasanapiarnpong vd., 2006).

Tane büyümesinin oranı, tane boyut farkına, sinterleme sıcaklığına ve taneler arasındaki ortalama mesafeye bağlıdır. Sıcaklık tane sınırlarındaki atomların difüzyonunu etkiler, Sinterleme sıcaklığı sıvı fazdaki kütle taşınım miktarını artırır. (Mitomo vd., 2006), (Sekimoto vd., 2007).

#### 4.4. Termal difüzyivite sonuçları

Sinterleme sonrası ısıl işlem ile termal difüzyivitedeki değişim Şekil 7’de, termal difüzyivite sonuçları ise Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 7. Numunelerin, termal difüzyivite-sıcaklık eğrileri

Isıl işlem öncesi termal difüzyivite 19,48 mm<sup>2</sup>/sn ölçülmüş, termal iletkenlik 44,18 W/m.K elde edilmiştir. Isıl işlem uygulanması ile termal difüzyivite ~ % 17,71 oranında, termal iletkenlik ise ~ %18,08 oranında artmış ve sırasıyla 22,93 mm<sup>2</sup>/sn ve 52,17 W/m.K elde edilmiştir.

Sinterleme sonrası ısıl işlem uygulandıktan sonra porların azaldığı ve tane büyümesinin arttığı görülmüştür (Şekil 5). Porlar, saçılma, merkezi olarak davrandıkları ve termal iletkenliğin düşmesine neden olduklarından dolayı (Richerson, 2005), porların azalması termal difüzyivitede artışa neden olmuştur.

Sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanması sonucunda daha yüksek yoğunluk elde edilmesi, termal iletkenlikte artışa neden olmuştur.

Oda sıcaklığında ölçülen termal difüzyivite değerleri geniş bir aralıkta değişirken, sıcaklığın artışıyla birlikte termal difüzyivite değerlerindeki bu fark gittikçe azalmış ve neredeyse birbirine eşitlenmiştir (Şekil 7). Bunun nedeni, ısı enerjisinin düşük sıcaklıklarda, yüksek dalga boylu fononlarla

iletilmesi ve bu fononların düşük sıcaklıklarda önemli bir saçılma uğramamasından dolayı ortalama serbest yollarının uzun olması sonucu yüksek iletkenlik veya çok küçük direnç elde edilmesidir.

Ölçüm sıcaklığı arttıkça ise, yüksek frekanslı ve düşük dalga boylu fononlar ısı enerjisinin taşınımında daha etkili olduğundan, fononların ortalama serbest yolunu azaltan Umklapp prosesi nedeniyle ve yapıdaki hatalar sonucunda saçılma miktarı artar (Bruls vd., 2005)(Yokota vd., 2003) ve termal iletkenlik düşer.

**Tablo 1.** Numunelerin yoğunluk, faz analizi, termal difüzyivite ve termal iletkenlik sonuçları

Proses Koşulu	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	A.P. (%)	A.K. (%)	XRD İkincil fazlar	Termal Difüzyivite (mm <sup>2</sup> /sn)	Termal İletkenlik (W/m.K)
Isıl işlem öncesi	3.24	0.58	3.20	-	19.48	44.18
Isıl işlem sonrası	3.25	0.42	4.01	-	22.93	52.17

### 5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramiklerin üretiminde Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sinterleme ilavesi kullanılarak, gaz basınçlı sinterleme ve ısıl işlemin, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> seramiklerinin mikroyapı gelişimi ve termal özellikleri üzerine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Numunelerde sinterleme sonrası ısıl işlem uygulandıktan sonra gözeneklerin azaldığı ve tane büyümesinin az da olsa arttığı görülmüştür. Sinterleme sonrası ısıl işlem uygulanması sonucunda daha yüksek yoğunluk elde edilmiş, numunelerin düşük poroziteye ve daha büyük tanelere sahip olduğu görülmüştür.
- Sinterleme sonrası ısıl işlem ile termal difüzyivite ~% 17.71 ve termal iletkenlik ~% 18.08 artmış ve 52.17 W/m.K elde edilmiştir.
- Oda sıcaklığında ölçülen termal difüzyivite değerleri geniş bir aralıkta değişirken, sıcaklığın artışıyla birlikte termal difüzyivite değerlerindeki bu fark gittikçe azalmış ve neredeyse birbirine eşitlenmiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma, ‘Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ tarafından 2016-01.BŞEÜ.06-03 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yürütülen bu projeye verdiği destekten dolayı, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi’ne ve değerli görüş, öneri ve destekleri için, Prof. Dr. Servet TURAN’a teşekkürlerimi sunarım

**KAYNAKLAR**

- Bruls, R. J., Hintzen, H. T., Metselaar, R. 2005. A new estimation method for the intrinsic thermal conductivity of nonmetallic compounds, *Journal of the European Ceramic Society*.
- Hampshire, s., Jack, K. H. 1981. Kinetics Of Densification And Phase Transformation of Nitrogen Ceramics. *Proceedings of the British Ceramic Society*, 37-49.
- Hayashi, H., Hirao, K., Toriyama, M., Kanzaki, S., Itatani, K. 2001. MgSiN<sub>2</sub> Addition as a Means of Increasing the Thermal Conductivity of  $\beta$ -Silicon Nitride, *Journal of the American Ceramic Society*.
- Hirao, K., Zhou, Y., Hyuga, H., Ohji, T., Kusano, D. 2012. High thermal conductivity silicon nitride ceramics, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 380–384.
- Hirosaki, N., Okamoto, Y., Ando, M., Munakata, F., Akimune, Y. 1996. Thermal conductivity of gas-pressure-sintered silicon nitride. *Journal of the American Ceramic Society*, 79, 2978-2982.
- Kitayama, M., Hirao, K., Tsuge, A., Watari, K., Toriyama, M., Kanzaki, S. 2004. Thermal Conductivity of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: II, Effect of Lattice Oxygen. *Journal of the American Ceramic Society*.
- Mitomo, M., Hirosaki, N., Nishimura, T., Xie, R. J. 2006. Microstructure control in silicon nitride ceramics-a review. *Journal of the Ceramic Society of Japan*.
- Richerson, D. W. 2005. *Modern Ceramic Engineering, Modern Ceramic Engineering*.
- Sekimoto, Y., Wasanapiampong, T., Imai, M., Katayama, K., Yano, T. 2007. Effect of heat-treatment on thermal and mechanical properties of silicon nitride ceramic at room and high temperatures, *Key Engineering Materials*.
- Sorrell, C. C., McCartney, E. R. 1986. "Engineering Nitrogen Ceramics: Silicon Nitride, Beta Prime -Silicon Nitride And Cubic Boron Nitride.". *Materials Forum*, 148–161.
- Wasanapiarnpong, T., Wada, S., Imai, M., Yano, T. 2005. Effect of post-sintering heat-treatment on thermal conductivity of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics containing different additives, *Journal of the Ceramic Society of Japan*.
- Wasanapiarnpong, T., Wada, S., Imai, M., Yano, T. 2006. Effect of post-sintering heat-treatment on thermal and mechanical properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics sintered with different additives. *Journal of the European Ceramic Society*.
- Wasanapiarnpong, T., Wada, S., Imai, M., Yano, T. 2007. Thermal Conductivity Improvement by Heat-Treatment in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics Using SiO<sub>2</sub>-MgO-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Additive System. *Key Engineering Materials*.



- Watari, K. 2001. High thermal conductivity non-oxide ceramics. Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan.
- Watari, K., Seki, Y., Ishizaki, K. 1989. Temperature dependence of thermal coefficients for HIPped silicon nitride. Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan, 97(2), 174–181.
- Watari, K., Shinde, S. L. 2001. “High Thermal Conductivity Materials”. MRS Bulletin, 440–441.
- Yokota, H., Abe, H., Ibukiyama, M. 2003. Effect of lattice defects on the thermal conductivity of  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Journal of the European Ceramic Society.

# Bölüm 18

## ŞEHİR İÇİ ULAŞIMDA ARA TOPLU TAŞIMA SİSTEMLERİNİN ÖNEMİ; BURSA DOLMUŞ SİSTEMİ ÜZERİNDEN BİR DEĞERLENDİRME



*Şafak BİLGİÇ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye. Orcid No: 0000-0002-9336-7762



## 1. GİRİŞ

Ara Toplu Taşıma Sistemi terimi ülkemizde hâlâ birçok şehirde yaygın olarak kullanılan Dolmuş ve Minibüs gibi düşük kapasiteli toplu taşıma araçlarını ifade etmektedir. Özellikle 1960 lardan sonra şehir merkezlerindeki nüfus yoğunluğunun az olduğu bölgelerde devreye alınan bu sistemler, günümüzde kapasitesinin azlığı ve sürücülerinin trafik kurallarına uymadaki sorunları nedeniyle eleştirilmekte ve birçok yerleşim yerinde hizmetten kaldırılmaları istenmektedir. Ancak gelişmiş ülkelerde ise tam tersi şekilde bu tür sistemlerin modern uygulamaları son yıllarda ortaya çıkmaktadır.

## 2. DOLMUŞ VE MİNİBÜS SİSTEMLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Dolmuş ve minibüs sistemleri ülkemizde uzun bir geçmişe sahiptir. Bu sistemler şehir merkezlerindeki nüfusun ve nüfus yoğunluğunu az olduğu 1960 lı yıllarda ülke çapında yayılmıştır. Özel araçların pahalı ve sayılarının az olduğu yıllarda, özel araç kullanımı ile ortak araç kullanımının avantajlarını bir arada sağlayan dolmuş sistemi, ilk olarak taksi sahipleri tarafından İstanbul'da ortaya çıkarılmıştır. İstanbul'da ilk taksi 1911 yılında hizmete girmiştir. Ancak yüksek otomobil fiyatları taksi kullanım fiyatlarına da yansdığından, taksi kullanımı çok yaygınlaşmamıştır. Bu sebeple Beşiktaş-Taksim arasında çok fazla yolcu talebi olduğunu gören taksi sahipleri, özellikle yoğun saatlerde taksileri ortak kullanan çok kişi olduğunu görünce bunu kendileri bir sistem olarak çalıştırmaya başlamışlardır. Daha sonra bu şekilde çalışan taksilere Aralık 1954'de işletme ruhsatı verilmesiyle sistem resmî hale dönüşmüştür ("Kronolojik Tarihçe", 2020).

Ardından daha yüksek kapasiteli minibüs tipi araçlara işletme ruhsatları verilmiştir. Bugünkü uygulamalarda Dolmuşlar genellikle 4 yolcu kapasiteli otomobil veya 10 yolcu kapasiteli küçük minibüs tipi araçlar kullanırken, Minibüsler ise 10 ila 20 yolcu kapasitesi arasındaki minibüs tipi araçları kullanmaktadırlar. Bu araçların zirve saatte 1 dakika arayla hareketleri sık rastlanan bir durum olsa da, önerilen sefer aralığı 3 dakika altına inilmemesi yönündedir. Aksi durumda sık aralıklarla hareket eden araçlar arasındaki süre farkı yolda kapanabilmekte ve duraklarda aynı anda birkaç tane dolmuş veya minibüs bulunabilmektedir. Bu da durak giriş ve çıkışlarında trafik sıkışıklığı gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu araçları kullanan sürücülerin yol açtığı diğer sorunlar ise zirve dışı saatlerde çok yavaş araç kullanarak ve ara duraklarda uzun süre bekleyerek yolcu toplamaya çalışmak ve zirve saatlerde çok hızlı araç kullanarak daha çok sefer yapmaya çalışmaktır. Tabii ki tüm bu hareketler trafik güvenliği ve sıkışıklığı sorunları ortaya çıkartmaktadır. Ayrıca bu araçların yolcu kapasiteleri oldukça azdır (Tablo 1). Bu sebeplerle birçok Belediye Dolmuş ve Minibüsleri kaldırmaya veya Taksi, Özel Halk Otobüsü, Servis gibi araçlara dönüştürmeye çalışmaktadır.

Tablo 1. Dolmuş ve Minibüs sistemlerinin kapasiteleri

Ara Toplu Taşıma Sistemi Türü	Araç Kapasitesi (yolcu)	Önerilen Sefer Aralığı (dakika)	Kapasite (yolcu/saat/yön)
Dolmuş	4-10	3	80-200
Minibüs	10-20	3	200-400

Dolmuş ve Minibüs işletme ruhsatlarında yapılan en büyük hata; işletme ruhsatlarının süresiz olarak verilmesi yani “tahditli plaka” uygulamasıdır. Bugünkü sorunların temelinde süresiz ruhsatlar yatmaktadır. Süresiz işletme ruhsatları nedeniyle artan nüfus ve nüfus yoğunluğuna yeterli kapasitede hizmet veremeyen dolmuş ve minibüs sistemleri kaldırılamamakta veya yolculuk talebinin daha az olduğu bölgelere kaydırılmamaktadır. Birçok Belediye bu hatları kaldırmaya veya güzergâh değişikliği yapmaya çalışsa da bütün değişiklikler mahkemelerden dönmektedir. Bu işletmecilerin kanuni hakkını şu şekilde düşünmek gereklidir: bu işletmeciler şehrin iki noktası arasında yolcu taşıma hakkını yani toplu taşıma hattını uzun süre önce satın almışlardır. Bu aynen devletten satın alınan bir arsa gibi görülmelidir. Devlet önceden vatandaşına sattığı kendi arsasını ihtiyaç nedeniyle geri istiyorsa kamulaştırma işlemi yapmalı ve arsa sahibinin veya mahkemelerin karar vereceği piyasada bugün geçerli olan bir bedeli ödemelidir. Dolmuş ve minibüs sahipleri de aynen arsa sahibi gibi haklara sahiptirler. Açık arttırma usulü ile satın aldıkları işletme ruhsatının iptali mümkün değildir. Ancak şehir içi trafik düzeninde Belediyeler tarafından tek yön uygulamaları, yayalaştırmalar veya tramvay geçişi vb sebeplerle değişiklikler yapılırsa bu durumda güzergâhta küçük değişiklikler yapılması mahkemeler tarafından kabul edilmektedir. Örneğin 2004 yılında Eskişehir şehir merkezinde ESTRAM tramvay sisteminin açılmasının ardından Eskişehir Büyükşehir Belediyesi bütün minibüs hatlarının güzergâhlarını merkez ile merkeze yakın köyler arasında olacak şekilde yeniden belirlemiştir. Ancak bu karar çok kısa sürede mahkemeden dönmüş ve minibüsler için eski güzergâhlarına yakın yeni güzergâhlar belirlenmiştir. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi minibüs hattı sahiplerini 2-3 minibüs plakası yerine 1 Özel Halk Otobüsü plakası vereceği dönüşüm için ikna etmeye çalışmıştır, ancak bu teklif de hak sahipleri tarafından kabul edilmemiştir. Bu dönüşüm işlemi Antalya ve Bursa gibi birçok ilde yapılabilse de, hak sahiplerinin buna zorlanması mümkün değildir. Hattın tamamen kaldırılması için kamulaştırma işleminin yapılması gereklidir. Bu konuda örnek olarak İstanbul Büyükşehir Belediyesinin Adalar ilçesinde faytonları kaldırmak için yapmış olduğu uygulama gösterilebilir. Kötü koku ve atlara yapılan kötü muameleler sebebiyle faytonların kaldırılması uzun süredir gündemde olmasına rağmen işletmeciler ikna edilemediği için bu mümkün olamamıştır (“Hayvan hakları: 10 soruda”, 2020)

Sonunda hak sahipleri ile fayton başına 300.000 TL ve at başına 4.000

TL gibi oldukça yüksek bedellerle anlaşma sağlanabilmiştir. Bütün satın alınmış atlar çeşitli illerdeki çiftliklere gönderilmişlerdir. Faytonların yerine ise yeni nesil çevreci elektrikli araçlar hizmet vermeye başlamıştır. Burada aslında ödenen para atlara değil, işletmecilerin yolcu taşıma hakkını satın almak için ödendiğinden 90 Milyon TL gibi yüksek bir bedeldir (“Adalar’daki faytonlar”, 2020).

Tabii ki işletmecilerin bu kadar sağlam korunan haklara sahip olmaları ve idarelerin zaten düşük kapasite ve trafikte yaratılan sorunlar nedenleriyle ilave plaka artışı yapmamaları sebebiyle bu hat plakalarının değeri çok artmaktadır. Bazı yerlerde birkaç milyona ulaşan plaka değerlerini ödeyerek Belediyelerin bu hatları kamulaştırması ise çok zordur. Bu durum aslında arsaların rant kazanması durumuna benzetilebilir: Şehir merkezindeki arsalar nasıl büyük değer kazanıyorsa, şehir merkezindeki yolcu taşıma hakkı da bir ranta dönüşmektedir. Bu durum sadece Dolmuş (D) ve Minibüs (M) plakaları için değil, sınırlı sayıda verilen Taksi (T) ve Servis (S) plakaları için de geçerlidir. Verilen hizmetin yapısı itibariyle taksi ve servis araçları sayısının nüfus, çalışan ve öğrenci sayısına bağlı olarak artırılması gereklidir. Ancak Belediyelerin bu tür plaka sayısında artış yapması mevcut plaka sahipleri tarafından pazar payı paylaşılacağı için istenmemekte ve çeşitli yöntemlerle engellenmeye çalışılmaktadır. Örneğin İstanbul’da son 30 yılda nüfus 7 Milyondan 16 Milyona çıkarken taksi sayısı 17.395 ile sabit olarak kalmıştır (“İşte İstanbul’un taksi geçiği”, 2020)).

Vatandaşa sunulması gereken ekonomik, konforlu ve erişilebilir taksi ve servis ulaşım hizmetinin sağlanamaması özel araç trafiğinde artışa yol açarak trafik sorunlarını, yolculuk maliyetlerini ve çevre kirliliğini arttırmaktadır. Çünkü bu araçların kullanım alternatifi genellikle Otobüs veya Raylı Sistem gibi yolculuk süresi uzun ve konforu düşük toplu taşıma türleri değildir. Taksi ve Servis ulaşım hizmetlerine erişim sorunu yaşayanlar genellikle özel araç yolculuğuna yönelecektir. Çünkü nispeten pahalı olan bu ulaşım türlerini kullanmak isteyen kişiler zaten özel araç sahibi olacak kadar da gelire sahip kişilerdir. Aslında aynı problemler Dolmuş ve Minibüs sistemleri için de geçerlidir: Bu toplu taşıma sistemleri düşük kapasiteleri nedeniyle duraklarda yolcu indirme için çok vakit harcamadığından ve küçük araç boyutları nedeniyle trafikte serbestlikleri daha fazla olduğundan genelde oldukça hızlı ulaşım sağlamaktadırlar. Ayrıca bu araçlarda ayakta yolcu almak yasak olduğundan özel araç konforuna yakın bir yolculuk konforu sunmaktadırlar. Bu sebeplerle bu araçları uzun süredir kullanan yolcuların bu araçlar kaldırılırsa otobüs ve raylı sistem gibi kapasite hesabı metrekareye 6 yolcu üzerinden yapılan toplu taşıma sistemlerini kabul etmede ciddi sorunlar yaşayacakları açıktır. Özellikle özel araç sahibi olan kullanıcıların özel otomobillerini kullanacakları veya taksiye binecekleri düşünülmelidir. Tabii ki bu da en

verimsiz ve kirletici ulaşım aracı olan otomobil yolculuklarını arttıracak, yollardaki otomobil sayısını, şehir merkezinde park eden otomobil sayısını arttıracak ve sonuçta trafik sorunları, yolculuk maliyetleri ve çevre kirliliği artacaktır.

Burada öncelikle alınması gereken önlemlerin başında; toplu taşıma sistemlerinin konforunun artırılması gelmektedir. Gelişmiş ülkelerde ayakta yolculukta metrekareye 4 yolcu olarak kapasite hesabı yapılırken, aynı araçlar ülkemizde ayakta yolculukta metrekareye 6 yolcu kapasite ile çalıştırılmaktadır. Özellikle zirve saatlerde toplu taşıma araçları sadece özel aracı olmayan kişilere hitap edecek ölçüde kalabalık olmakta, bu kişiler de ilk fırsatta özel araç almaya yönelmektedirler (“Kent İçi Ulaşım”, 2020).

Dolmuş sisteminin diğer toplu taşıma sistemleri karşısındaki en önemli avantajları; her yolcuya oturma imkânı veren konforu, sık sefer aralığı, kısa yolculuk süresi ve küçük araç boyutları nedeniyle yolcu indirip bindirme sırasında trafiği fazla etkilememesidir.

Artan özel araç sayısının kent merkezindeki kısıtlı yol altyapısını çok verimsiz olarak (çoğu zaman 1 kişi/otomobil) kullanmasına karşı hiçbir önlem alınmazken, trafiğin rahatlatılması için diğer ulaşım türlerine ve kentin yapısına zarar veren önlemler alınması, yeni şeritler, altgeçitler, üstgeçitler inşası bir kısır döngü yaratmaktadır. Bu tür çözümler, günü kurtaran kısa ömürlü çözümlerdir. Artan araç sayısı için yeni yollar ve kavşaklar yapılması yeni araçları çekmekte, yeni inşa edilen ulaşım altyapıları birkaç yıl içinde tekrar tıkanmaya başladığında yine yeni ulaşım altyapıları çözüm olarak görülmektedir (Acar, 2016).

Araç sayısı ülkemizden çok daha fazla olan gelişmiş ülkeler bu kısır döngüyü uzun süre önce fark etmiş ve yol altyapısının daha verimli kullanılması için önlemler almışlardır. Bunların en başında metro, tramvay, metrobüs, otobüs gibi yüksek kapasiteli sistemlerin desteklenmesi gelirken, bir diğeri ise Carpool (ortak araç kullanımı) sisteminin desteklenmesidir. Bu sistem aslında bizdeki dolmuş sisteminin gelişmiş halidir denilebilir. Bu sistemde aynı bölgeler arasında seyahat eden insanların özel otomobillerini ortak kullanmalarını teşvik etmek amacıyla, ortak kullanılan bu özel araçlara kent merkezindeki otoparklarda indirim sağlanmakta, hatta anayollarda bu araçlar için özel şeritler ayrılmaktadır (Şekil 1). Böylece kent merkezindeki kısıtlı yol altyapısının daha verimli kullanılması amaçlanmaktadır. İnsanlar hem otomobil konforu ile kapıdan kapıya seyahat edebilmekte, hem de kentteki trafik sıkışıklıkları biraz olsun azaltılmaktadır. Carpool sisteminin ülkemiz koşullarına uyan, trafik problemlerine çözüm olabilecek şekli dolmuş sistemidir.

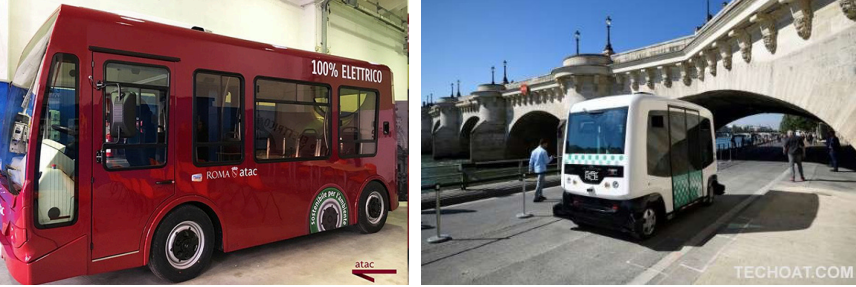


Şekil 1. Carpool özel şerit uygulamaları (“Carpool Lanes”, 2020; “ZipCar and”, 2020)

Carpool sistemi dışında bizdeki Dolmuş sistemi de gelişmiş ülkeler tarafından ilgi görmekte ve kendi ülkelerine uyarlamada denemeler yapılmaktadır. Bu konudaki en bilinen örnek ise New York şehrinde yaşanmıştır. 8 milyonu aşan nüfusu, yoğun nüfus yapısı, 12bini resmi olmak üzere toplam 40bine ulaştığı tahmin edilen taksi sayısı ve büyük trafik sorunlarına sahip olan New York’ta 2010 yılında başlayıp 1 yıl süren pilot çalışmada 6 güzergâh üzerinde 3 yolculu dolmuş sistemi grup taksi paylaşımı adı altında denenmiştir. (King ve Goldwyn, 2014).

Bu çalışma, özellikle toplum yapısı nedeniyle başarılı olmasa da, fikir olarak derin izler bırakmış ve taksi paylaşımı konusunda kişileri buluşturmayı amaçlayan internet sayfaları ve cep telefonu uygulamaları bile geliştirilmiştir. Gelişmiş ülkelerde taksilerin ortak kullanımı konusundaki çabalar giderek artmaktadır.

Ayrıca Roma ve Paris şehir merkezlerinde yeni nesil elektrikli minibüslerle (Şekil 2) yolcu taşımacılığına başlanmıştır (“Mini electric”, 2020).



Şekil 2. Roma ve Paris’de minibüs uygulamaları (“Mini electric”, 2020; “First test of”, 2020)

Gelişmiş ülkeler “Konforu koruyarak otomobili nasıl daha verimli kullanabiliriz?” diye çalışırken ülkemizde tam tersi bir gidişat söz konusudur. Sürekli otomobiller için yatırımlar yapılmakta ama otomobilin en verimli kullanım şekli olan dolmuş sistemi halen metronun, otobüsün verimsiz alternatifi olarak tanıtılıp baltalanmaya çalışılmaktadır. Oysa dolmuş sistemi tek kişiyle otomobil kullanımının verimli bir alternatifi olarak



görülmalıdır. Dolmuş sisteminin kaldırılmasıyla mevcut kullanıcıların ne kadarının diğer toplu taşıma araçlarına kayacağı, ne kadarının özel otomobil kullanacağı konusunda ciddi çalışmalar yapılmalıdır.

### 3. BURSA DOLMUŞ SİSTEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bursa’da otomobil tipi araçların kullanıldığı dolmuş sistemi tüm ulaşım türleri içinde yaklaşık % 2 lik paya sahiptir. Bursa’da artan trafik sorunlarının en önemli sebeplerinden biri olarak dolmuşlar gösterilmekte ve dolmuşlar için zorunlu dönüşüm öngörülmektedir (Dinç, 2012).

#### 3.1. Bursa Ulaşım Ana Planı Bilgileri

Kent içi ulaşımında yaşanan sorunların ve darboğazların Nazım İmar Planı ile ortaya konan stratejiler ve gelişme önerileri çerçevesinde çözümlenmesi amacıyla Ulaşım Ana Planları hazırlanması 9 Haziran 2008 tarih ve 26901 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan ULAŞIMDA ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN ARTIRILMASINA İLİŞKİN USUL VE ESASLAR HAKKINDA YÖNETMELİK uyarınca zorunludur. Bu yönetmelik içinde;

“MADDE 10 – (1) Büyükşehir belediyeleri ve büyükşehir belediyesi sınırları dışındaki belediyelerden nüfusu yüzbinin üzerinde olanlar ulaşım ana planı hazırlarlar. Bu planlar onbeş yıllık süreler için yapılır ve her beş yılda bir yenilenir. Şehir planları ile sürdürülebilir kentsel ulaşım planları birlikte ele alınır.” ibaresi yer almaktadır (“Ulaşımında Enerji”, 2020).

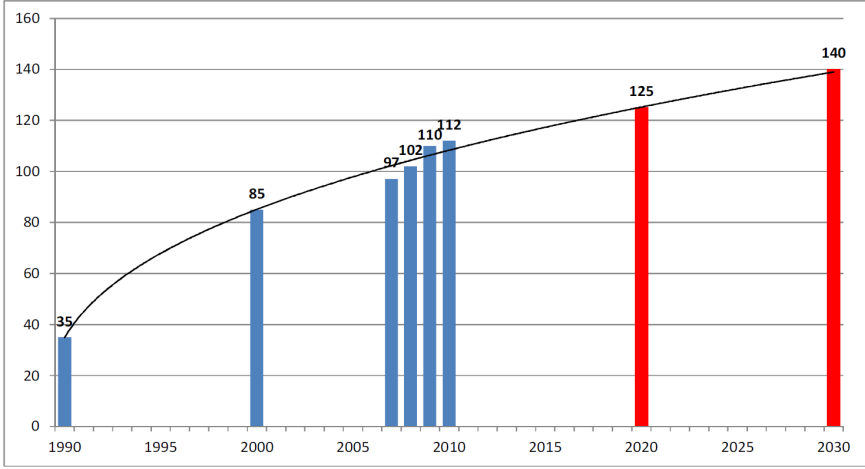
Bursa Büyükşehir Belediye Başkanlığınca “Bursa Büyükşehir Alanı Kent İçi ve Yakın Çevre Ulaşım Ana Planı Yapıtırılması Danışmanlık Hizmet Alımı” işi, Dr. Brenner Mühendislik MBH firmasına ihale edilmiş ve iş süresince danışmanlık hizmetleri İstanbul Teknik Üniversitesi Ulaştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi (UYGAR) ile birlikte yürütülmüştür. Plan, Şubat 2012’de tamamlanmıştır (Dinç, 2012).

Plan genel olarak 2030 yılına yönelik olarak hazırlanmış olup, yapılması gereken yatırımlar ve düzenlemeleri içermektedir. Bu süreçteki nüfus değişim tahminleri aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir:

Tablo 2. Bursa ilçeleri nüfus değişim tahminleri (Dinç, 2012)

İlçe	Nüfus					
	2010	%	2020	%	2030	%
Osmangazi	766.508	100	934.838	122	1.047.858	137
Yıldırım	617.263	100	641.135	104	684.817	111
Nilüfer	282.761	100	651.267	230	811.409	287
Gemlik	92.944	100	131.493	141	147.191	168
Mudanya	52.604	100	151.350	288	192.876	367
Gürsu	55.129	100	92.799	168	102.445	186
Kestel	38.327	100	58.565	153	70.315	183
TOPLAM	1.905.536	100	2.661.447	140	3.056.911	160

Bursa'daki otomobil sahipliği gelişimi ve geleceğe ait tahminler aşağıdaki Şekil 3'de verilmiştir. Araç sayısındaki hızlı artışın devam edeceği öngörülmektedir.



Şekil 3. Bursa'daki otomobil sahipliği gelişimi ve geleceğe ait tahminler (Dinç, 2012)

Bursa'da ulaşım türlerinin 2010 yılındaki kullanım oranları (türel dağılım) ve geleceğe ait tahminler aşağıdaki Tablo 3'de verilmiştir:

Tablo 3. Bursa'da ulaşım türlerinin 2010 yılındaki kullanım oranları (türel dağılım) ve geleceğe ait tahminler (Dinç, 2012)

Ulaşım aracı	2010 (%)	2030 (%)
Binek otomobili	16,6	23,7
Taksi	0,4	0,4
Toplu taşıma araçları (Dolmuş dahil)	25,1	19,3
Servis otobüsleri	15,2	20,4
Yaya	42,2	35,5
Bisiklet	0,5	0,7
TOPLAM	100	100

Ana Planda dolmuşlarla ilgili olarak kısa vade önerisi olarak şu ifade bulunmaktadır: “2014 yılına kadar, aşağıda belirtilen tedbirler uygulamaya konulmalıdır. Bunlar; Osmangazi şehir merkezinde oluşan trafiğin azaltılması için, taksi dolmuşlarının ruhsatları yeniden düzenlenmesinin ve değiştirilmesinin (Mikrobüs, Taksi ruhsatları veya otobüs lisansları gibi) sağlanması”. Bu öneri doğrultusunda Bursa Büyükşehir Belediyesi dolmuşların taksiye dönüştürülmesi için planlamalar yapmıştır. Dolmuşçulara Taksi durağı olarak bazı yerler önerilmiştir (“Dolmuşların Taksiye”, 2020).

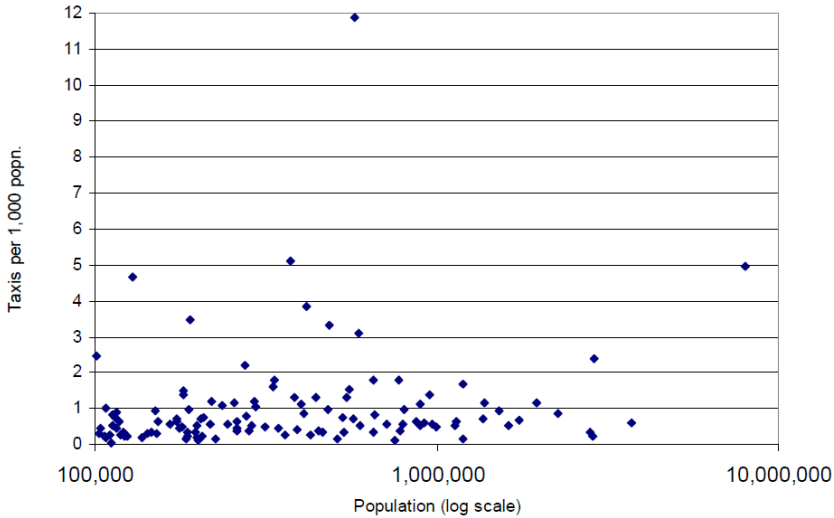
### 3.2. Taksi sistemleri hakkında bilgi

Kent merkezinde otomobilin bir diğer verimli kullanım şekli de taksi sistemidir. İnsanlar normalde özel araçlarını çoğunlukla sabah işe, okula vb giderken ve akşam eve dönerken kullanmakta, arada ise bu araçlar otoparklarda yer işgal etmektedir. Taksi sistemi kent merkezinde insanlara istedikleri anda özel araç konforunu ve kapıdan kapıya seyahat kolaylığını kabul edilebilir bir maliyetle sunmaktadır. Bu araçlar gün içerisinde çok defa kullanıldıklarından verimli bir ulaşım sistemi olarak tanımlanabilir. Ancak yolculukların çoğu zaman 1 kişi için yapılması ve aynı güzergâh üzerinde seyahat edenlerin ortak araç kullanımına uygun olmaması sebepleriyle, toplu taşıma araçlarıyla kıyaslandığında yol altyapısının verimsiz kullanımına sebep olmaktadır.

Bursa'daki tarihi kent merkezinde (Osmangazi, Yıldırım ve Nilüfer ilçelerinde) taksi kullanım oranı yaklaşık %0,5 olup, 841 taksi ile hizmet verilmektedir. 2012 yılı tahminine göre 1.734.705 nüfusu olan bu bölgede her 1000 kişiye 0,485  $\approx$  0,5 taksi düşmektedir (Dinç, 2012).

Kentlerdeki ideal taksi sayısının ne olması gerektiği konusunda yapılan çalışmalar sonucunda sadece nüfusa bağlı olarak bir genelleme yapılmasının uygun olmadığı, nüfus yoğunluğu, gelir seviyesi, diğer toplu taşıma sistemleriyle ilişki ve kentin yapısının da oldukça etkili olduğu ortaya konulmuştur. Aşağıdaki Şekil 4'de 118 ABD kentinde yapılan oldukça kapsamlı bir araştırmanın (Schaller, 2005) sonuçları verilmiştir:

Figure 1. Taxicabs per 1,000 population for 118 U.S. cities



Şekil 4. 118 ABD kentindeki nüfus ve 1000kişiye düşen taksi sayısı ilişkisi (Schaller, 2005)

Görüldüğü gibi bazı şehirlerde 1000 kişiye düşen taksi sayısı 12'ye kadar yükselirken, çoğu şehirde 0-1 aralığında yer almaktadır. Bu gerçek aslında Bursa Büyükşehir Belediyesi tarafından da kabul edilmektedir. 26 Aralık 2012 tarihinde internet sayfalarında yer alan basın bülteninde; “Büyükşehir sınırlarında 2 milyonu aşkın nüfusun bulunduğuna işaret eden yetkililer, Bursa’da her bin kişiye düşen taksi sayısının 0,45 olduğunu belirtti. Kişi başına düşen taksi sayısının İstanbul’da 1,8, Atina’da 3,5, Londra’da 3, Paris’te 7 ve Brüksel’de de 4 olduğunu ifade eden yetkililer, bu oranların, daha çağdaş bir kent olma yolunda emin adımlar atan Bursa’nın taksi ihtiyacını da ortaya koyduğuna dikkati çekti” yazılmıştır (“Dolmuşların Taksiye”, 2020).

Ancak bu açıklamada Paris’de 7 olan sayının, Londra’da neden 3 olduğu konusuna ise değinilmemiştir. Ayrıca en büyük taksi oranlarına sahip olan şehirlerin başkent olduğuna, örneğin ABD’de Washington’un 12 taksi/1000 kişi oranına sahip olduğuna dikkat edilmediği açıktır. Genel olarak başkentlerde bulunan devlet dairelerinden dolayı, diğer şehirlerden iş için pek çok kişi uçakla veya trenle gelmekte ve başkentte taksi kullanılmaktadırlar. Bu yüzden başkentlerde taksi sayısı ve taksi kullanım oranı her zaman daha fazladır. Ayrıca Bursa ile kıyaslanan diğer şehirlerin hepsi önemli turistik şehirlerdir. Ayrıca bu turistler bizdeki gibi “Her Şey Dahil” sistemi ile otellerden çıkmayacak şekilde değil, Paris kentini gezmek için geldiklerinden ciddi bir taksi kullanımını bulunmaktadır. Bunun yanında Paris’e gelen turistlerin gelir düzeyi olarak daha üst gruba mensup olduğuna da dikkat edilmelidir.

Taksi sistemlerini diğer toplu taşıma sistemlerinden ayıran en önemli özellikleri, yüksek konfora ve yüksek fiyatlara sahip olması sebebiyle yüksek gelirli kişilere uygun olması, düşük gelirli vatandaşların ise genellikle düşük, cenaze, gezmeler ve hastane yolculukları gibi özel durumlarda seyrek olarak bu ulaşım türünü kullanmalarındır. Bu yüzden taksi durakları yerleri belirlenirken yüksek gelir seviyesine sahip bölgeler, önemli kamu binaları, hastaneler, okullar vb binaların civarları tercih edilmektedir. Düşük gelirli bölgelerde ise sadece yüksek nüfus yoğunluğu olan yani çok katlı birçok binanın bulunduğu yerler seçilmektedir. Çoğunlukla birkaç katlı gecekondular tarzı yapılaşmanın yoğun olarak bulunduğu bölgelerde taksi kullanımını oldukça azdır.

### **3.3. Bursa Büyükşehir Belediyesi’nin Dolmuşların Taksiye Dönüştürülmesi Politikasının Değerlendirilmesi**

Her ne kadar Ulaşım Ana Planında “taksi dolmuşlarının ruhsatları yeniden düzenlenmesinin ve değiştirilmesinin (Mikrobüs, Taksi ruhsatları veya otobüs lisansları gibi) sağlanması” ifadesi yer alsada, Bursa Büyükşehir Belediyesi dolmuşların taksiye dönüşümünü tercih ettiğini daha önceki uygulamaları ile göstermiştir. Hatta bu amaçla Belediyenin web sayfasında

başvuru dilekçeleri ve önerilen 30 durak yeri yayınlanmıştır(“Dolmuşların Taksiye”, 2020).

Bu dönüşüm sürecinin etkileri 3 ana başlık altında incelenmelidir:

#### 1. Bursa trafiği açısından:

Dolmuş sistemleri hakkındaki en büyük eleştiri, düşük verimle çalışan sistemler olmalarıdır. Örneğin 250 yolcuyu taşımak için 1 tramvay veya 3 otobüs veya 18 minibüs gerekirken, 63 dolmuş gerektiği ifade edilmektedir. Bu yüzden dolmuşların kent merkezinde zaten sıkışık olan bölgelerde ciddi trafik sorunlarına yol açtıkları ifade edilmektedir. Oysa burada asıl dikkate alınması gereken rakam 250 yolcuyu taşımak için 100-250 otomobile gerek olacağı ve ayrıca bu otomobiller için park yerlerine ihtiyaç olacağıdır. Çünkü dolmuş sistemi sağladığı yüksek konfor ile tramvay ve otobüsün değil, taksi ve özel otomobil sistemlerinin alternatifidir. Bu durumda hane başına ortalama %37, hatta Nilüfer bölgesinde %56 özel otomobil sahipliğine ulaşılan Bursa’da, dolmuşların kaldırılmasıyla oluşacak açığın büyük kısmının özel otomobiller ve taksiler tarafından doldurulacağı açıktır. Bu araçlarda ise ortalama 1-2 yolcu taşındığından, eski durumdakinden daha fazla trafik yoğunluğu değerlerine bile ulaşılabilir. Öncelikle yapılacak anket çalışmalarıyla, dolmuş yolcularının hangi ulaşım türlerine kayacağına tespit edilmesi gereklidir. Ardından buna göre bir uygulama projesi hazırlanmalıdır (Dinç, 2012).

#### 2. Vatandaş (kullanıcı) açısından:

Vatandaş açısından bakıldığında da ciddi sorunlar bulunmaktadır. Dolmuş sisteminin kaldırılmasıyla oluşacak boşluğu doldurmak için yeni otobüs hatları kurulmasının planlanmadığı anlaşılmaktadır. Bu durumda uzun yıllardır dolmuş sistemini kullanmaya alışmış olan vatandaşların en yakın otobüs durağına kadar yürümesi gerekecektir. Otobüs hatları kurulsa bile konfor sebebiyle taksi sistemini seçecek olan vatandaşlar için ciddi bir fiyat artışı yaşanacaktır. Örneğin Bursa Çekirge Devlet Hastanesi ile Bursa Heykel Meydanı arasında taksiyle yolculuk dolmuşla yolculuğa göre yaklaşık 10 katı fiyata mal olmaktadır. Özel araçla gidilmesi taksiye göre çok ucuza mal olsa bile otopark yeri/ücreti sorunu bulunmaktadır.

#### 3. Dolmuş Esnafı açısından:

Taksi sistemleri genellikle yoldan yolcu alınması, duraktan yolcu alınması veya telefonla çağrılan adrese gidilmesi şeklinde çalışmaktadır. Yeni bir Taksi durağı kurulması ve çevrede tanınması belli bir süre gerektirmektedir. Ancak düşük gelire sahip ve düşük nüfus yoğunluklu bir bölgede kurulacak taksi durağının gelirinin az olacağı oldukça açıktır. Dolmuş sahiplerinin yıllardır hizmet verdikleri güzergâhlardan ayrılıp, sabit durak yerlerine sahip olmaları durumunda, özellikle kendilerini ve

taksi duraklarını çevredeki vatandaşa tanıtıncaya kadar en az 6 aylık bir geçiş dönemi yaşanması ve bu süreçte gelirlerinde ciddi azalma olması beklenmelidir. Hatta bazı durak yerlerinde eski gelirlerine hiçbir zaman ulaşamayacakları göz önüne alınmalıdır.

### **3.4. Bursa Ulaşım Ana Planındaki dolmuş-taksi dönüşümünün değerlendirilmesi**

Ulaşım Ana Planları şehirlerin genel ulaşım politikalarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bir uygulama veya işletme planı değildir. Örneğin tramvay önerisi yapılır ama tramvayların hangi saatte kaç dakika aralıklarla çalışacağı araştırılmaz veya yeni kavşak önerisinde bulunulur ama kavşaklardaki sinyal sürelerinin ne olacağı da Ulaşım Ana Planında yer almaz. Bursa Ulaşım Ana Planında dolmuşların ne ölçüde trafik sorunlarına yol açtıkları, kaldırıldıklarında yolcularının hangi ulaşım türüne kayacağı, kentin taksi ihtiyacının ne kadar olduğu ve nerelerde yoğunlaştığı konularında bir açıklama bulunmamaktadır. Bu sebeple dolmuş-taksi dönüşümünün eski yöntemle devam edeceği, yani, vatandaşlardan veya muhtarlardan gelen isteklere göre taksi durakları yerleri belirlenip, ancak buralara yerleşecek esnafın geleceğinin ne olacağı konusunda ciddi bir araştırma yapılmayacağını tahmin etmek zor değildir.

Oysa hem Bursa trafiğini, hem dolmuş esnafını, hem de kullanıcıları ilgilendiren böyle önemli bir karar, ciddi talep analizleri yapılabilmesi için anketler yapılmasını gerektirmektedir. Anketler sayesinde kurulacak modellerle, hem dönüşüm sonrası yolcuların hangi ulaşım türlerine kayacağı ve değişecek trafik yoğunluğu değerleri bulunabilir, hem de nerelere taksi durakları kurulması gerektiği belirlenebilir. Oldukça kapsamlı bir çaba gerektiren bu çalışma yapılmıyorsa, dönüşüm hakkında esnafın görüşüne önem verilmelidir. Yıllardır aynı hatlarda vatandaşa hizmet veren esnafın, nerelerde taksi durağı ihtiyacı olduğu konusundaki görüşleri bilimsel çalışmalar kadar değerlidir. Ancak Belediye tarafından ciddi bir çalışmaya dayanmadan, zorunlu olarak durak yerlerinin ve duraktaki araç sayılarının belirlenmesi ileride telafisi güç sonuçlar doğurabilecektir. Daha önce açıklandığı gibi yanlış kararlar özel otomobil ve taksi trafiğinde ciddi artışlara ve esnafın mağduriyetine yol açabilir.

## **4. SONUÇLAR**

Kentsel ulaşım ile ilgili alınacak kararlar öncesinde çok ciddi araştırmalar gereklidir. İyi niyetle ve iyi sonuçlar beklenerek alınan kararlar hiç beklenmeyen sonuçlar doğurabilir. Sonuçta ülke ve kent kaynakları verimsiz kullanılmış olur.

Dolmuş sistemi, metro ve otobüsün verimsiz alternatifi değil, tek kişiyle otomobil kullanımının verimli bir alternatifi olarak görülmelidir. Dolmuş sisteminin kaldırılmasıyla mevcut kullanıcıların ne kadarının diğer

toplu taşıma araçlarına kayacağı, ne kadarının özel otomobil kullanacağı konusunda ciddi çalışmalar yapılmalıdır.

Taksi sistemlerini diğer toplu taşıma sistemlerinden ayıran en önemli özellikleri, yüksek konfora ve yüksek fiyatlara sahip olması sebebiyle yüksek gelirli kişilere uygun olması, düşük gelirli vatandaşların ise genellikle düşük, cenaze, gezmeler ve hastane yolculukları gibi özel durumlarda oldukça seyrek olarak bu ulaşım türünü kullanmalarındır. Özellikle birkaç katlı gecekondu tarzı yapılaşmanın yoğun olarak bulunduğu bölgelerde taksi kullanımı oldukça azdır.

Taksi sistemi, dolmuş sistemine göre oldukça pahalı bir sistem olduğundan, geçiş aşamasının hem araç sahipleri, hem de kullanıcılar açısından sancılı bir süreç olacağını tahmin etmek zor değildir.

Bu bilgiler ışığı altında bu noktada yapılması gereken, Ana Ulaşım Planı ile entegre olacak şekilde, dolmuş sisteminin kademeli veya tamamen ortadan kaldırılması konusunda geniş kapsamlı, dolmuş esnafı ve bu sistemin kullanıcılarını da işin içerisine dahil eden bir araştırmanın yapılmasıdır. Dolmuş işletme lisanslarının hangi türe dönüşeceği ve bunların yer ve güzergâhlarının ne olacağı konusunda bir plan eki veya ayrıntılı bir uygulama planı hazırlanması gereklidir. Dolmuşların taksiye dönüştürülmesi konusunda Bursa Büyükşehir Belediyesinin çalışmaları sonucunda 2012’de 702 olan dolmuş sayısı, taksi dönüşümü sayesinde 2019’da 305’e kadar indirilmiştir. Dönüşüm halen devam etmekte olup, bu dönüşümün zamana yayılması son derece yerinde bir uygulama olmuştur (Dinç, 2012; “Ulaşımın olmazsa olmazı”, 2020).

## KAYNAKLAR

- Acar, İ.H., (2016), İstanbul İçin Uygulanan Trafik Politikaları Ne Kadar Geçerli?, *İTÜ Vakfı Dergisi*, 71, 48-51.
- Adalar'daki faytonlar yaklaşık 90 milyon liraya İBB'ye geçecek. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.ntv.com.tr/turkiye/adalardaki-faytonlar-yaklasik-90-milyon-liraya-ibbye-gececek,7-r0X60oGk6dJuZ7eLE1fA>
- Carpool Lanes. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://drivesed.com/driving-information/driving-techniques/carpool-lanes.aspx>
- Dinç, S., (2012), *Gelişmekte olan kentlerde ulaşım sorunlarının sürdürülebilir çözümleri için ulaşım ana planlarının önemi: Bursa örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi, İstanbul, Türkiye.
- Dolmuşların taksiye dönüşümü hız kazandı. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.bursa.bel.tr/dolmuslarin-taksiye-donusumu-hiz-kazandi/haber/12176>
- First test of driverless minibus in Paris Saturday. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <http://www.techcoat.com/first-test-of-driverless-minibus-in-paris-saturday/#prettyPhoto>
- Hayvan hakları: 10 soruda faytonlar, atlar, adalar... (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://kuzeyormanlari.org/2019/09/23/hayvan-haklari-10-soruda-faytonlar-atlar-adalar/>
- İşte İstanbul'un taksi gerçeği. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://odatv4.com/iste-istanbulun-taksi-gercegi-27112031.html>
- Kent İçi Ulaşım İçin Planlama Yöntemleri ve Doğru Seçim Kriterleri. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: [https://www.emo.org.tr/ekler/ceaef1730be3496\\_ek.pdf](https://www.emo.org.tr/ekler/ceaef1730be3496_ek.pdf)
- King, D. A., & Goldwyn, E. (2014). Why do regulated jitney services often fail? Evidence from the New York City group ride vehicle project. *Transport Policy*, 35, 186-192.
- Kronolojik Tarihçe. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.iett.istanbul/tr/main/pages/kronolojik-tarihce/32>
- Mini electric buses back in Rome. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.electrive.com/2018/12/19/mini-electric-buses-back-in-rome/>
- Schaller, B. (2005). A regression model of the number of taxicabs in US cities. *Journal of Public Transportation*, 8(5), 4.
- Ulaşımında Enerji Verimliliğinin Artırılmasına İlişkin Usul Ve Esaslar Hakkında Yönetmelik. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/05/20190502-5.htm>



Ulaşımın olmazsa olmazı taksi ve dolmuşlar. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi:  
<https://www.bursahaber.com/ozel-haber/ulasimin-olmazsa-olmazi-taksi-ve-dolmuslar-h2371.html>

ZipCar and Alternative Transportation. (2020, 21 Aralık). Erişim adresi: <https://ecohusky.uconn.edu/zipcar-and-alternative-transportation/>

# Bölüm 19

## ÇELİK LİF VE KÖMÜR KÜLÜ KATKILI BETONUN DAYANIM ÖZELLİKLERİ



*Aylin AKYILDIZ'*

---

1. Dr. Öğr. Üyesi Aylin AKYILDIZ

**Kurumu:** Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu, Tekirdağ, aakyildiz@nku.edu.tr



## 1. Giriş

Günümüzde artan nüfus ile birlikte, toplu yaşam alanlarının genişlemesi; buna bağlı olarak ortaya çıkan barınma, eğitim, sağlık, ulaşım gibi ihtiyaçların temini gerekir. Bu ihtiyaçların giderilmesi için konut, okul, hastane, yol, baraj, iş yerleri vs. inşa edilmesi gerekir. Bu aşamada, beton; uygulama kolaylığı, sağlamlığı ve nispeten ucuz olması nedeniyle vazgeçilmez bir yapı malzemesidir [1].

Beton, agrega, çimento, su ve katkıdan oluşan başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla sertleşerek dayanım kazanan kompozit ve taşıyıcı bir malzemedir. Beton gevrek bir malzemedir ve dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yüksek olması, onarım maliyetinin düşüklüğü ve ekonomik bir malzeme olması sebebiyle çok kullanılmaktadır. [2].

Beton, aşınma, çekme dayanımı düşük, çatlak oluşumundan sonra yük taşıma yönünden zayıf özellik göstermektedir. Çekme dayanımı düşük olan betonlarda, dinamik yükler, çatlak oluşumuna ve yayılmasına sebep olurlar. Betonun zayıf özelliklerin iyileştirilmek için betona lif eklenerek lifli betonlar üretilmiştir [3, 4]. Betona çelik lif eklenmesi betonun çekme, eğilme, yorulmaya karşı dayanımları iyileştirmekte ve mühendislik özellikleri geliştirmektedir [5].

Çelik lif katkılı betonlar, son yıllarda beton dayanımına olan olumlu etkileri ve enerji yutma kapasitelerinin fazla olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır [6].

Günümüzde atık kontrolünde en büyük problemlerden biriside atıkların günden güne artması ve ciddi boyutlarda çevre sağlığını tehdit etmesidir. En uygun çözüm atıkların değerlendirilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır [7].

Son yıllarda atıkların yararlı alanlarda yeniden kullanılabilmesi ile ilgili olarak yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Özellikle çevre kirliliği yapan büyük hacimli atıkların bağlayıcı malzeme olarak çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılması yaygın bir uygulama olmaktadır [8].

Bu çalışmada, çimentonun kömür külü ile yer değiştirmesi sonucu çelik lif katkılı betonların 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde dayanım özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, alınan kömür külü betonda çimentoyla %20 oranında yer değiştirme yapacak şekilde katılarak betonun birim hacim kütlesi, ses geçiş hızı ve basınç dayanımının farklı lif tipi ve kür süresinin etkisi incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Malzemeler

Beton üretiminde, çimento fabrikasından üretilen CEM I 42.5 (TS EN 197-1 [9].) çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

KİMYASAL ANALİZ	Özellik		Birim	CEM I
		Çözünmez Kalıntı	%	
	SO <sub>3</sub>	%		3.22
	Kızdırma Kaybı	%		1.00
	Cl <sup>-</sup>	%		0.0445
FİZİKSEL ANALİZ	İNCELİK	Özgül Ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	3.15
		Priz	ilk	146
			son	193
	Hacim Genleşmesi	mm	1	
	Özgül Yüzey	cm <sup>2</sup> /g	3710	
	45µm elek kalıntısı	%	5.8	
	90 µm elek kalıntısı	%	0.3	
MEKANİK ÖZELLİK		Basınç dayanımı, 2 gün	MPa	28.9
		Basınç dayanımı, 7	MPa	43.8
		Standard dayanım,28	MPa	58.3

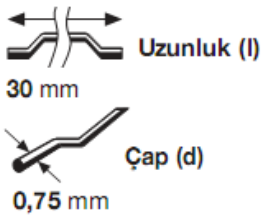
Beton üretiminde iki tip kalker esaslı kırma taşlar ile kırma kum ve doğal kum kullanılmıştır. Üretimde kullanılacak olan agregaların yoğunlukları kırma taş 2.564 kg/m<sup>3</sup>, kırma kum 2.500 kg/m<sup>3</sup> ve doğal kum 2.630 kg/m<sup>3</sup> dir.

Beton üretiminde kullanılan liflerin teknik özellikleri Tablo 2’de görülmektedir.

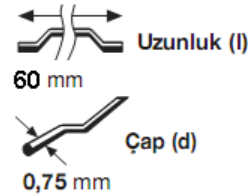
Tablo 2. Çelik liflerinin bazı özellikleri

Lif	Lif boyu, ℓ mm	Lif çapı, d mm	Boy/çap, ℓ/d	Çekme dayanımı MPa
RC80/60	60	0.75	80	1050
ZP308	30	0.75	40	1050

Çalışmada kullanılan çelik lifler Şekil 3’de görülmektedir.

**ZP308**

Performans sınıfı: 45  
Uzunluk / Çap oranı (= ℓ/d): 40

**RC80/60**

Performans sınıfı: 80  
Uzunluk / Çap oranı (= ℓ/d): 80

Şekil 1. Kullanılan çelik lifler

Çalışmada kullanılan kimyasal katkı maddesinin özellikleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Kimyasal katkının bazı teknik özellikleri

Malzeme yapısı	Naftalin sülfonat esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1.20-1.22 kg/l
Klor içeriği	<0.1
Alkali içeriği	<5

Kömür külü betonda çimentoyla %20 oranında yer değiştirme yapacak şekilde bütün serilere katılarak üretim yapılmıştır.

## 2.2. Yöntem

Beton üretimi, laboratuvarımızda 50 dm<sup>3</sup> kapasiteli düşey eksenli laboratuvar mikserinde yapılmıştır. Öncelikle mikserde agregalar konmuş ve 30 s kadar kuru karıştırma uygulanmıştır. Daha sonra çimento ve kömür külü eklenerek 30 s kadar daha kuru karıştırma yapılmıştır. Kimyasal katkının yarısı karışım suyu ile karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu eklenerek 1.5 dakika karıştırma uygulanmıştır. Kimyasal katkının kalanı da karışıma eklenerek 1.5 dakika daha karıştırılmıştır. Bu süre sonunda mikser durdurularak karışım 1 dakika kendi haline bırakılmıştır. Mikser içerisindeki betonda su kuma ve ayrışma mala yardımı ile gözle kontrol edildikten sonra tüm karışım 30 s kadar tekrar karıştırılarak mikserden alınmıştır. Lifli seriler için ise, katkı ilavesinin ardından akıcı kıvamda betonun elde edildiği kontrol edildikten sonra lifler eklenmiş ve tüm karışım 2 dakika sürekli karıştırılmıştır. Bu ek karıştırmanın liflerin karışım içerisinde birbirlerinden ayrılarak homojen bir şekilde dağılması için yeterli olduğu görülmüştür. Tablo 4'te numunelerin miktarları ve isimlendirilmesi verilmiştir.

Tablo 4. Serilerin lif tipi ve miktarı

	Seri kodu	Lif tipi	Lif miktarı (kg/m <sup>3</sup> )
Çelik lif	F0	-	-
	F1	ZP308    ℓ/d=40	30
	F2	RC80/60    ℓ/d=80	30

## 2.3. Metod

### 2.3.1. Taze birim hacim kütlesi

Betonun taze birim hacim kütlesi belirlenmesi 10 dm<sup>3</sup> kapasiteli birim hacim ağırlığı kabı kullanılarak 2 g hassasiyetindeki laboratuvar terazisi ile yapılmıştır. Üretilen taze beton üretimden sonra laboratuvar mikserinden homojen olarak alınmış ve birim hacim ağırlık kabına doldurularak deney yapılmıştır.

### 2.3.2. Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı deneyi standarda (TS EN 12504-4 [10].) göre yapılmıştır. Deney aleti, alıcı, verici problardan dalganın ortam içinde yayılma hızını ölçmektedir. Küp numuneler üzerinde uygulanan ultrases geçiş hızı ölçümünde önce numunelerin boyları ölçüldü sonra her numunenin karşılıklı iki yüzeyine köşegenler çizilerek numune ses verici ve ses alıcı problemlerin arasına yerleştirilerek sesin numune boyunca geçiş süresi mikro saniye cinsinde ölçüldü. Daha sonra bulunan bu değer numunenin boyuna bölünerek ultrases geçiş hızı km/s cinsinden (1) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$V = \frac{t}{s} \times 1000 \quad (1)$$

V: dalga hızı (km/s),

S: iki yüzey arasındaki mesafe (m),

t: Ses dalgasının numune üzerinden geçme süresi,  $\mu$ s

### 2.3.3. Basınç dayanımı

Üretilen numuneler üzerinde 2, 7, 28 günlük basınç dayanımları incelenmiştir. Bunun için üçer numuneden oluşan numune takımları hazırlanmıştır. Tüm numuneler 2, 7 ve 28 gün kür havuzunda kür edilmiştir. Kırılmadan önce ultrases geçiş hızları tespit edildikten sonra basınç dayanımları ölçülmüştür.

Yapılan basınç deneyleri, 200 ton kapasiteli kuvvet kontrollü bir preste gerçekleştirilmiştir. Deneye başlanmadan önce yük uygulanacak yüzeyin boyutları ölçülmüş ve yüzey alanı (A) hesaplanmıştır. Numunelerin en düzgün yüzeyleri pres tablasına temas edecek şekilde ve beton döküm yönü yatay olacak şekilde pres tablasına yerleştirilmiş ve kırılma yükleri ölçülmüştür. Basınç dayanımı Denklem 2'nin yardımıyla elde edilen kırılma yükleri deney başlangıcında ölçülen yüzey alanına bölünerek numunelerin basınç dayanımları elde edilmiştir.

$$\sigma_b = P/A \quad (2)$$

$\sigma_b$ ; basınç dayanımını,

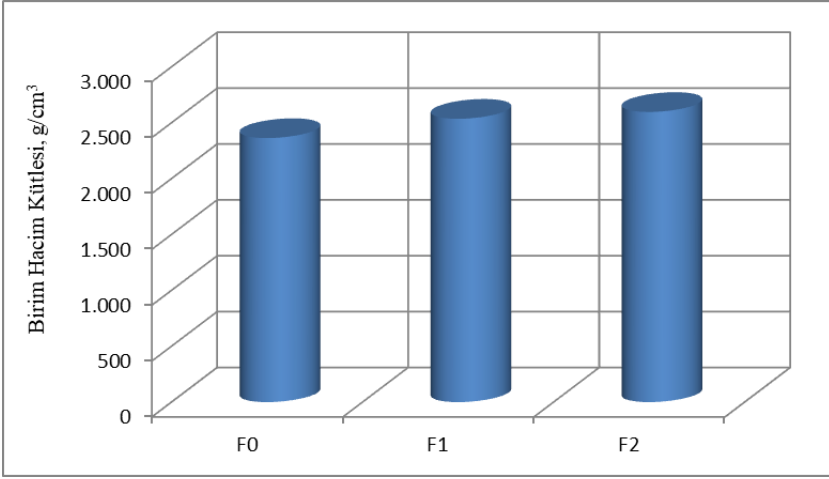
P; kırılma yükü,

A; basınç uygulanan yüzeyin alanını göstermektedir.

## 3. Araştırma Bulguları ve Tartışma

### 3.1. Taze birim hacim kütlesi

Lif tipine göre betonların birim hacim ağırlığı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Taze birim hacim kütlesi

Birim kütle değerlerine göre, deney numuneleri ile şahit betonun birim ağırlığı karşılaştırıldığında üretilen lif katkılı numunelerin değerlerinde şahit numuneye göre artış görülmüştür.

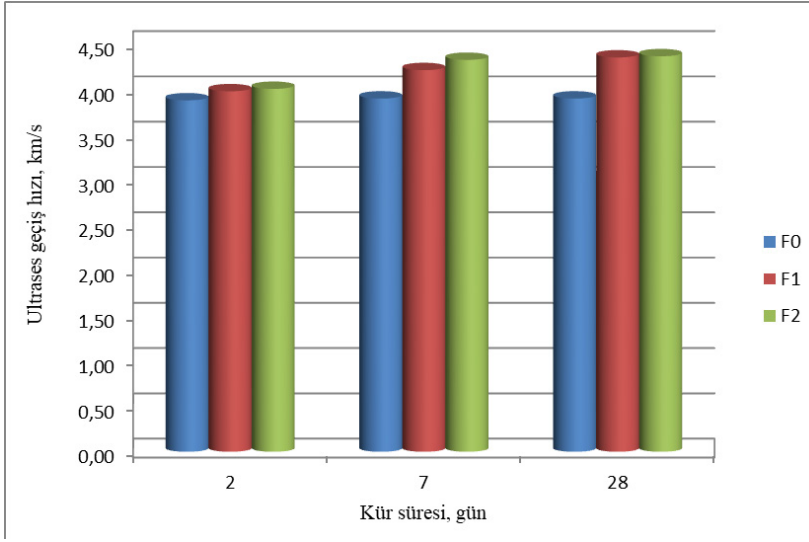
### 3.2. Ultrases Geçiş Hızı

Kömür külü katkılı numunelere ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 3’de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde ses geçiş hızı değeri en yüksek olan harç numunesi 28 günlük kür süresinde F2 kodlu numunedir. Kür süresi arttıkça ultrases geçiş hızı değerleri de artmıştır.

Ultrases geçiş hızı beton içerisinden geçen dalganın geçiş süresini ölçerek geçiş hızını hesaplamaktadır. Ses hızı, betonun boşluk oranı hakkında fikir vermek olup, içerisinde boşlukların olması durumunda ses dalgasının diğer proba varış süresi uzamakta ve hız azalmaktadır. Ultrases deneyi, hazırlanmış olan 150 x 150 x 150 mm’lik numunelere uygulanmıştır.

Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde, farklı lif tipinden oluşturulan numunelerin kür sürelerinde ultrases geçiş hızı değerleri şahit numuneye göre daha yüksek çıktığı Şekil 3’de görülmektedir. Ultrases değerleri ile basınç dayanımı değerlerine baktığımızda paralellik göstermektedir. Ses hızı ne kadar az boşluğa rastlarsa hızlı ilerler ve ultrases değerleri yüksek olur. Betonun geçirimsiz olması dayanımının da yüksek olması demektir.





Şekil 3. Ultrases geçiş hızı değerleri

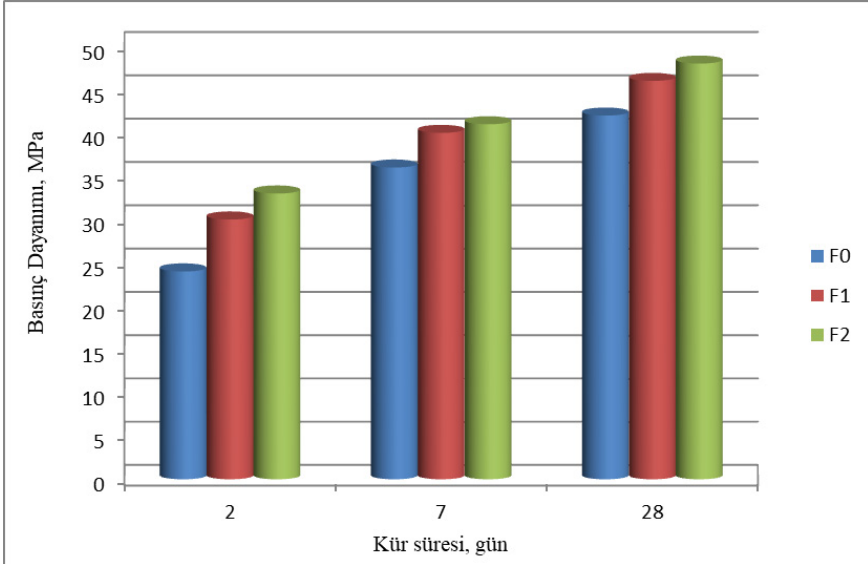
Neville [11] tarafından ses geçiş hızı ile ilgili yapılan çalışmaya göre ses geçiş hızı değerine göre betonların kalitesini gösteren sınıflandırma Tablo 5'te görülmektedir. Yapılan çalışmadan hareketle numuneler tümünde ses geçiş hızı 4 - 4.5 km/s değeri arasında deney sonuçlarına sahiptir. Üretilen numunelerin ses geçiş hızı açısından iyi sınıfta yer almaktadır. Basınç dayanımı sonuçları da bunu desteklemektedir.

Tablo 5. Betonun Ultrases Geçiş Hızına göre sınıflandırılması

Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Beton kalitesi
>4.5	Çok iyi
3.5-4.5	İyi
3.0-3.5	Orta
< 3.0	Kötü

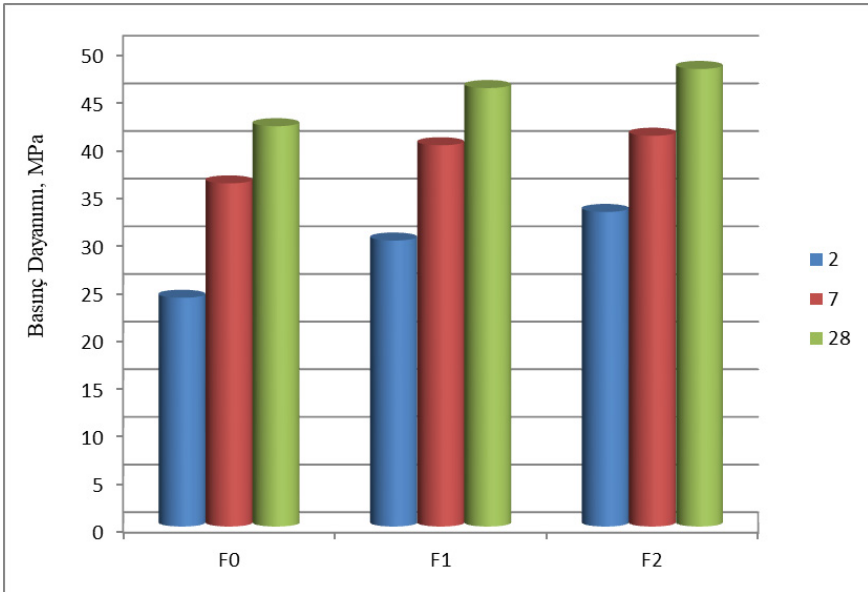
### 3.3. Basınç deneyi

Basınç dayanım değerleri lif çeşidine ve kür süresine göre Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. Değişen kür süresi ve lif çeşidine bağlı olarak, basınç dayanım değerlerinin olumlu yönde değiştiği Şekilde görülmektedir.



Şekil 4. Kür süresine göre basınç dayanım değerleri

Beton içerisinde bulunan sürtünme kuvvetleri, malzeme içerisinde bulunan mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdir. Betona eklenen çelik lifler zayıf bölgelerde küçük köprüler şeklinde çalışır. Bu sebeple çatlak oluşumu çelik lifli betonlarda düzenlidir. Bu özellik beton içerisindeki çelik liflerin homojen dağılması ile mümkündür.



Şekil 5. Basınç dayanım değerleri

Şekil 5'e göre betonda basınç dayanımının çelik lif katkısı ile F1 ve F2 tipindeki çelik liflerde beton basınç dayanımında artış görülmüştür. 28 günlük numunelerde F2 tip çelik lifli numunelerin dayanımları, şahit numunelerin basınç dayanımlarının %69'una ulaşmıştır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, kömür külü ile yer değiştirmesi sonucu çelik lif katkılı betonların 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde dayanım özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, alınan kömür külü betonda çimentoyla %20 oranında yer değiştirme yapacak şekilde katılarak betonun birim hacim kütlesi, ses geçiş hızı ve basınç dayanımının farklı lif tipi ve kür süresinin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- \* Lif katkılı numunelerde çelik lifin kullanılmasından dolayı betonda birim ağırlıkta artış görülmüştür.
- \* İlave edilen çelik liflerin numunelerin ultrases geçiş hızlarında artışa sebep olduğu Şekil 3'de görülmüştür. Ayrıca kür süresinin artması ultrases geçiş hızlarını arttırmıştır.
- \* Lif katkılı numunelerinin basınç dayanımlarının 48 MPa ulaşmıştır Çelik lifli numunelerin dayanımları, şahit numunelerin basınç dayanımlarının %69'una ulaşmıştır. Basınç dayanımının çelik lif katkısı ile F1 ve F2 tipindeki çelik liflerde beton basınç dayanımında artış görülmüştür.
- \* Liflerin dayanımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu görülmüştür. Liflerin dağılımı ve yerleşmeye etkisi basınç dayanımlarının daha değişken olmasına neden olmuştur.

**KAYNAKLAR**

- [1] Özcan A. (2006). Endüstriyel Atıklar ve Polipropilen Lif İçeren Saha Betonlarının Özelliklerinin Araştırılması, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [2] Salami E. (2009). Çelik Liflerin Farklı Dayanıma Sahip Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [3] Kozak M. (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Bilimler Dergisi, 3(5): 26-35
- [4] Aydoğan T. (2002). Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [5] Yazıcı Ş. (2017). Çelik lif boyu ve kullanım oranının çelik lifli betonun özelliklerine etkisi, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science.
- [6] Kızıllığın B. (2009). Çelik ve Karbon Lifli Harçların Sülfat Etkilerine Dayanıklılığının İncelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [7] Çetin A. (1997). Endüstriyel atıkların asfalt beton kaplama karışımında değerlendirilmesi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [8] Murathan A, Asan A, Abdulkarem T.A., (2013). Çevresel Atıkların Yapı Malzemesinde Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 28(2), 409-416.
- [9] TS EN 197-1, (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [10] TS EN 12504-4, (2004). Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [11] Neville, A.M., (1995). properties of concrete “4th edition, Longman Group Limited.



# Bölüm 20

## FARKLI TİP ÇİMENTOLARDAN ÜRETİLEN HARÇLARIN FARKLI KÜR KOŞULLARINDA ÖZELLİKLERİ



*Aylin AKYILDIZ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> TNKÜ, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, aakyildiz@nku.edu.tr



## Giriş

Beton, dünyada önemli bir yer tutmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte, talepler doğrultusunda doğan malzeme sıkıntısı sebebiyle malzemenin en verimli şekilde kullanılması önem kazanmıştır. Betonun içyapısının, bağ özelliklerinin ve mekanik davranışının anlaşılması gerekmektedir [1].

Betonların mekanik dayanımı ve dayanıklılığının yüksek olması istenmektedir. Betonlarda ve harçlarda çatlakların ilerlemesi kolay olduğundan ve düşük çekme dayanımından dolayı durabilite düşüktür [2].

Betonun dayanımı ve dayanıklılık özellikleri zamana bağlıdır ve bu sürede ortam şartlarının sağlanması gerekmektedir. Çimento hidrasyonu süresince iç ve dış gibi çeşitli etkenler sonucu kayba uğrayan betonlarda betonun kür edilmesi ile nemin kontrollü bir şekilde betona geri kazandırılmasıdır [3]. Hidrasyonun devam edebilmesi için ortamda su bulunması gerekmektedir. Su bulunmadığında hidrasyon durur ve beton dayanım kazanamaz [4].

Havanın sıcaklığı ve nemi beton basınç dayanımı gelişimini etkilemektedir. Bu sebeple, aynı malzemedeki aynı miktarda üretilen havada bekletilmiş ve suda bekletilmiş betonun basınç dayanımı farklı olmaktadır [5].

Betonun kürü, çimentonun hidrasyonunun gelişmesine olanak verecek koşulların sağlanması ile hidrasyonun sağlanmasıdır. Taze betondaki nem, çimento hidrasyonu için gereken miktardan fazladır ama ortamda bulunan su buharlaşırsa, nem %80'in altına düşerse çimentonun hidrasyonu durabilir [6]. Hidrasyonun istenen şekilde ilerleyebilmesi için, kapiler boşlukların su ile dolu olduğudur. Betonun içerisindeki suyun kaybolması gerekmektedir [7].

Betonun yüzeyinde bulunan suyun buharlaşma hızı, beton terleme hızını geçerse, betonun yüzeyinde rötre çatlakları oluşur ve beton geçirimli olur. Çimentonun hidrasyon gelişimi başlangıçtaki 7 günde %60-80'ini tamamlamaktadır [8].

Deniz suyu içerisindeki tuz bileşikleri beton harç gibi malzemelerin içerisine girerek içerisinde kristalleşir, malzemenin fiziksel yapısının bozulmasına neden olur, dayanıklılığını etkiler [9].

Bu çalışmada, üç farklı kür koşullarında ve iki farklı tip katkılı çimentolarla üretilen harçlarda basınç, eğilme ve su emme özellikleri ve kür etkisi incelenmiştir. Bu sebeple su içerisinde, hava ortamında korunan ve deniz suyunda kür edilen numunelerin dayanım ve dayanıklılıkları arasındaki değişim araştırılmıştır. 2 farklı çimento tipinde üretilen harçlar suda, havada ve deniz suyunda kür şartlarının etkisi incelenmiştir.



## Materyal ve Yöntem

### Kum

Hazırlanan harç numunelerin yapımında kullanılan kum Beton Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Kumun özelliklerini Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kumun özellikleri

ÖZELLİK	BİRİM	
İnce madde oranı (<0,063)	%	2.7
Yassılık tayini		0.0
DYK Özgül ağırlığı	g/cm <sup>3</sup>	2.6
Su emme oranı	%	1.2

### Çimento

Beton üretiminde TS EN 197-1 [10] uygun çimento kullanılmıştır. Çimentoların özellikleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Çimentonun özellikleri

Malzeme		CEM II 32.5	CEM II 42.5
Priz Başlangıcı	dakika	177	200
Priz Sonu	dakika	235	260
Özgül Ağırlık	g/cm <sup>3</sup>	3.16	3.17
Özgül Yüzey	cm <sup>2</sup> /g	2980	3750
2 Günlük Dayanım	MPa	19.6	27.5
7 Günlük Dayanım	MPa	33.2	36
28 Günlük Dayanım	MPa	46.8	49.5
SO <sub>3</sub>	%	2.93	2.48
MgO	%	1.49	0.85
Kızdırma Kaybı	%	1.04	3.5
Çözünmeyen Kalıntı	%	0.20	0.40
Cl <sup>-</sup>	%	0.0326	0.0092
SiO <sub>2</sub>	%	20.42	
CaO	%	63.26	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4.60	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4.36	
C <sub>2</sub> S		52.55	
C <sub>3</sub> S		18.99	
C <sub>3</sub> A		4.82	
C <sub>4</sub> AF		22.91	

## Katkı maddesi

Çalışmamızda kullandığımız katkı maddemiz SİKA Yapı Kimyasalları AŞ'den temin edilmiştir. Viscocrete Hi-Tech 54 adlı akışkanlaştırıcılık sağlayan katkı kullanmıştır. Katkının özellikleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Kimyasal katkının özellikleri.

Kimyasal yapı	Modifiye polikarboksilat polimer
Yoğunluk	1.055 - 1.095 kg/dm <sup>3</sup>
PH	3 - 7
Donma noktası	-5 °C

## Yöntem

Harç malzemesi, TS EN 196-1 [11] göre üretilmiştir. Kütlece 1 kısım (450 g) çimento, 3 kısım (1350 g) kum ve 0.5 kısım (225 g) su miktarlar kullanılarak harç üretilmiştir. Hazırlanan karışımlar kalıplara (40x40x160 mm) konulmuştur. Kalıplara konulan numuneler bir gün sonra çıkarılıp 28 gün hava, su ve deniz suyu ortamlarına kür edilmek üzere bırakılmıştır.

## Metod

### Eğilme dayanımı

Numunelerin eğilme dayanımını TS EN 196-1 [11]'e göre yapılmıştır. Numuneler iki mesnet üzerine yerleştirilmiş ve kırma yükü (F) bulunmuş ve (1) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$R = \frac{1.5xFx\ell}{b^3} \quad (1)$$

R : Eğilme dayanımı, MPa

b : Numunenin kesitinin kenar uzunluğu, mm

F : Uygulanan kuvvet, N

$\ell$  : Mesnet arasındaki mesafe, mm

### Basınç dayanımı

Yapılan basınç deneyleri, numunelerin en düzgün yüzeyleri pres tablasına temas edecek şekilde ve kırılma yükleri ölçülmüştür ve (2) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{F}{1600} \quad (2)$$

$\sigma$  : Basınç dayanımı, MPa

F : Uygulanan kuvvet, N

1600 : Plakaların alanı, mm<sup>2</sup>

### Su emme

Su emme oranları deneyinde numunelerin etüv kurusu ağırlıkları ölçüldü ve sonra suya konulmuştur ve 48 saat sonra sudan çıkarılarak suya doymuş ağırlıkları ölçülmüş ve (3) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme Oranı} = \left[ \frac{B - A}{A} \right] \times 100 \quad (3)$$

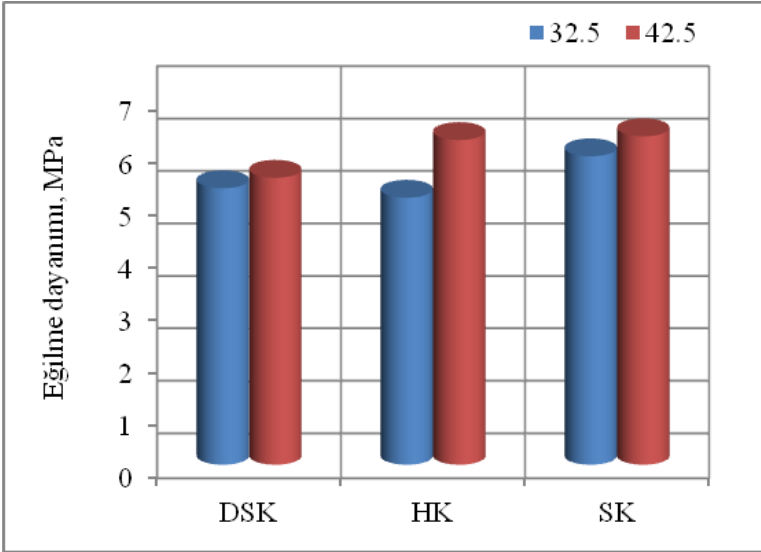
A: Etüv kurusu ağırlık, g

B: Kuru yüzey doymuş ağırlık, g

### Deney Sonuçları

#### Eğilme Dayanımı

Çimento tipine (CEM II 42.5 ve CEM II 32.5) ve kür durumuna göre eğilme dayanımı değerleri Şekil 1'de verilmiştir. Farklı kür koşullarında ve farklı çimentoyla üretilen harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde, 3 farklı kürde bekletilen numunelerin kür süresi sonunda yapılan eğilme dayanımında en yüksek dayanımı CEM II 42.5 çimentolu numunelerde bulunmuştur buna göre çimentoların dayanım sınıfının mekanik özellikler üzerinde önemli olduğunu söyleyebiliriz.

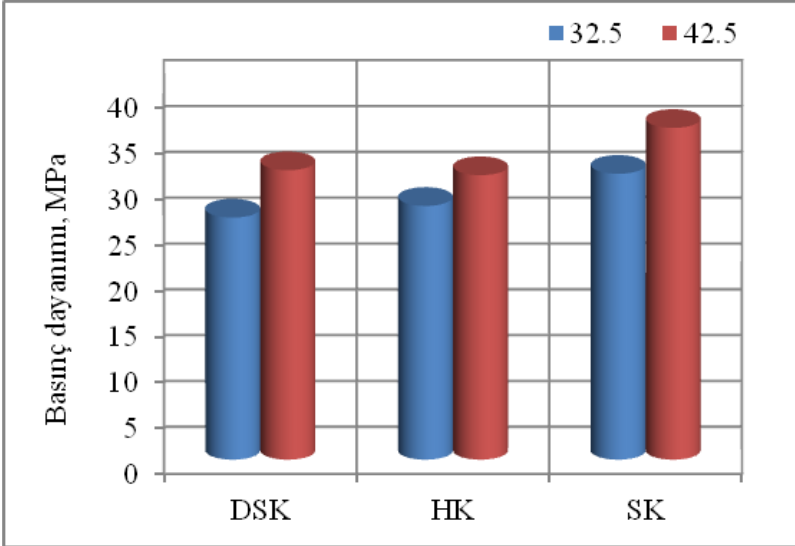


Şekil 1. Farklı kür koşullarına göre eğilme dayanımı

Seriler incelendiğinde; en yüksek eğilme dayanımını CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentosunun suda kürün verdiği görülmüştür. En düşük dayanımı ise deniz suyunda bekletilen numuneler vermiştir.

## Basınç Dayanımı

Basınç dayanım değerleri çimento tipine (CEM II 32.5 ve CEM II 42.5) ve kür durumuna göre basınç dayanımı değerleri Şekil 2’de verilmiştir. Değişen kür ortamına bağlı olarak, basınç dayanım değerlerinin olumlu ya da olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Seriler incelendiğinde; en yüksek basınç dayanımını CEM II 32.5 ve CEM II 42.5 çimentosunun suda kürün verdiği görülmüştür. En düşük dayanımı ise deniz suyunda bekletilen numuneler vermiştir. Deniz suyunda ve havada kür edilen numuneler yaklaşık olarak aynı değeri almıştır. Sürekli deniz suyunda kür edilen numunelerin dayanım gelişiminin hava ortamında korunan numunelere yakın değer aldığı tespit edilmiştir.

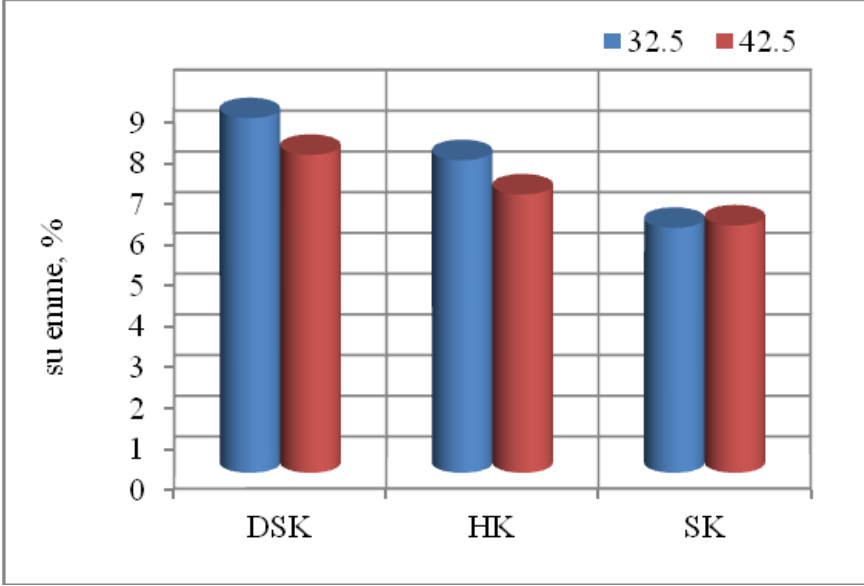


Şekil 2. Farklı kür koşullarına göre basınç dayanımı

Numunelerin buldukları kür ortamı basınç dayanımlarını etkilemiştir. Tüm numunelerde su kürü uygulanan basınç dayanımında artış en fazla olurken bunu havada kür ve tuzlu su kürü izlenmiştir. Basınç dayanımı grafiklerden de görüleceği üzere harçların 28. günlerinde elde edilen sonuçları hem kür hem de dayanım sınıfının etkisi ile açıklanabilir. Çimentoların dayanım sınıfının mekanik özellikler üzerinde önemli olduğu söylenebilir. Çimento hamurunun dayanım kazanması ve devam ettirebilmesi için ortamda su bulunmalıdır. Çimento ve su arasında meydana gelen kimyasal reaksiyona hidrasyon denir. Çimentonun prizi ve sertleşmesi hidrasyon sırasında oluşan reaksiyonlar sonucunda oluşur. Çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran C-S-H jelidir. Oluşan C-S-H’in çekim kuvveti, bağlayıcılık özelliğini kazandırmaktadır [13, 14].

### Su emme deneyi

Su emme deneyine tabi tutulan katkılı numunelerin su emme sonuçları Şekil 3`te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi su emme deneyi sonuçları incelendiğinde, farklı kür edilen numunelerin su emme oranlarında en iyi sonucu suda kür edilen numunelerde, en fazla su emme miktarı deniz suyunda kür edilen numunelerde olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Farklı kür koşullarına göre su emme.

### Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, üç farklı kür koşullarında ve iki farklı tip katkılı çimentolarla üretilen harçlarda basınç, eğilme ve su emme özellikleri ve kür etkisi incelenmiştir. Bu sebeple su içerisinde, hava ortamında korunan ve deniz suyunda kür edilen numunelerin dayanım ve dayanıklılıkları arasındaki değişim araştırılmıştır. 2 farklı çimento tipinde üretilen harçlar suda, havada ve deniz suyunda kür şartlarının etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- \* Farklı kür koşullarında ve farklı çimentoyla üretilen harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde, deniz suyunda bekletilen numunelerin kür süresi sonunda yapılan eğilme dayanımında en yüksek dayanımı CEM II 42.5 çimentolu numunelerde elde edilmiş olup bu sonuca göre çimentoların dayanım sınıfının mekanik özellikler üzerinde önemli bir faktör olduğunu söylemek mümkündür.

- \* Deniz suyunda ve havada kür edilen numuneler yaklaşık olarak aynı değeri almıştır. Sürekli deniz suyunda kür edilen numunelerin dayanım gelişiminin hava ortamında korunan numunelere yakın değer aldığı tespit edilmiştir.
- \* Kür şartları harç numunelerin basınç dayanımlarının eğilme dayanımlarına göre daha fazla etkilemiştir.
- \* Basınç ve eğilme mukavemetleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğu ve bu ilişkinin ıslak kürde havada küre göre daha kuvvetli olduğu görülmüştür.
- \* Farklı kür edilen numunelerin su emme oranlarında en iyi sonucu suda kür edilen numunelerde, en fazla su emme miktarı deniz suyunda kür edilen numunelerde olduğu görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

- [1]. Agar S. (2009). Farklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Durabiliteye Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [2]. İnan Sezer G., Yazıcı Ş. (2015). Polimer Katkılı Harçlarda Farklı Kür Koşullarının Dayanıma Etkisi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 195-201 s.
- [3]. Engin Y., Tarhan M., Aydın D. Y. Kür Koşulları Ve Süresinin Beton Numunelerin Basınç Dayanımına Etkileri, <https://www.betonvecimento.com/Wp-Content/uploads/2014/12/K%C3%9cr-Ko%C5%9eulları-Ve-S%C3%9cres%C4%B0n%C4%B0n-Beton-Numune-Basın%C3%87-Dayanımına-Etk%C4%B0ler%C4%B0.Pdf>
- [4]. Özalp F. (2016). Kür Koşulları Ve Yalıtımın Yüksek Dayanımlı Betonların Geçirimsizlik, İç-Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- [5]. Ezici M. (2016). Farklı Koşullarda Dökülen Kolonlarda Vibrasyon Ve Kür Koşullarının Değişiminin Beton Dayanıma Etkisi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- [6]. Türken H. (2010). Katkısız Ve Katkılı Betonlarda Farklı Kür Malzemelerinin Beton Basınç Dayanımına Etkisi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [7]. Özcan F., Atış C. D., Karahan O., & Bilim C. Silis dumanının ve kür şartlarının harç basınç dayanımına etkisi. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11143.pdf>
- [8]. Bakır Y. (2014) Mineral Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Dayanım Özelliklerine Kür Şartlarının Etkisi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- [9]. Yaprak H., Demir İ., Kaplan G. (2014). Cem I, Cem IIIa Ve Borlu Çimento Harçları Üzerine Farklı Agresif Koşulların Etkisi, Politeknik Dergisi, 17(1), 9-12 s.
- [10]. TS EN 197-1, (2012). Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
- [11]. TS EN 196-1, (2016). Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [12]. TS EN 12504-4, (2004). Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrases geçiş hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [13]. Ustabaş İ. (2008). Sülfat Etkisine Maruz Mineral Katkılı Beton Ve Harçların Performansının İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- [14]. Özcan F. (2005). Silis Dumanı İçeren Harç Ve Betonların Özellikleri Ve Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi

# Bölüm 21

## MADENCİLİKTE PATLATMA, ÇEVRESEL ETKİ VE İŞ GÜVENLİĞİ

*Blasting, Environmental Impact and Work  
Safety in Mining*



*Orkun KANTARCI<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> (Dr. Öğr. Üyesi); T.C. Şırnak Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, e-mail: [orkunkantarci@gmail.com](mailto:orkunkantarci@gmail.com)





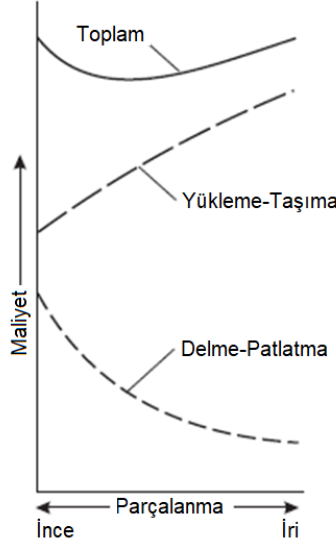
## 1. GİRİŞ

Medeniyetlerin gelişim süreçleri dikkate alındığında madencilik çok önemli bir rol oynamıştır. Hatta insanlık, çağları bile madenler ile adlandırmıştır. İnsanoğlunun bu gelişim sürecinde madenciliğin temel problemi var olan cevherlerin çıkarılması ve ayrıştırılması olmuştur. İlk dönemlerde ilkel yöntemler uygulanırken günümüzde gelişen teknoloji ve bilimsel ilerlemeler sayesinde daha gelişmiş yöntemler kullanılmaktadır.

Bu uygulamalar arasında ilk karşılaşılan problem kayaçların kazılması ve istenilen tane boyutuna getirilmesidir. Doğaya karşı verilen bir mücadele olan bu aşamada sadece mekanik yollar değil aynı zamanda farklı uygulamalarda denemişlerdir. Örneğin; parçalanmak istenilen kayaç üzerinde veya etrafında ateş yakılmış ve ısınan kaya daha sonra su dökülerek çatlatılmaya çalışılmıştır. Değişen çağla beraber insanoğlu kendi geliştirdiği metal aletler yardımıyla kayacı parçalamaya devam etmiştir. Barutun icadı ve daha sonra dinamitin geliştirilmesi ile kayaçları parçalama süreçleri kolaylaşmıştır. Sadece patlayıcı alanındaki gelişmeler değil aynı zamanda saha uygulamaları açısından büyük önem arz eden fitildeki gelişmeler de sürece paralel gitmiş ve giderek daha emniyetli patlatmaların yapılabilmesine olanak vermiştir.

Patlatma kavramı günümüzde madencilik ve inşaat sektörü için olmazsa olmaz bir uygulama haline gelmiştir. Özellikle; kaya veya kazı zeminin sertliği ve dayanımı yüksekse ve mekanik kazı yapmanın güçleştiği durumlarda patlatmalı kazı tercih edilmektedir (Bilgin, 2012). Bu alanda edinilen tecrübeler, doğru yapılan patlatma uygulamalarının maliyet konusunda birçok avantajı olduğunu göstermiştir. Özellikle malzemenin doğru parçalanması, yükleme ve taşıma maliyetleri açısından oldukça büyük önem arz etmektedir (Şekil 1).

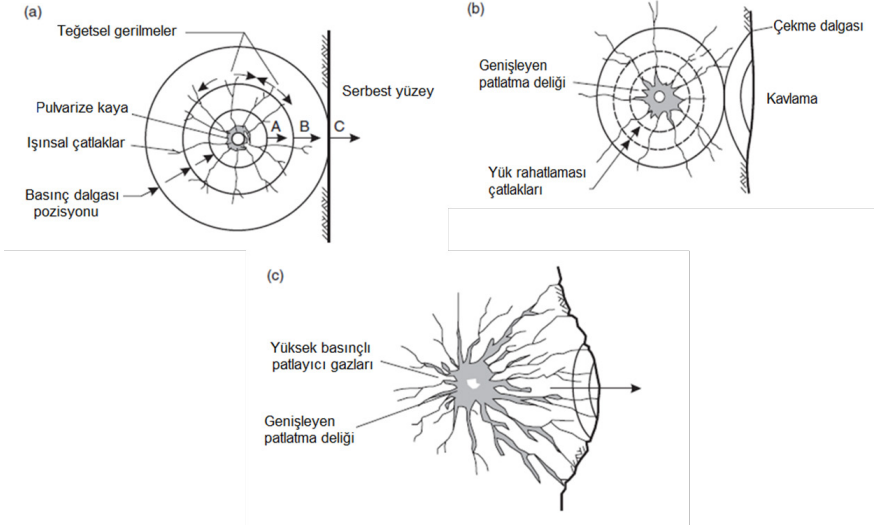
Patlayıcı ile kırılmanın oluşturulma mekanizması irdelendiğinde; sürecin birkaç aşama ile gerçekleştiği görülmektedir. İlk aşamada; patlayıcının patlaması ve onu takip eden anlık yüksek basınç ve sıcaklıkta gaz oluşumudur. Bu hızlı reaksiyon sonucu, delik içerisinde oluşan çok yüksek basınç delik cidarına enerji olarak etki eder. Bu enerji kaya kütlelerinde hızı 2000-6000 m/s olan basınç deformasyon dalgası olarak yayılır.



Şekil 1. Delme, patlatma, yükleme ve taşıma maliyetlerine parçalanmanın etkisi (Wyllie ve Mah 2004).

Patlatma, deliğin çevresinden deformasyon dalgaları halinde kaya kütlelerinde ilerler. Bunlar; kaya içerisine basınç dalgaları şeklinde yayılıp, yaklaşık olarak delik çapının iki katı mesafesi kadar kayayı basınç ile kırar (Şekil 2a). Basınç dalgası cephesi genişlerken, gerilme miktarı hızla kayanın dinamik basınç dayanımının altına düşer. Pulvarize olmuş kaya bölgesinin ötesindeki kaya, teğetsel çekme gerilmelerinin meydana gelmesine sebep olan ışınal biçiminde yayılan kuvvetli basınca maruz kalır.

Bu gerilmeler, kayanın dinamik kopma mukavemetini aştığında ışınal formda çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yayılımı patlayıcının gücü ve kayanın mukavemet özelliklerine bağlı olarak delik çapının 40-50 katına kadar ulaşabilir. Basınç dalgası kayaç içerisinden geçerken, merkezleri aynı olan kaya kabuklarının ışınal genişlemesi sonucu patlatma deliğinin hemen yakınında teğetsel yük rahatlaması çatlakları oluşur. Bu eş merkezli çatlaklar silindirik yüzeyleri takip ederler serbest yüzeye yakın birbirlerine yaklaşırlar. Basınç dalgası serbest yüzeye ulaştığında oradan çekme deformasyon dalgası şeklinde geri yansır. Eğer geri yansıyan çekme dalgaları yeterince güçlüyse, herhangi bir etkili serbest yüzeyden patlatma deliğine doğru aşamalı olarak kavrama gerçekleşir. Bunun sonucunda Kaya kütlelerinin yükü boşalır ve önceden oluşmuş radyal çatlaklar genişler (Şekil 2b). Patlayıcının yapısına özgü olarak oluşan yüksek basınçlı gazların ani hacim artışı ile bu genişleyen çatlakları doldurması ve ötelemesi ile kaya parçalarına ayrılır (Şekil 2c).



Şekil 2. Patlayıcı ile kayanın parçalanma mekanizması (Wyllie ve Mah, 2004, Kayabalı, 2006).

Kayaç üzerinden anlatılan bu mekanizma, aslında bütün malzemeler için aynı şekilde işlemektedir. Söz konusu patlatmalarda esas olan tekniğe uygun planlama ve uygulamadır. Tekniğe uygun yapılmayan işlemler, gerek iş sağlığı ve güvenliği sorunlarına gerekse çevresel sorunlara yol açmaktadır. Doğru patlatma hangi malzeme için olursa olsun doğru planlanmış, amacına uygun sonuçlar vermiş ve çevresine minimum etkisi olan patlatmadır.

## 2. Patlatmaya Etki Eden Parametreler

Patlayıcıların tarihsel gelişimi ve yasal düzenlemeler ile birlikte patlatmaya etki eden parametreler üzerinde kontrolümüz artmıştır. Fakat unutulmaması gereken husus bu parametrelerin bir kısmının kontrolünün bizde olmadığı gerçeğidir. Özellikle söz konusu doğa olduğu zaman bilinmezlik artmaktadır. Sondajlar ve alınan karot örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar bize kayaçlar ve bölge yapısı hakkında bilgi vermekte ve çalışma sahamızı tanımamıza imkân vermektedir.

Temel olarak patlatmaya; patlatma yapılacak malzemenin özellikleri, patlayıcı maddenin özellikleri ve patlatma yapılacak alandaki patlatma dizaynı etki eden parametrelerdir.

### 2.1. Patlatma yapılacak malzemenin özellikleri

Patlatılacak malzemenin özellikleri bizim kontrol edemediğimiz özelliklerdir. Çünkü patlatılması gereken yer ve malzeme, doğal oluşum olması sebebiyle kendi özgü özelliklere sahiptir. Bu nedenle; sahanın koşullarına göre düzenleme yapılmalıdır. Bu özelliklerin en önemlileri; kayanın dinamik mukavemeti, zayıflık düzlemlerinin yönelimi, kaya

kütlesinin heterojenliği ve anizotropisi, Kayanın elastik özellikleri gibi özellikler önemli rol oynamaktadır.

## 2.2. Patlayıcı maddenin özellikleri

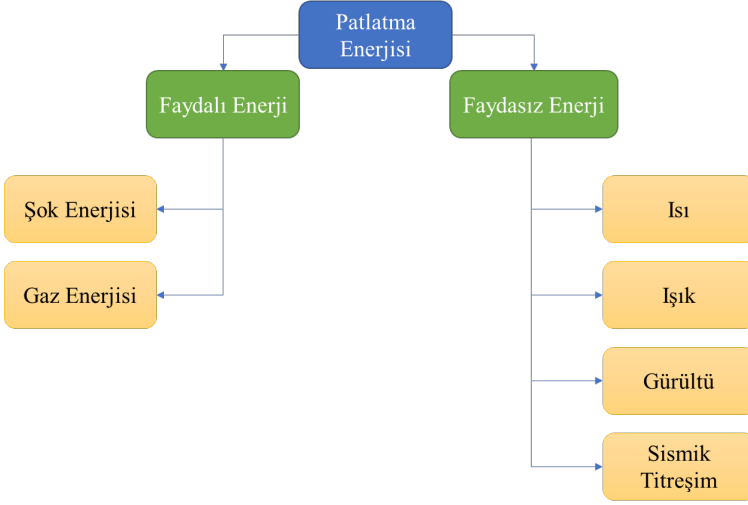
Patlayıcı özelliklerini, istediğimiz patlatma verimine göre seçmeliyiz. Amaçlanan tane boyutu ve zeminin su durumu gibi faktörler patlayıcı seçiminde etkilidir. Kuvveti ve enerjisi, detonasyon hızı, detonasyon basıncı, yoğunluk, stabilite, suya dayanıklılık ve hassasiyet gibi özellikler önemli rol oynamaktadır.

## 2.3. Patlatma yapılacak alandaki patlatma dizaynı (patern)

Gerek bölgenin yapısı gerekse de istenilen parçalanma boyutu göz önüne alınarak çevresel etkiyi azaltacak bir patlatma dizaynı yapılması gereklidir. Delik çapı, delik boyu, delik eğimi, şarj uzunluğu, sıkılama boyu, delikler arası mesafe, dilim kalınlığı, patlatmadaki gecikme miktarı ve patlatılacak alanın boyutları (yüksekliği, genişliği gibi) oldukça önemlidir.

## 2. Patlatmanın Çevresel Etkileri

Patlayıcılar askeri amaçla kullanıldıkları gibi aynı zamanda uzunca bir süredir sivil amaçlı olarak madencilik ve inşaat sektöründe de kullanılmaktadır. Gelişen medeniyet ile birlikte artan şehirleşme nedeniyle patlayıcı kullanımında yapıların ve insanların zarar görmemesi için birçok düzenlemeye gidilmiştir. Bu çerçevede patlayıcıların yüksek güçlerinin kontrol altına alınması için birtakım sınırlamalar ortaya konulmuştur. Çünkü patlayıcı enerjisinin tamamı istenilen şekilde kullanılmadığı görülmüştür. Patlatma sonucunda patlayıcıdan elde edilen enerji; gaz enerjisi ve şok enerjisi olmak üzere iki kısımda incelenir. Burada dikkat edilmesi gereken husus bu iki enerjinin hepsinin amaçlanan hedef doğrultusunda kullanılmadığıdır. Faydalı ve faydasız enerji diye adlandırılan bu durum nedeniyle çevresel etki sorunu ile karşılaşmaktadır. Çünkü kayacın parçalanması amacı ile kullanılan faydalı enerjinin dışında kalan kısım ışık, ses, ısı ve titreşim şeklinde çevreye yayılmaktadır (Şekil 3). Var olan enerjinin neredeyse %20 kadarının kayayı kırmak için kullanıldığı, arta kalan kısmında atık enerjisi formunda kendini dışa vurduğu belirlenmiştir (Dhekne, 2015).



Şekil 3. Patlatma sonucu açığa çıkan enerji türleri (Bilim ve Kekeç, 2017).

Günümüzde yapılan patlatmalar değerlendirilirken, istenilen sonuç kavramı içerisinde minimum çevresel etki kavramı da girmektedir. Çünkü madencilik faaliyeti ya da inşaat sektörü kapsamında yapılan patlatmalar, etrafındaki yapılara zarar verebilmektedir. Bu zararın meydana gelmesi için, yapıların patlatma faaliyet alanına yakın bile olmasına gerek yoktur. Tekniğe uygun yapılmayan patlatmalarda deneyimler göstermiştir ki; faydasız enerji içerisinde ki etmenler birkaç km mesafeye kadar etki etmektedir. Bu nedenle bölgede bulunan yerleşim yerleri dikkate alınmalı, halkın huzuru göz önüne alınarak yapılacak patlatmalar tetkik edilmeli ve gerekli olan ölçümler yapılarak uygun patlatma dizaynı belirlenmelidir (Kılıç ve Kahraman, 2016). Düzgün planlanmayan patlatma sonucunda, kişiler ve kişilere ait mülklerde zarar oluşmakta ve şikâyet edebilmektedirler. Bununla birlikte herhangi bir zarar olmasa bile art niyetli tazminat amaçlı yapılan şikâyetler, hatta patlatmanın varlığından ötürü psikolojik olarak zarar gören ve rahatsız olan kişiler de mevcuttur. Bu ve benzeri şikâyetlere karşı önceden yapılacak olan incelemeler süreç içerisinde gelebilecek şikâyetlerinde önünü kesmiş olacaktır.

Patlayıcıların çevreye verebilecekleri zararları genel olarak; hava şoku ve gürültü, taş savrulması, yer sarsıntısı ve toz emisyonu olarak dört başlık altında toplayabiliriz.

### 2.1. Hava şoku ve gürültü

Patlatma bir kimyasal reaksiyon olup ani gaz hacminde artışa sebep olmaktadır. Bu esnada bazen bölgenin yapısı gereği patlatma gazı, çatlaklar vasıtası ile atmosfere taşınır ve gürültüye sebep olur. Eğer gerekli önlemler alınmazsa oluşan gürültü yüksek boyutlara ulaşarak hava şoku dalgaları oluşturur. Bu dalgalar ses dalgası gibi yayılır. Normal şartlar

altında bu dalgalar; yapılara zarar vermez, nadiren pencerelerde kırılmaya yol açarlar. Fakat yapının özelliği, görebileceği zararın boyutunu etkiler. Aynı zamanda bu dalgaların yayılımında rüzgârın yönü, hızı ve o günkü hava sıcaklığı gibi koşullarda etkilidir. Tablo 1’de hava şoku seviyelerinin çevresel etkileri yer almaktadır.

*Tablo 1. Hava şoku seviyelerinin çevresel etkisi (Hüdaverdi ve Kuzu, 2005)*

Ses Şiddeti (dB)	Ses Basıncı (Psi)	Oluşabilecek Risk
180	3,0	Binalarda hasar
170	0,95	Pencere camlarının çoğu kırılır
160	0,30	
150	0,095	Bazı pencere camı kırılmaları
140	0,030	Ani ses için maksimum seviye
128	0,0070	Emniyetli seviye
120	0,0030	Rahatsız edici sürekli ses 15 dakika süreli şok dalgaları halinde şikayetler
110	0,0095	
100	0,00030	
90	0,000095	8 saatlik sürekli seste rahatsız olma
80	0,000030	

İnsanoğlunun duyma eşiği 20 Hz - 20 kHz arasındadır. Hava şok dalgaları geniş bir frekans aralığına sahip olsa da genellikle 0,1 Hz ve 200 Hz arasındadır. 20 Hz’in üzerine çıkan şok dalgaları duyulabilirken 20 Hz’in altındaki ses dalgaları duyulamaz. Daha düşük ve duyulamayan frekanslar, yüksek ve işitilebilir frekanslardan daha yavaş sönümlenir. Ayrıca, daha büyük mesafelerde basınca neden olur. Bu düşük frekanslar zaman zaman yapılara doğrudan zarar verebilir ancak çoğunlukla yüksek frekans titreşimleri kapılarda ve pencerelerde gürültü olarak hissedilir (Olofsson, 1990).

Hava şokunun hangi mesafeye etki edeceğini hesaplamak için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılır (Calzia, 1969);

$$\text{Şiddetli Etki Zonu} = D < 5\sqrt{W_T} \quad (1)$$

$$\text{Orta Şiddette Etki Zonu} = 5\sqrt{W_T} < D < 10\sqrt{W_T} \quad (2)$$

$$\text{Hafif Şiddette Etki Zonu} = 10\sqrt{W_T} < D < 15\sqrt{W_T} \quad (3)$$

Burada;

D : Etkili zon aralığı (m)

$W_T$  : Bir gecikme aralığında kullanılan patlayıcı madde miktarı (anlık şarj) kg’dır.

## 2.2. Taş savrulması

Hava şokunu yaratan problem aynı zamanda kaya fırlaması sorununu da yaratmaktadır. Patlatmanın mekanizması gereği reaksiyon sonucu oluşan şok enerjisinin kırdığı kayaç boşluklarını gaz doldurur ve itki oluşturur. Bu esnada gazın basıncı ile kayaç parçaları bulunduğu yerden ayrılır ve uzağa fırlar (Şekil 4). Bu durum; formasyonun yapısının iyi analiz edilmemesi, iyi dizayn edilmemiş patlatma ve yetersiz sıkılama malzemesi gibi sebeplerden dolayı ortaya çıkabilir. Günümüzde; Lundborg'un (1973) önerdiği parçacık mesafe hesabı halen kullanılmaktadır.

$$L_m = 260xd^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

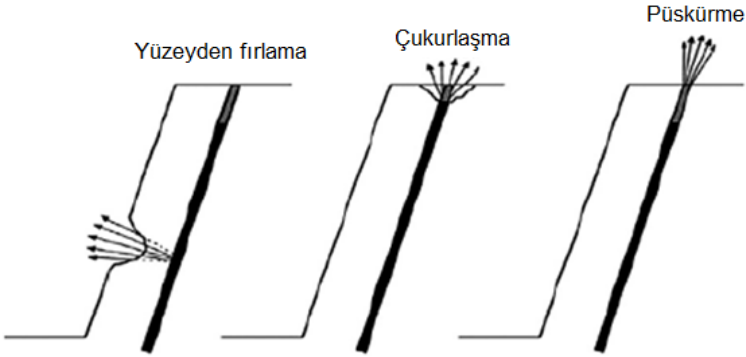
$$T_b = 0.1xd^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

Burada;

$L_m$  : Maksimum taş savrulma (fırlama) mesafesi (m),

$T_b$  : Patlatma nedeniyle fırlayan taş boyutu (m)

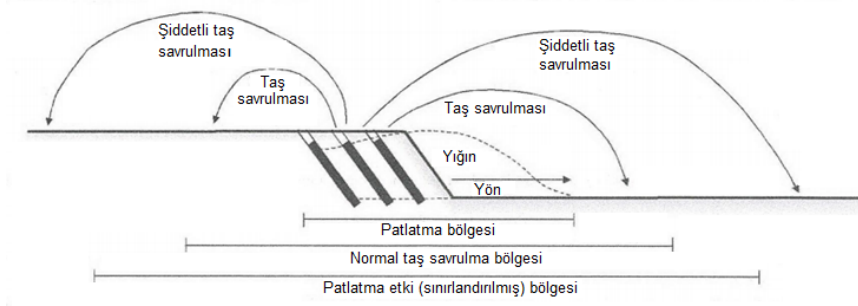
$d$  : Delik çapı (inç)



Şekil 4. Açık maden işletmelerinde kaya fırlaması mekanizması (Dhekne, 2015).

Bir başka deyişle; faydalı enerji kaya içerisinde iyi hapsedilmezse yani süreksizlikler iyi incelenmemiş ise bu durum ortaya çıkabilmektedir. Bu durumla ilgili terminoloji Şekil 5'te verilmiştir.





Şekil 5. Kaya fırlaması terminolojisi (Little, 2007)

Kaya fırlamasına karşın; galeri patlatması yapılmaması, uygun miktarda sıkılama yapılması, gecikmeli kapsül kullanımı ve uygun bir patern ile homojen delik dağılımı yapılarak önlemler alınabilir.

### 2.3. Toz emisyonu

Patlamanın yarattığı şok dalgası ve daha sonra gazın çatlaklardan ilerleyişi esnasında toz üretilmiş olur. Bu toz miktarı, sürekliliği olmayan ve rüzgâr olmaksızın çok geniş alanlara yayılmadan hemen olduğu yere çökmektedir. Toz emisyonu kütleli debi hesaplamalarında kullanılacak emisyon faktörleri, Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği'nde verilmiştir (Tablo 2). Alınabilecek önlem olarak, su fıskiyesi sistemi kurularak toz bastırma yapılabilmektedir. Nizami yapılan patlatma uygulamalarında toz emisyonu da düşmektedir.

Tablo 2. Toz Emisyonu Kütleli Debi Hesaplamalarında Kullanılacak Emisyon Faktörleri

Kaynaklar	KontROLSÜZ	KONTROLLÜ	Birim
Patlatma	0,080	-	
Sökme	0,025	0,0125	
Yükleme	0,010	0,005	
Boşaltma	0,010	0,005	kg/ton
Birincil Kırıcı	0,243	0,0243	
İkincil Kırıcı	0,585	0,0585	
Üçüncül Kırıcı	0,585	0,0585	
Nakliye (gidiş-dönüş toplam mesafesi)	0,7	0,35	kg/km-araç
Depolama	5,8	2,9	kg toz/ha gün

### 2.4. Yer sarsıntısı

Faydasız enerji altında bulunan yer sarsıntısı, patlatma sonucu oluşan şok dalgasının bir ürünü olarak formasyon içerisinde ilerler. Mesafe arttıkça, sönmülenen bu titreşim dalgaları farklı parçacık hızlarına sahip olabilmektedir. Burada önemli olan sarsıntı için harcanan enerjinin



getirmişlerdir. Bizim ülkemizde Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği kapsamında titreşimle ilgili sınırlamalar belirlenmiştir. Bu çerçevede ilgili yönetmeliğin Ek-VIII'de yer alan Tablo-6' da verilen sınır değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Parçacık hızının belirlenmesinde çeşitli araştırmacılar tahminin modelleri oluşturmuşlardır. Bu modellerde anlık patlayıcı miktarı ve mesafeye bağlı olarak titreşimlerin yayılması açıklanmaya çalışılmıştır. Patlatmanın sebep olduğu çevresel titreşim parçacık hızlarının deneysel olarak tahmini için birçok çalışma mevcuttur. Bunlar içerisinde geçerliliği ortaya konulmuş en yaygın kullanımı olan USBM (Duvall ve Fogelson, 1962) eşitliğidir (6) (Karakuş vd., 2018).

*Tablo 3: Maden ve Taş Ocakları ile Benzeri Alanlarda Patlama Nedeniyle Oluşacak Zemin Titreşimlerinin İzin Verilen En Yüksek Değerleri*

Titreşim Frekansı (Hz)	İzin Verilen En Yüksek Titreşim Hızı (Tepe Değeri-mm/s)
1	5
4-10	19
30-100	50

(1 Hz- 4 Hz arasında 5 mm/s'den 19 mm/s'ye; 10 Hz- 30 Hz arasında 19 mm/s'den 50 mm/s'ye, logaritmik çizilen grafikte doğrusal olarak yükselmektedir)

$$PPV = K \left( \frac{R}{\sqrt{W}} \right)^{-\beta} \quad (6)$$

Burada;

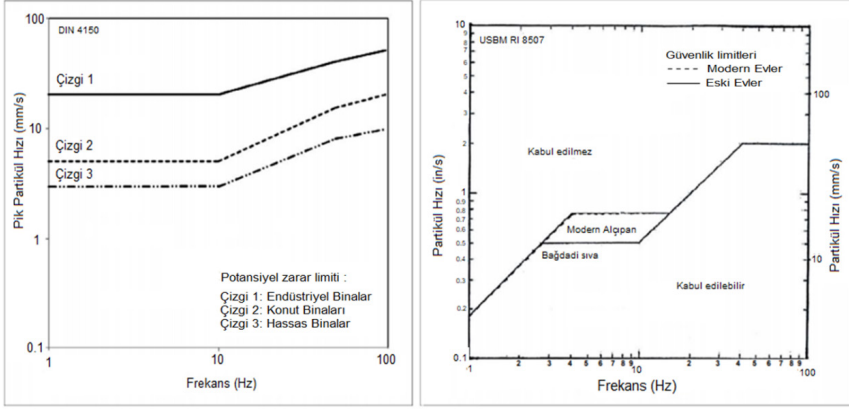
PPV : Maksimum parçacık hızı (mm/s)

R: Mesafe (m)

W: Gecikme başına düşen (anlık) maksimum patlayıcı miktarı (Kg)

K,  $\beta$ : saha sabitleridir.

Ülkemizdeki sınırlamalar olduğu gibi dünyada da bu konuda baz alınan iki standart bulunmaktadır. Bunlar Almanya DIN 4150 ve Amerikan USBM RI 8507 standartlarıdır. Bu standartlara göre sınırlamalar Şekil 7'de verilmiştir



Şekil 7. Almanya DIN 4150 ve Amerikan USBM RI 8507 standartları

### 3. Patlatma Uygulamalarında İş Sağlığı ve Güvenliği

Geçmişten bugüne patlatma kaynaklı kazaların çoğunlukla küçük ihmal ve dikkatsizliklerden kaynaklanmıştır. Fakat bu küçük dikkatsizlikler, hatalar ve ihmaller ne yazık ki dönüşü olmayan büyük kayıplara neden olmaktadır. Patlatma uygulamalarının doğru yapılması, kurallara uyulması patlatma kaynaklı olası kazaları önlemede önemlidir. Bu nedenle, madencilikte patlatma işlemlerinde kullanılan patlayıcı maddelerin temini ile başlayarak nakli, depolanması ve kullanımı sırasında önlem ve tedbirlerin alınması önem arz etmektedir. (ÇSGB, 2009; Bilgin, 2012; Alpaydın vd., 2012).

“Tekel dışı bırakılan patlayıcı maddelerle av malzemesi ve benzerlerinin üretimi, ithali, taşınması, saklanması, depolanması, satışı, kullanılması, yok edilmesi, denetlenmesi usul ve esasları” na ilişkin 29.09.1987 tarih ve 19589 sayılı Resmî Gazetede yayınlanan 87/12028 karar sayılı Tüzük hükümlerince patlayıcı maddelerin kullanımlarında, taşıma ve depolanmalarında gerekli usullere uyulmalıdır.

#### 4.1. Patlatma Öncesinde Patlayıcı Maddelerin Kullanılmasında Alınacak Önlemler

##### a) Patlayıcı maddelerin taşınmasında kara yollarının kullanımı

- Patlayıcıların fabrikadan, satıldığı yerden veya depolardan başka bir yere taşınması durumunda taşıma izin belgesi alınması gereklidir.
- Patlatma sahasına patlayıcı maddelerin depodan taşınmasında yol güzergahının şirket mülkiyeti dışında kalması durumunda, patlayıcı maddelerin nakliyesi ilgili mevzuat hükümleri yerine getirilerek güvenlik makamlarından mutlaka gerekli olan yol izni onayı alınmalıdır.

- 300 kg'dan fazla patlayıcı madde taşınması durumunda taşıma işlemi gerekli malumat ve tecrübeye sahip ehil bir kişinin nezaretinde yapılmalıdır.
- Kapalı araçlarla taşıma yapılması tercih edilse de; kasası sağlam, metal kısmı bulunmayan, kenarları yüklenecek patlayıcı madde sandık boyundan yüksek olacak şekilde stoklama yapılmasına imkan veren üstü açık araçlarda (pikap, kamyonet gibi) taşıma yapılabilir.
- Üstü kapalı taşıtlarla taşımada araç kapısı arkadan kilitlenmeli, üstü açık olan taşıtlarla taşımada ise araç üstü branda beziyle iyice örtülmüş olmalıdır.
- Olası yangın durumuna karşın patlayıcı madde taşıyacak motorlu araçlarda kullanıma uygun özelliklere sahip, her an çalışabilir en az iki adet yangın söndürme ekipmanı bulunmalıdır.
- Taşıyıcı araçlarda uygun uyarı levhaları bulunmalıdır.
- Araç bakımları patlayıcı madde olmadan, boşken yapılmalıdır.
- Patlayıcı dolu taşıyıcı araç asla yalnız bırakılmamalıdır.
- Patlayıcı taşıyan aracın seyri ve durması sırasında, yüklenme ve boşaltılma esnasında taşıtın içinde veya yakınında asla sigara vb. içilmemeli, ateş yakılmamalı ve kıvılcım çıkaran maddeler kullanılmamalıdır.
- Patlayıcı maddeler dışında yolcu, hayvan veya başka bir eşya patlayıcı madde ile bir arada taşınmamalıdır.
- Kapsüller, dinamitler ve barutlar aynı taşıtta asla bir yerde ve bir arada taşınmamalıdır.
- Patlayıcı yüklenecek taşıt içinde ambalajlar; sıkışmayacak, sarsılmayacak, sıçramayacak, yuvarlanmayacak ve çarpılmayacak biçimde yerleştirilmeli ve nemlenmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır.
- Taşıma araçlarına patlayıcı maddeleri yükleme ve boşaltma işlemi gündüz yapılmalı, fakat gerekli güvenlik önlemleri tamamlanarak ve çevrenin elektrikle aydınlatılması sağlanarak geceleri de yapılabilir.
- Patlayıcı madde taşımacılığı yapan kişiler; güvenilir, dikkatli, fiziksel ve ruhsal sağlığı iyi, patlayıcı madde ve taşınması konusunda eğitilmiş kişilerden olmalıdır.
- Yükleme ve taşıma esnasında patlayıcı maddelerin paketlerinden dökülmesi durumunda, araç en kısa sürede durdurulmalı ve güvenli bir alana paketler indirilmelidir. Sonrasında araç içinde ve yolda bulunan patlayıcı maddeler gerekli önlem ve temizleme usulleri dikkate alınarak ortadan kaldırılmalıdır. Paketler; onarım, temizleme ve güvenlik önlemleri alındıktan sonra tekrar araca yüklenebilir.

### b) Patlayıcı maddeler için depo ve depolanması

Maden işletmelerinde kullanılmak üzere patlayıcı madde muhafaza ve depolama ruhsatı İçişleri Bakanlığından alınarak, patlayıcı maddeler yeraltı ve yerüstü patlayıcı madde depolarında koruma altına alınırlar. Depolar; yangına dayanıklı, nem geçirmeyen, havalandırması iyi, kurşun geçirmeyen, tüzüğe uygun inşa edilmiş, emniyetli ve sadece patlayıcı madde depolanması amacıyla kullanılan kapalı alanlardır. Genel olarak;

- Depolar; çalışılan alanlara, ana havalandırma yollarına ve yollara zarar vermeyecek uzaklıkta yapılmalıdır.
- Depoda izin verilen patlayıcı madde miktarından çok patlayıcı madde bulundurulamaz.
- Depoda patlayıcı maddeler ve kapsüller kesinlikle ayrı bölümlerde muhafaza edilmelidir.
- Nem ve su almaması için gerekli tedbirler alınmalıdır.
- Depo etrafına gerekli emniyet ikaz levhaları asılmalıdır.
- Görevli olan ehil kişiler dışında kimse sokulmamalıdır.
- Görevliler statik elektrik oluşturabilecek, elektrik iletimine neden olabilecek metal eşya veya kıyafetler kullanmamalıdır.
- Depo kapılarında ve girişinde statik elektriğe karşı topraklanmış uygun özelliklere sahip levhalar konur.
- Depodan patlayıcı madde taşımaya elverişli olmayan araçlara yükleme yapılmamalıdır.
- Depo 24 saat kesintisiz bekçi/silahlı güvenlik tarafından korunmalıdır. Gerekli görüldüğü durumlarda köpek de bulundurulabilir.
- Patlayıcı maddelerin depolara konulması veya alınması gündüz yapılmalıdır. Zorunlu durumlarda ise açık alevli aydınlatma dışında sabit elektrik tesisatı, pilli el lambaları gibi aydınlatma ekipmanı ya da tertibatı kullanılmalıdır.
- Her gün alınan, satılan ve halen depoda bulunan patlayıcı madde miktarının kayıt altında tutulduğu noter onaylı patlayıcı kayıt defteri bulundurulmalıdır.
- Depo etrafında kolayca tutuşabilecek maddeler kesinlikle bulunmamalıdır.
- Depo ile ilgili personele yangın ile mücadele konusunda eğitim verilmelidir.
- Depo içinde ve/veya dışında sigara ve benzerleri içilmemeli, ateş yakılmamalı ve kıvılcım çıkaran maddeler asla kullanılmamalıdır.

- Depo çevresine tehlikeli bölge olduğunu belirtir uyarı levhaları konulmalıdır.

*Yeraltı depolarında bulunması gereken özellikler*

- Patlayıcı madde deposu yeraltında ve ocak içinde, ya da bir yamaçta galeri oluşturularak da yapılabilir.
- Yeraltında havalandırması bağımsız şekilde yapılmalıdır.
- Depo içi sıcaklık 25 dereceyi geçmemelidir.
- Uygun yerlere oyuk ve boşluklar oluşturularak patlama etkisi azaltılabilir.

*Yerüstü depolarında bulunması gereken özellikler*

- Depo duvarları; düzgün, sızdırmaz, çatlak ve yarık bulunmayan, herhangi bir nesnenin çarpmasıyla kıvılcım oluşturmayan, kolay temizlenebilen tüzüğe uygun malzemenen yapılmalıdır.
- Depo pencereleri; demir parmaklıklı, çatıya yakın yükseklikte ve güneş ışınlarını doğrudan almayacak şekilde olmalıdır.
- Depo iç kapıları tahtadan, dış kapıları ise sağlam saç malzemenen ve dışarıya açılır olmalıdır.
- Yıldırıma karşı koruyucu önlemler alınmalıdır.
- Depo çevresinden kolay tutuşabilecek kuru ot gibi malzemeler bulunmamalıdır ve temizlenmelidir.
- Su baskınına karşı bina etrafına kanallar açılmalı, yağmur olukları sıklıklar kontrol edilerek çalışır durumda olmaları sağlanmalıdır.

**c) Patlayıcı maddelerin kullanıma hazırlanması**

- Patlayıcı maddeler; teknik/daimi nezaretçi tarafından görevlendirilmiş, ateşleyici yeterlilik belgesine sahip kişiler (ateşleyici) tarafından alınmalı, hazırlanmalı ve ateşlenmelidir.
- Depodan ateşleyici tarafından alınan patlayıcı miktarı depo sorumlusu tarafından patlayıcı kayıt defterinde kayıt altına alınmalıdır.
- Patlayıcı madde asla iş yeri dışına çıkarılmamalı, kullanılmamalı ve kullanımına izin verilmemelidir.
- Patlayıcı malzemeler, tahtadan veya uygun özelliklere sahip yalıtkan malzemenen yapılmış iki bölmeli ve kilitlemeli sandıkla ateşleyici tarafından teslim alınmalıdır.
- Ateşleyicinin girip çıkması zor olan alanlara patlayıcı ile girebilmesi için uygun özelliklere sahip küçük sandık yapılıp kullanılmalıdır.
- Maksimum taşınabilir patlayıcı miktarı 10 kg/kişi'dir.

## 4.2. Patlatma Alanında Patlayıcı Maddelerin Kullanılmasında Alınacak Önlemler

### a) Şarj (Doldurma) öncesi alınması gereken önlemler

- Patlatma yapılacak arazide emniyet mesafesi alanında arızalı makine ( dozer, yükleyici, greyder vb.) ve araç asla olmamalıdır.
- Gerekli emniyet alanı içerisinde veya yakınında patlatmadan etkilenebilecek teçhizat veya ekipman (elektrik trafosu, su pompası, iş makinelerinin elektrik kabloları, su boruları vb.) varsa gerekli yetkililere bildirilmeli ve tehlikeli durum kesinlikle giderildikten ya da önlem alındıktan sonra şarja başlanmalıdır.
- Grup içerisindeki deliciler şarjlama işlemine başlamadan önce çıkartılmalı, emniyet mesafesi dışına çıktıktan sonra şarj işlemi yapılmalıdır.
- Özellikle kömürlü ara kesmelerin bulunduğu bölgelerde delinen deliklerdeki yangınlara dikkat edilmeli ve bu gibi deliklere şarj yapılmamalıdır.
- Havanın durumuna göre ateşleme sistemi belirlenmeli, gök gürültülü ve yağışlı havalarda elektrikli ateşleme sistemleri kullanılmamalıdır.
- Patlayıcı madde taşıyan araçlarda ve şarj işlemi yapılan bölgelerde kesinlikle yanıcı ve parlayıcı malzemeler (kibrit, çakmak, sigara vb.) olmamalıdır.
- Ateşleyici, patlatma sahasına olan tüm giriş ve çıkışlara görevli yerleştirerek gerekli uygulama talimatlarını vermelidir.
- Patlatma sorumlusunun kendisi bölgeyi ve çevreyi araştırmalı, var olan kişilerin emniyetli yerlere girmelerini sağlamalıdır.
- Patlatma alanı çevresindeki patlatmadan etkilenebilecek yakın çevredeki köylere uygulamanın yapılacağı tarih ve saat kesinlikle bildirmelidir.
- Ateşleme sahasına yetkililerden başkası kesinlikle girmemelidir.
- Şarj öncesinde patlatma sahası gözle görülebilecek göstergelerle (bayrak, huni vb.) işaretlenmelidir.

### b) Şarj (Doldurma) sırasında alınması gereken önlemler

- Patlatma ekibi içerisinde yanıcı ve parlayıcı maddeler (kibrit, çakmak vb.), manyetik alan yaratan cihazlar (cep telefonu, telsiz vb.) sokulmamalıdır.
- Ateşleme yapanların vücudunda statik elektrik oluşumuna neden olabilecek kıyafet veya eşya (naylon, yün, lastik gibi) bulunmamalıdır.



- Doldurma işleminde saha içerisinde görevliler dışında kimse olmamalıdır.
- Deliklerin doldurulması iyi planlanmalı ve patlatma konusunda eğitilmiş kişiler tarafından yapılmalıdır.
- Patlayıcı ve delik doldurulan bölgede kesinlikle yanıcı ve parlayıcı malzemeler (kibrit, çakmak, sigara vb.) olmamalıdır.
- Patlayıcı maddeler delik yanına dağıtılırken dikkatli bir şekilde sarsma, çarpma ve atma olmadan yapılmalıdır.
- Doldurma esnasında kişisel koruyucu ekipmanlar (baret, çelik uçlu, anti statik bot, gözlük, mevsime ve işe uygun kıyafet, eldiven ve kulak koruyucular) amacına uygun ve doğru bir şekilde kullanılmalıdır.
- Patlayıcı ve deliklerin zarar görmemesi için şarj araçları ve patlayıcı nakil araçlarının kontrolüne dikkat edilmelidir.
- Delikler olası taş tıkanmasına karşın kontrol edilmeli, delik ağzı çevresinde bulunan gevşek taşlar temizlenmelidir.
- Delikler planlandıktan fazla delinmiş ise delikten çıkan kırıntılar delik tabanını doğru seviyeye çekme için kullanılabilir. Fazla doldurma durumunda şarj kolunu aşırı patlayıcı ile yükleneceğinden ve sıkılama boy mesafesi azalacağından taş savrulmasına neden olacaktır. Bu neden delik boyları kontrol edilmelidir.
- İlk sıkılama yavaş, diğer kalan kısmı ise daha kuvvetli olacak şekilde yapılmalıdır. Fazla sıkılama patlatma şiddetini azaltacağından kontrollü yapılmalıdır.
- Şarj esnasında çevre emniyet açısından sık sık kontrol edilmeli, yakında park halinde bulunan araç, kamyon vs. emniyet alanı dışına çıkartılmamalıdır.
- Şarj işlemi devam ederken bağlantılar yapılmamalıdır.
- Ateşleme yapılacağı sırada kapsüller dinamit lokumlarına yerleştirilmelidir. Fital ve adi kapsül ile yapılan ateşlemelerde, fitilin kapsüle girecek şekilde uygun olarak kesilmeli ve patlayıcı maddeye teması sağlanmalıdır. Uygun ekipman ile sıkıştırılmalıdır.

Dynamite kapsülü yerleştirmek için hafif bası ile kapsülün metal kısmı içerisine tamamen sokulmalıdır. İnfilaklı fitil kullanılacaksa zarar görmemesine dikkat edilmeli, kıvrılarak bükülmemelidir. Kapsül ile infilaklı fitili arasındaki bağlantı bantla ya da üretici firmanın önerdiği şekilde yapılmalıdır.

- Sıkılama esnasında sulu delikler için gerek görülmesi durumunda taş folyosu kullanılarak iyi bir sıkılama yapılmalıdır. Ateşleme öncesi delikler iyi bir sıkılama olup olmadığının belirlenmesi için kontrol edilmelidir.

- Elektrikli ateşlemede kablo bağlantı yerlerinin su ile temas etmemesine dikkat edilmelidir. Gerekirse izolasyon malzemesi (bant gibi) ile izole edilmelidir.
- Ateşleme kablosunun makinelere, enerji ileten kabloları veya diğer enerji hatlarına değmemesine dikkat edilmelidir.

### **c) Patlatma sırasında alınması gereken önlemler**

- Tüm deliklerin şarj ve sıkılama işlemleri tamamlandıktan sonra üst bağlantıları yapılır. Mümkün olduğunca tek kişi üst bağlantıları yapmalı ve en son kontrol etmelidir.
- Hangi tür sistemde patlatma yapılırsa yapılsın, en son tüm delikler ve bağlantılar (unutulmuş delik, hatalı bağlantı gibi durumlarına karşın) mutlaka kontrol edilmelidir.
- Üst bağlantılar tüm yardımcı elemanlar, şarj araçları ve diğer ekipmanların çıkarılmasından sonra yapılmalıdır.
- Ateşleme öncesinde tüm çevre tekrar kontrol edilerek güvenlik önlemleri alınmalıdır.
- Ateşleme kablosu, ateşlemeyi yapacak kişinin mümkün mertebe kendini koruyabileceği emniyet mesafesinden az uzunlukta olmamalıdır.
- Ateşleyici nöbetçilerin emniyet ve önlemleri almasından sonra onaylarını takiben ateşlemeyi yapmalıdır.
- Patlatma öncesinde yakın çevre ve çalışanlar siren çalınarak uyarılmalıdır.
- Patlatma yüksek kotta yapıldığında alt kotta çalışanlar veya bulunanlar taş yuvarlanma tehlikesine karşın uyarılarak güvenlik tedbirleri alınmalıdır.
- Emniyet mesafesi dışında kalmasına rağmen titreşim problemi nedeniyle etkilenebilecek yerlerde (bina, ev, iş yeri, atölye vs.) çalışanlara haber verilerek olası kazalar önlenmiş olur.
- Olası taş fırlamalarına karşın çalışanlar sütre (koruyucu engel) oluşturup korunmalıdır.
- Patlatma sonrası patlamayan lağım bulunması veya şüphe duyulması durumunda fitil ile ateşlemeden en az bir saat, elektrik ile ateşlemeden beş dakika geçmeden patlatma yapılan bölgeye kesinlikle girilmemelidir.
- Ateşleyici, patlatma bölgesini dolaşarak gerekli kontrolleri yapmalıdır. Emniyetsiz durumlarda (patlamamış patlayıcı madde olması gibi) gerekli görmesi durumunda çalışmayı kesinlikle durdurmalıdır.
- Nöbetçiler ateşleyiciden onay almadan patlatma bölgesine girmemelidir.

## 5. Sonuç ve Değerlendirme

Günümüzde; madencilik faaliyetlerinde kayaçların parçalanmasında patlatma işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Patlatmanın etkin ve verimli bir şekilde yapılabilmesi için patlatma alanı malzeme özelliği, patlatma dizaynı ve kullanılacak patlayıcı madde özellikleri önemlidir. Aksi takdirde patlatma uygulamalarında; gerek tekniğe ve mühendisliğe uygun olmayan patlatma yapılması gerekse kontrol edilemeyen faktörlerden (kayacın dayanımı, mukavemeti, süresizliği gibi) kaynaklı çevreyi ve insanları etkileyen istenmeyen olumsuzluklar oluşmaktadır. Patlatma kaynaklı kazalar incelendiğinde; küçük ihmallerden ve dikkatsizliklerden kaynaklanan kazaların meydana geldiği belirlenmiştir. Bu nedenle, patlatma uygulamaları öncesinde, esnasında ve sonrasında iş güvenliği önlem ve tedbirlerinin alınması önem arz etmektedir.

**KAYNAKÇA**

- Alpaydın, E., Alpsar, M., Elmacı, E., Halıcılar, G., İnal, H.S., İşcen, H.İ., Özkazanç, M.O., Patır, O., 2012, Patlayıcı maddeler ve patlatma teknikleri, NitroMak-DNX Kimya Sanayii A.Ş., Ankara.
- Bilgin, H.A., 2012, Açık Ocak ve Taş Ocaklarında Patlatma, Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı, Editörler: Eskikaya, Ş., Karpuz, C., Hindistan, M.A., Tamzok, N., 3.Baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.
- Bilim, N. ve Kekeç, B., 2017, Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler ve Önlenmesi İçin Alınması Gereken Tedbirler, ISME2017, 27-29 Eylül, Bodrum / TURKEY.
- Calzia, J., 1969, Les substances explosives at levis nuisances, Dunod ed., Paris.
- ÇSGB, 2009. Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi, ÇSGB İş Teftiş Kurulu Başkanlığı Yayını, Y. No: 43. Ankara.
- Dhekne, P.Y., 2015, Environmental Impacts of Rock Blasting and Their Mitigation, International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences (IJCEBS) Volume 3, Issue 1, ISSN 2320-4087 (Online).
- DIN 4150, 1999, Structural vibration in buildings, Part 3: Effects on structures, German Standards Organization (GSO), Berlin, Germany.
- Duvall, W.I. ve Fogleson, D.E., 1962, Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibration, USBM-I 5968.
- Erkoç, Ö.Y., 1990, Kaya Patlatma Tekniği, Çeliker Matbaacılık, İstanbul.
- Hüdaverdi, T. ve Kuzu, C., 2005, Madencilik Faaliyetlerinde Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkilerin Ölçülmesi ve Analizi, Madencilik ve Çevre Sempozyumu, 5-6 Mayıs, Ankara
- Karakuş, D., 2010, Patlatmadan Kaynaklanan Titreşimlerin Yönel Değişiminin Araştırılması, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 12, Sayı:2.
- Karakuş, D., Öngen, T., Özdoğan, M.V., Yenice, H., Deliormanlı, A.H., İkiz, U., 2018, Şehir İçi Patlatmalı Kazı Çalışmalarında Çevresel Titreşim Limitlerine Göre Patlatma Tasarımı, Madencilik, Özel Sayı, 23-30.
- Kayabalı, K., 2006, Kaya Şev Mühendisliği, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Kılıç, A.M. ve Kahraman, E., 2016, Patlatmadan Kaynaklı Çevresel Etkilerin İncelenmesi ve Uygulamaya İlişkin Bir Örnek, 8.Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13-14 Ekim, Kütahya-Türkiye
- Little, T.N., 2007, Flyrock Risk, AUSIMM Conference Proceedings, EXPLO Conference, Wollongong, NSW, September, pp 35-43.
- Lundborg, N., 1973, The Calculation of Maximum Throw During Blasting, SveDeFo Rep., DS 1973:4.

- Monroe, J.S., Wicander, R., Hazlett, R., 2007, *Physical Geology: Exploring the Earth*, 6th Edition, Thomson Brooks/Cole, ISBN 0-495-01148-7.
- Olofsson S.O., 1990, *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Applex, Sweden, s. 237-238.
- USBM RI 8507, 2009, *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*, Report No. RI 8507, Washington, USA.
- Wyllie, D.C. ve Mah, C.W., 2004, *Rock Slope Engineering, Civil and Mining*, Fourth Edition, SPON Press, Madison, New York.
- 04.06.2010 tarih ve 27601 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi Ve Yönetimi Yönetmeliği”,
- 03.07.2009 tarih ve 27277 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan “Sanayi Kaynaklı Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği”,
- 29.09.1987 tarih ve 19589 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan 87/12028 karar sayılı “Tekel dışı bırakılan patlayıcı maddelerle av malzemesi ve benzerlerinin üretimi, ithali, taşınması, saklanması, depolanması, satışı, kullanılması, yok edilmesi, denetlenmesi usul ve esasları” na ilişkin tüzük.

# Bölüm 22

## **KURŞUN İYONLARININ SULU ÇÖZELTİLERDEN *FICUS CARICA* L.-ZEOLİT- ALJİNAT BİYOKOMPOZİTİYLE UZAKLAŞTIRILMASI**



***Kadriye ESEN ERDEN<sup>1</sup>,  
İbrahim DORUK<sup>2</sup>,  
Meruyert KAYGUSUZ<sup>3</sup>,  
Cem GÖK<sup>4</sup>***

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kocaeli Üniversitesi, Uzunçiftlik Nuh Çimento Meslek Yüksekokulu, kadriye.erden@kocaeli.edu.tr

2 Dr. Öğr. Üyesi, Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın meslek Yüksekokulu, idoruk@gmail.com

3 Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, meruyertk@pau.edu.tr

4 Prof. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Müh. Böl., cemgok@pau.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Ağır metaller arasında kurşun, metal kaplama, seramik, kurşun izabesi, elektrokaplama, madencilik ve pil imalat sanayilerinden çevreye deşarj edilen başlıca kirlilik kaynaklarından biridir (Isaak et al., 1997). Buna ek olarak, en iyi renk eşleşmesi ve apreysi sağlamak için tekstil ve deri endüstrileri, çoğunlukla kurşun ve kadmiyum içeren pigmentleri yaygın olarak kullanmaktadır (Koizhaiganova Kaygusuz et al., 2017). Kurşun, öncelikli bir kirlenici olarak kabul edilen, iyi bilinen oldukça toksik bir metaldir (Mondal, 2009). Çevrede düşük seviyelerde bile kurşun varlığı, insanlar ve ekosistem için uzun vadeli sağlık risklerine neden olabilir. Bu nedenle kurşun iyonlarının çevreye sızdırılmasından önce uzaklaştırılması gerekmektedir.

Kirlenmiş sulardan ağır metallerin uzaklaştırılması, kimyasal çöktürme, iyon değiştirme, membran filtrasyon, ters ozmoz, vb. çok çeşitli yöntemler kullanılarak araştırılmıştır. Bahsi geçen yöntemlerin pahalı olmasından dolayı, metal iyonlarının giderilmesi için en umut verici alternatif yöntem adsorpsiyondur. Ağır metallerin adsorpsiyonu için hem düşük maliyetli hem de verimli ve aynı zamanda yerel olarak temin edilebilen adsorbanların bulunmasına yönelik son zamanlarda araştırma sayısı artmaktadır.

Bu çalışmada kurşun iyonlarının adsorpsiyonunda kullanmak üzere zeolit, aljinat ve incir yaprakları gibi doğal malzemelerden oluşan bir biyokompozit hazırlanmıştır. İncir (*Ficus carica* L.) insanoğlunun eski çağlardan beri bildiği en eski meyvelerdendir. Moraceae familyasına ait *F. carica* L., Güneybatı Asya ve Doğu Akdeniz'e özgü yaprak dökken bir ağaçtır (Uğurlu et al., 2016). İncir, toprağa ve iklim koşullarına geniş ölçüde uyum sağlaması nedeniyle Türkiye'de önemli bir geleneksel üründür. Ayrıca, Türkiye incir üretiminde dünyada lider bir ülkedir; dolayısıyla incir yaprağı gibi tarımsal atıkların değerlendirilmesi önemlidir (Aksoy vd., 2001). Doğal zeolitler, yüksek iyon değişim kapasiteleri, yüksek yüzey alanları ve daha da önemlisi, nispeten düşük fiyatları ile bilinmektedir (Chmielewská et al., 2011). Türkiye'de özellikle klinoptilolit içeren zengin zeolit yatakları bulunmaktadır (Sarioğlu, 2005), bunlar termal stabilite ve asit direnci ile karakterize edilir (Aubakirova et al., 2018), bu nedenle bu bol malzemeden yararlanmak gerekmektedir. Aljinatın adsorptif özellikleri, ağır metallerle karşı yüksek afiniteye sahip karboksilik asit ve hidroksil fonksiyonel gruplarının varlığına dayanmaktadır. Öte yandan, oldukça gözenekli yapıya sahip olması ve yüzeyin uzun süreli kullanılabilmesi mümkündür (Navarro et al., 2014).

Bu çalışmada, incir yaprakları, zeolit ve aljinattan biyokompozit hazırlanarak, bu doğal malzemelerin bol bulunabilirliği ve düşük maliyetlerinin yanı sıra incir yapraklarının biriktirici özelliği, zeolit



sertliği ve ısı direncinden, aljinatın yüksek gözenekliliği ve etkili yüzeyinden de faydalanmak hedeflenmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın temel amacı kurşunu sulu ortamdan uzaklaştırmak için çevre dostu ve ucuz biyokompozit kullanımını araştırmaktır. Bu amaçla pH, sıcaklık, kurşun konsantrasyonu ve süre gibi parametrelerin adsorpsiyon sürecine etkileri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 Kimyasallar

Zeolit ve aljinik asit sodyum tuzu Sigma-Aldrich (ABD)'den temin edilmiştir. Kurşun klorür ( $PbCl_2$ ) Merck'ten satın alınmıştır. Deneylede kullanılan tüm kimyasallar analitik safliktadır.

### 2.2 Biyokompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonu

Taze olarak toplanan *Ficus carica* L. yaprak örnekleri, kirlilikleri gidermek için musluk suyu ve ardından damıtılmış su ile yoğun bir şekilde yıkanmıştır. Daha sonra örnekler doğrudan güneş ışığına maruz bırakılmadan önce oda sıcaklığında, sonraki aşamada fırında  $50^{\circ}C$ 'de 24 saat süresince kurutulmuştur (Test, Türkiye). Kurutulan örnekler, havanda öğütüldükten sonra standart mesh ( $<120 \mu m$ ) bir elek (Jeotest, Türkiye) kullanılarak elenmiştir. *Ficus carica* L. yapraklarından elde edilen toz halinde malzeme ve zeolit, bir biyokompozit malzeme hazırlamak amacıyla sulu kalsiyum klorür çözeltisi içinde sodyum aljinat kürecikleri içinde kapsüllenmiştir. Bu amaçla gerekli miktarda sodyum aljinat (%2), 100 ml distile su içinde  $50^{\circ}C$ 'de sürekli karıştırılarak jel halindeki bir çözelti elde edilinceye kadar çözülmüştür. Hazırlanan jel içerisine, zeolit (0.5 g) ve *Ficus carica* L. yapraklarından elde edilen toz (1 g) eklenmiş ve karışım homojen hale gelene kadar sürekli karıştırılmıştır. Elde edilen süspansiyon, enjeksiyon şırıngası yardımıyla damla damla 0.5 M kalsiyum klorür çözeltisine eklenmiştir. Çözelti içerisinde hızlıca aljinat-zeolit-*Ficus carica* L. yaprak tozundan küresel yapıda biyokompozit kürecikler oluşmuştur. Hidrojel yapısındaki kürecikler, filtrasyon yoluyla çözeltiden ayrıldıktan sonra  $50^{\circ}C$ 'de bir fırında gece boyunca kurutulmuştur. Kurutulmuş kürecikler kurşun iyonlarının giderim çalışmalarında biyosorbent olarak kullanılmak üzere saklanmıştır.

Hazırlanan biyosorbentte fonksiyonel gruplarda titreşim frekansı değişimlerini belirlemek için Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) kullanılmıştır. KBr ile preslenmiş örneklerin  $4400-400 \text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı aralığında FT-IR spektrumları Agilent Infrared spektrometre (ABD) ile elde edilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) (Quanta FEG 250, ABD), hazırlanan biyokompozit küreciklerin yüzey özelliklerini ve morfolojisini analiz etmek için kullanılmıştır.

### 2.3 Kesikli adsorpsiyon deneyleri

Belirlenen  $PbCl_2$  miktarları distile suda çözülerek kurşun iyonlarının stok çözeltisi (500 mg/L) hazırlanmıştır. Bu stok çözelti seyreltilerek gerekli konsantrasyonlarda çalışma çözeltileri hazırlanmıştır. Termostatlı çalkalamalı su banyosu kullanılarak kurşun iyonlarının giderim deneyleri kesikli adsorpsiyon çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Fizikokimyasal parametrelerden pH, kurşun çözeltisinin başlangıç konsantrasyonu, temas süresi ve sıcaklık gibi koşullar araştırılmıştır. Adsorpsiyon deneylerinin çoğu, seçilen pH'ta bir polietilen (PE) şişede 25 mL  $PbCl_2$  içinde 0.1 g adsorban kullanılarak gerçekleştirilmiştir. pH, her deneyde çözeltilere seyreltilmiş HCl ve NaOH ilave edilerek ayarlanmıştır. Çözelti, adsorpsiyon deneyleri sonrasında katı fazdan süzülerek ayrılmıştır. Sulu çözelti içinde kalan kurşun konsantrasyonu İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) (Spectro, Almanya) ile belirlenmiştir. Adsorplanan kurşun miktarı ( $q_e$ , mg/g), aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$q \text{ (mg/g)} = \frac{(C_i - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $C_i$  ve  $C_e$ , sırasıyla kurşun iyonlarının çözeltideki başlangıç ve denge konsantrasyonlarıdır (mg/L).  $m$  adsorbanın ağırlığıdır (g),  $V$  sulu fazın hacmidir (L).

### 2.4 Sorpsiyon İzotermi

İzotermeler, adsorpsiyon işleminde sorbent ile adsorplanan iyonların arasındaki dengeyi ifade eder. Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Radushkevich (DR) izotermi, sorbent ile Pb(II)'nin adsorpsiyonda sürecin özelliklerini tanımlamak için kullanılmıştır.

#### *Langmuir izotermi*

Langmuir izotermi en yaygın kullanılan izoterm modelidir ve geleneksel olarak farklı sorbentlerin performansını ölçmek ve karşılaştırmak için kullanılır. Bu model homojen bir sorbent yüzeyi üzerinde iyonların tek tabakalı olarak gerçekleştiğini varsaymaktadır (Langmuir, 1918). Langmuir modelinin doğrusallaştırılmış denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b_L} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (2)$$

Bu eşitlikte  $q_e$  adsorban üzerine adsorbe edilen kurşun iyonlarının miktarıdır,  $C_e$  çözeltideki kurşunun denge konsantrasyonudur.  $Q_0$  adsorpsiyon kapasitesi ve  $b_L$  adsorpsiyon enerjisi ile ilgili Langmuir sabitleridir.

### ***Freundlich izotermi***

Freundlich modeli, adsorpsiyon olayının gerçekleştiği alanların fraksiyonundaki artışla birlikte adsorpsiyon entalpisinde logaritmik bir düşüş olduğunu varsayar. Diğer bir deyişle, bu model aynı zamanda yüzey heterojenliğini, aktif bölgelerin üstel dağılımını ve enerjilerini kapsayan ampirik bir ifadedir (Freundlich, 1906). Bu model aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n_F} \log C_e \quad (3)$$

Bu eşitlikte  $K_F$  adsorpsiyon kapasitesini temsil eder.  $n_F$  ise adsorpsiyon yoğunluğuyla ilgili boyutsuz bir sabittir.

### ***Dubinin-Radushkevich (D-R) izotermi***

Yaygın olarak kullanılan diğer izoterm ise, adsorpsiyon sürecinin serbest enerjisini hesaplamak için de kullanılan Dubinin-Radushkevich (D – R) modelidir. Heterojen bir yüzey varsayan potansiyel teori temelinde adsorpsiyon mekanizmasını bulmak için bir denklem önermektedir (Dubinin et al., 1947). D-R izoterminin doğrusallaştırılmış denklemi aşağıdaki şekilde verilir:

$$\ln C_{ads} = \ln X_m - \beta \varepsilon^2 \quad (4)$$

Bu eşitlikte  $C_{ads}$  katı fazın birim ağırlığı başına adsorplanan çözünen madde miktarıdır.  $X_m$  teorik adsorpsiyon kapasitesidir.  $\beta$  adsorpsiyon enerjisi ile ilgili bir sabit ve  $\varepsilon$  Polanyi potansiyelidir. Polanyi potansiyeli aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\varepsilon = RT \ln \left( \frac{1}{1 + C_e} \right) \quad (5)$$

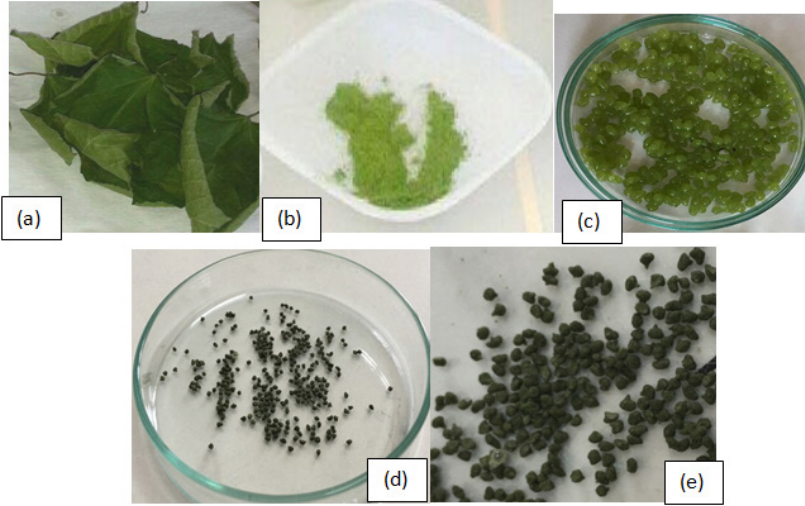
Bu eşitlikte de  $R$  J/mol.K cinsinden gaz sabitidir ve  $T$ , Kelvin cinsinden sıcaklıktır.  $\ln C_{ads}$ ,  $\varepsilon^2$ 'ye karşı çizilirse  $\beta$  ve  $X_m$  sırasıyla eğim ve doğrunun dikey eksenini kestiği noktadan hesaplanır. Adsorpsiyonun ortalama enerjisi ( $E$ ),  $\beta$  sabiti kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$E = \frac{1}{\sqrt{-2\beta}} \quad (6)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Biyosorbent Karakterizasyonu

Kurutulmuş ve toz haline getirilmiş incir yapraklarının, hazırlanmış ve kurutulmuş biyokompozitin görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 1’den görüleceği gibi, hazırlanan biyokompozit kürecikler incir yaprağından kaynaklanan ve kuruduktan sonra koyulaşan karakteristik yeşil renge sahiptir. Biyokompozit kürecikler şekil ve boyut olarak tek tip (~2mm çapında) oluşmuş olup kuruduktan sonra çapları azalmıştır (~0,5mm). Bununla birlikte, aljinat kapsüllerinin spesifik özelliği, sıvı ortam içinde tekrar önceki boyuta şişmesidir.

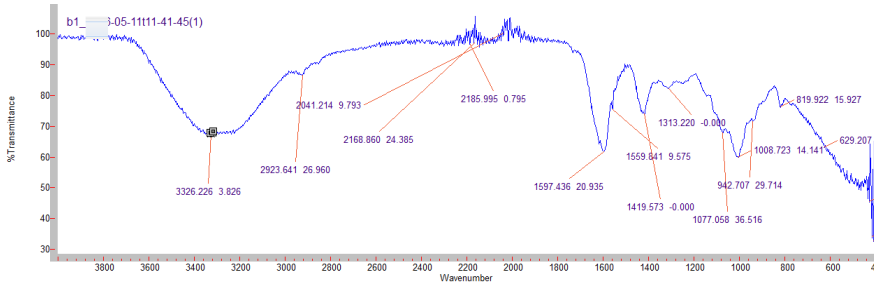


Şekil 1. Kuru (a) ve öğütülmüş (b) incir yaprakları, jel şeklinde (c) ve kurutulmuş biyokompozit (d, e)

#### FTIR Analizi

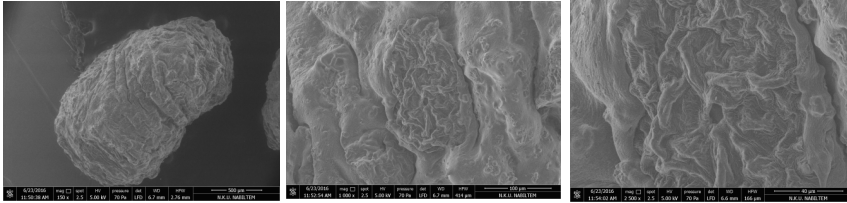
*F. carica*-zeolit-aljinat biyokompoziti Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 2).  $3375\text{ cm}^{-1}$  ve  $3245\text{ cm}^{-1}$ 'deki absorpsiyon pikleri, biyosorbent yüzeyinde hem serbest hem de hidrojene bağlı  $-\text{OH}$  gruplarının varlığını göstermiştir.  $1602$ ,  $1077$  ve  $940\text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen diğer pikler, sırasıyla  $\text{C} - \text{C}$ ,  $\text{C} - \text{O}$  ve  $\text{C} - \text{N}$  bağlarına bağlı olabilir (Boufi ve Alila, 2011).  $821\text{cm}^{-1}$ 'deki pik,  $\beta$ -glikosidik bağlantıya bağlı  $-\text{OH}$  bağının varlığını göstermektedir.  $1314$  ve  $1008\text{ cm}^{-1}$ 'de görünen küçük pikler,  $-\text{CH}$  ve aromatik  $\text{CH}_2$  bağlarından kaynaklanmaktadır (Sharma et al., 2013), ki bunlar incir yaprağındaki lignin içeriğinden ileri gelmektedir. Hidrojel  $1429\text{ cm}^{-1}$ 'de  $\text{COOH}$ 'in absorbans piklerini göstermiştir.  $1112$  ve  $1147\text{cm}^{-1}$ 'deki pikler aljinik asite atfedilen (Jena et al., 2013) polisakaritler olarak karbonhidratın  $\text{C-O-C}$  bağının gerilme titreşiminden kaynaklı olabilir (Bayomi et al., 2015). Zeolit ve incir yapraklarının aljinat kapsüllerine immobilizasyonu

bu çalışmada aljinatın aktif bölgelerinin bağlanma etkinliğini azalttığı ve kurşunun fiziksel adsorpsiyonu ile sonuçlandığı düşünülmektedir.



**Şekil 2.** *Biyokompozitin Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi spektrumları Mikroskopik Analiz*

Taramalı Elektron Mikroskobu ile elde edilen mikroskopik görüntüler, biyosorbentın yüzey topografisini ve iç yapısını açıkça tasvir etmiştir (Şekil 3). Hazırlanan biyokompozit boncukları düzensiz ve gözenekli bir yapıya sahip olup, enlemesine boşluklar içermektedir. 2500x büyütme gücü altında yüzey morfolojisi incelendiğinde çok sayıda gözenek ve pürüzlülük ortaya çıkmıştır. Kapsüllenmiş incir yaprağı tozu ve zeolit, aljinat matrisi içine gömülü olarak görülmüş ve sırasıyla incir yaprağı ve zeolitin amorf ve kristal parçacıkları ile matrisin aşılmasını nedeniyle yüzeyin morfolojisini değiştirmiştir. Bu, biyokompozit yapıda katılan maddelerin fiziksel ve muhtemelen kimyasal çapraz bağlanmalarına yol açmış olup, heterojen yapı oluşturması ile adsorpsiyon sürecini etkilediği düşünülmektedir.



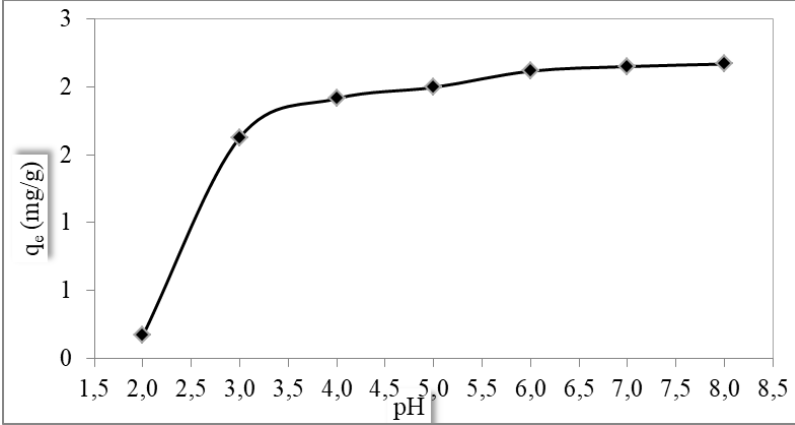
**Şekil 3.** *Hazırlanan biyokompozitin SEM görüntüleri*

### 3.2 Optimum giderim şartlarının araştırılması

Hazırlanan biyosorbentın verimliliğini karşılaştırmak için, kurşun iyonlarının biyosorpsiyonu *Ficus carica* L. tozu ve aljinat kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirildi. Kesikli adsorpsiyon deneyleri, 200 rpm çalkalama hızında, pH 4, 25°C koşullarında 2 saat süreyle, 0.1 g biyosorbent, 25 mL ve 100 mg/L kurşun çözeltisi kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, *Ficus carica* L. tozu ve aljinatın adsorpsiyon kapasitelerinin sırasıyla %24 ve %12 olduğunu göstermektedir. Biyokompozitin ise, aynı koşullar altında kurşun iyonlarını maksimum alım kapasitesi %40'tır.

### Çözelti pH'ın etkisi

pH, sorpsiyon sürecini etkileyen önemli bir parametre olarak bilinmektedir. Pb (II) iyonlarının biosorbent tarafından adsorpsiyonu üzerine pH'ın etkisini belirlemek amacıyla farklı pH değerlerinde kesikli adsorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Deneyler 0.1 g biosorbent, 25 mL ve 10 mg/L kurşun çözeltisi ile, 25°C'de, 2 saat ve 200 rpm karıştırma hızı koşullarında incelenmiştir. pH 2-8 aralığındaki kurşun iyonları değişimi grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



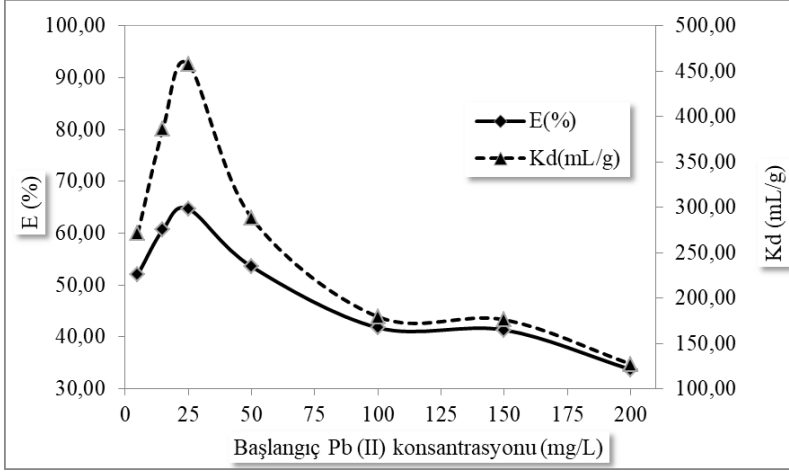
Şekil 4. Çözelti pH'ının kurşun adsorpsiyonuna etkisi

Şekil 4'ten görülebileceği gibi, Pb(II) iyonlarının biyosorbent üzerindeki maksimum adsorpsiyonu, %85 ile pH 6.00'da gözlenmiş olup bu pH'tan sonra adsorpsiyonda hafif bir azalma olmuştur. Düşük pH'larda metal bağlanma bölgeleri için metal iyonları ve hidrojen (H<sup>+</sup>) arasında rekabet vardır ve hidrojen iyonlarının baskınlığı nedeniyle de daha düşük metal adsorpsiyonu gerçekleşir (Kosa et al., 2012). pH arttıkça bu rekabetçi etki en aza iner ve sorbent yüzeyi protonsuzalaşıp negatif yüklü hale geldiğinden Pb bağlanması artar. Bu veriler ışığında Pb adsorpsiyonu için optimum pH değeri 6 (Şekil 4) olarak belirlenmiş olup, ilerleyen deneysel aşamalar bu pH'ta gerçekleştirilmiştir.

### Çözeltideki Pb (II) konsantrasyonunun etkisi

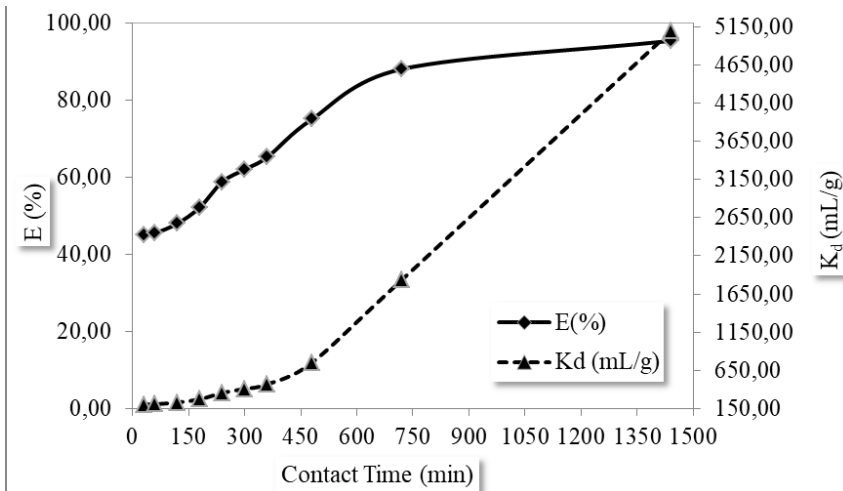
Çözeltideki ilk konsantrasyonun fonksiyonu olarak Pb(II) adsorpsiyonu incelenmiştir. 5 ile 200 mg/L arasındaki ilk kurşun konsantrasyonuna karşı biyokompozitin adsorpsiyon verimlerinin değişimi Şekil 5'te görülmektedir. Adsorpsiyon deneyleri, pH 6.0, 0.1 g biyosorbent, 25 mL kurşun çözeltisi, 25°C sıcaklık, 200 rpm çalkalama hızında 2 saat temas süresi koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, Pb (II) sorpsiyonu, çözeltideki başlangıç kurşun konsantrasyonunun 5'ten 25 mg/L'ye yükselmesiyle % 52.0'dan 64.7'ye yükselmiş ve ardından 200 mg/L kurşun konsantrasyonunda da %33.70'e düşmüştür. Yani, çözeltideki Pb(II) konsantrasyonunu arttığında adsorpsiyon verimi azalmaktadır.

Biyosorbent, 25 mg/L başlangıç kurşun konsantrasyonunda maksimum sorpsiyonuna sahiptir. Metal iyon konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, biyosorbentin yüzeyi doymuş hale gelir ve bu nedenle ortamdan Pb iyonlarını uzaklaştırma yeteneği azalmıştır (Dabbagh et al., 2016).



**Şekil 5.** Başlangıç Pb (II) konsantrasyonunun kurşun adsorpsiyonuna etkisi  
**Temas süresinin etkisi**

Metal iyonları ile biyosorbent arasındaki temas süresi, adsorpsiyon süreçlerinde büyük önem taşır. 30-1440 dk aralığındaki temas süresinin kurşun adsorpsiyonu üzerindeki etkisi; 25 mL ve 100 mg/L kurşun çözeltisi, 0.1 g biosorbent, pH 6.0, 25°C'de 200 rpm çalkalama hızında araştırılmıştır. Şekil 6, temas süresinin bir fonksiyonu olarak adsorbe edilmiş kurşun verimini göstermektedir.



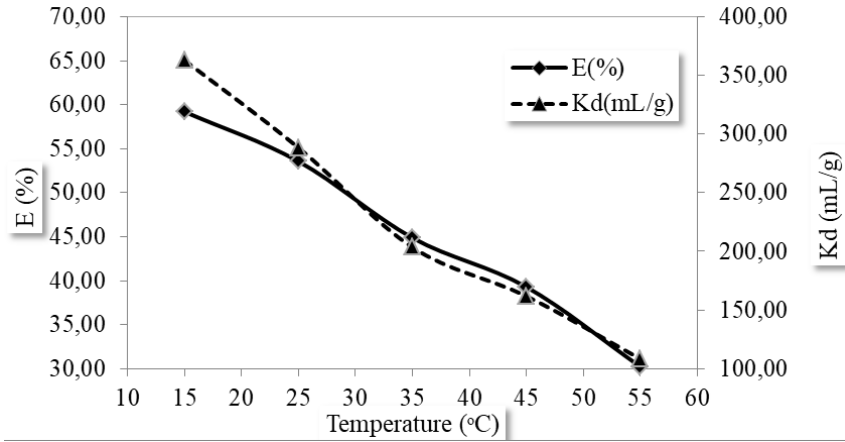
**Şekil 6.** Temas süresinin kurşun adsorpsiyonu üzerine etkisi



Şekil 6'dan açıkça görüldüğü gibi, sorpsiyonun başlangıcında bile kurşun giderimi yüzdesi oldukça yüksektir. Adsorpsiyon verimliliği, ilk 360 dakikada %65'in üzerinde hızla artmış olup, 720 dakika sonra, kurşun iyonlarının %85'i çözüldüğüden uzaklaştırılmıştır. Temas süresi arttıkça sorbent üzerindeki aktif alanlar da doldurulmuştur.

### Sıcaklığın etkisi ve termodinamik çalışmalar

Sıcaklığın Pb (II) adsorpsiyonu üzerindeki etkisi 288,15 ile 328,15 K arasında değişen beş farklı sıcaklıkta diğer parametreler sabit tutularak (25 mL ve 50 mg/L standart kurşun çözeltisi içinde 0.1 g biyosorbent, pH 6, 2 saat süre ve 200 rpm çalkalama hızı) incelenmiştir. Test edilen sıcaklık aralığında, kurşun iyonlarının biyosorbent üzerindeki adsorpsiyonunun sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 7'den görülmektedir. Sonuçlara göre, kurşun iyonlarının adsorpsiyonu ekzotermik özelliktedir.



Şekil 7. Kurşun adsorpsiyonuna sıcaklığın etkisi

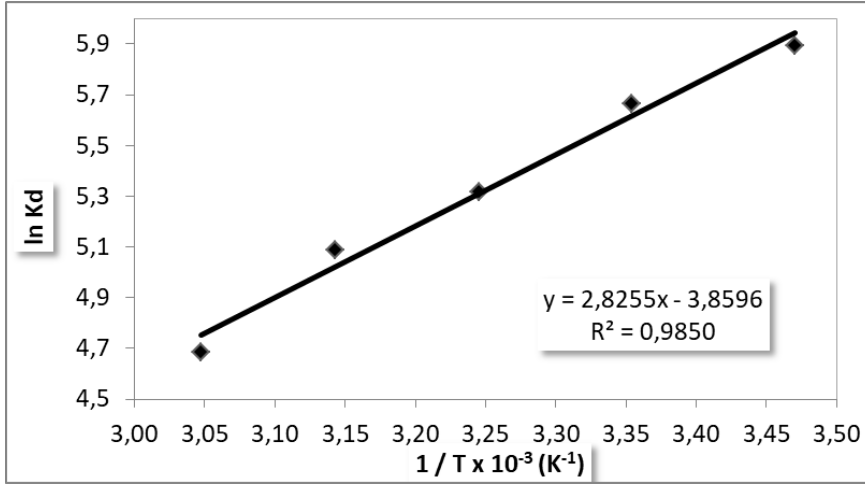
Termodinamik parametreler (entalpi,  $\Delta H^\circ$ , entropi,  $\Delta S^\circ$ , Gibbs Serbest Enerjisi,  $\Delta G^\circ$ ) aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir:

$$\ln K_d = \left( \frac{\Delta S_{ads}^\circ}{R} \right) - \left( \frac{\Delta H_{ads}^\circ}{RT} \right) \quad (7)$$

Burada  $K_d$  dağılım katsayısı,  $R$  gaz sabiti (8.314 J/mol.K),  $T$  sıcaklık (Kelvin),  $\Delta H_{ads}^\circ$  ve  $\Delta S_{ads}^\circ$  sırasıyla entalpi ve entropidir.  $\ln K_d$ 'ye karşılık  $1/T$  grafiği oluşturulmuş, entalpi ve entropi değerleri de grafiğin eğim ve kesim değerlerinden elde edilmiştir (Şekil 8). Gibbs Serbest Enerjisi değerini hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$





**Şekil 8.** Sıcaklığın Pb (II) 'nin adsorpsiyonda termodinamik davranışına etkisi

Entalpi değişimi  $\Delta H^\circ$ 'ın negatif değerde çıkması kurşun adsorpsiyonunun ekzotermik yapıda olduğunu gösterir. Bu işlemler için  $\Delta G^\circ$ 'nin değeri, Tablo 1'de gösterildiği gibi; artan sıcaklıkla daha az negatif hale gelir ki bu da yüksek sıcaklıklarda sorpsiyonun daha az tercih edildiğini gösterir. Reaksiyon, kendiliğinden gerçekleşir ve daha düşük sıcaklıklarda daha istemlidir. Adsorpsiyon entropisinin negatif değeri, iyonların çözüldüden katı faza geçtiğinde entropinin azalacağına ilişkin genel bilgilerle uyumlu bir sonuçtur.

**Tablo 1.** Pb (II) adsorpsiyonunun termodinamik parametreleri

$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (J/molK)	$R^2$	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)				
			288.15 K	298.15 K	308.15 K	318.15 K	323.15 K
-23.491	-32.089	0.9850	-14.245	-13.924	-13.603	-13.282	-12.961

### 3.3 Adsorpsiyon İzotermi

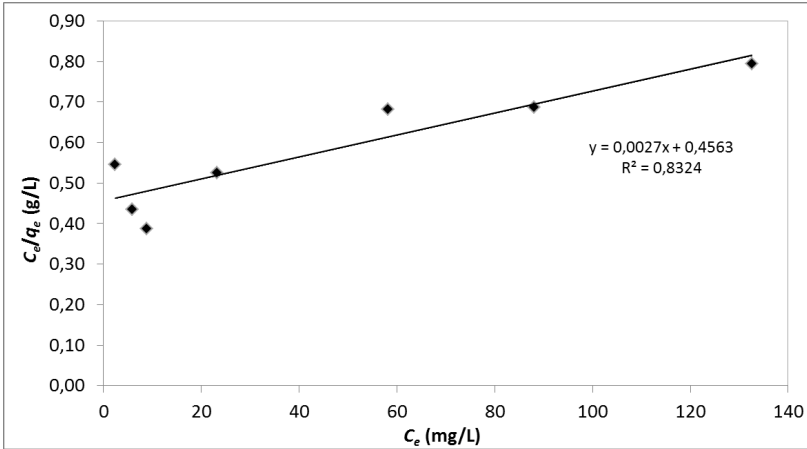
Kurşunun aljinat-zeolit-*Ficus carica* L. biyokompozitine adsorpsiyonu hakkında daha fazla bilgi edinmek için, kesikli sorpsiyon deneylerinin sonuçları, izoterm modelleri ile de değerlendirilmiştir. Kurşunun biyokompozit üzerine adsorpsiyonu, matematiksel olarak tanımlanabilen bir kütle transfer işlemidir. Sulu fazda çözünen metal iyonlarının konsantrasyonu ile adsorbana bağlanan derişim arasında denge kurulur (Gok, 2014; Bayramoglu, 2003). Bu süreci analiz etmek için deneysel veriler farklı sorpsiyon izotermine, yani Freundlich, Langmuir ve Dubinin-Radushkhevich modellerine tabi tutulmuştur. 5–200 mg/L konsantrasyon aralığındaki adsorpsiyon dengesi, 25°C, pH 4.0 ve 120 dakikalık temas süresinde, 100 mg aljinat-zeolit-*Ficus carica* L. biyokompoziti ile çalışılmıştır. İzoterm modellerine ait sabitler ve korelasyon katsayıları ( $R^2$ ), kurşunun biyokompozit üzerindeki adsorpsiyonuna ait grafiklerden

hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Çözeltideki kurşun konsantrasyonu artırıldığında, absorbe edilen metal miktarı da kademeli olarak artmaktadır.

**Tablo 2.** Biyokompozit üzerine kurşun adsorpsiyonu için izoterm modellerinin parametre değerleri

Isotherm modelleri	Parametreler	
Langmuir	$Q_0$ (mg/g)	370,4
	$b_L$ (L/mg)	0,006
	$R^2$	0.8324
Freundlich	$K_F$ (mg/g)	2.68
	$n_F$	1.16
	$R^2$	0.9845
Dubinin–Radushkevich	$X_m$ (mg/g)	150,3
	$\beta$ (mol/kJ) <sup>2</sup>	$2,97 \times 10^{-8}$
	$E$ (kJ/mol)	4,10
	$R^2$	0.9817

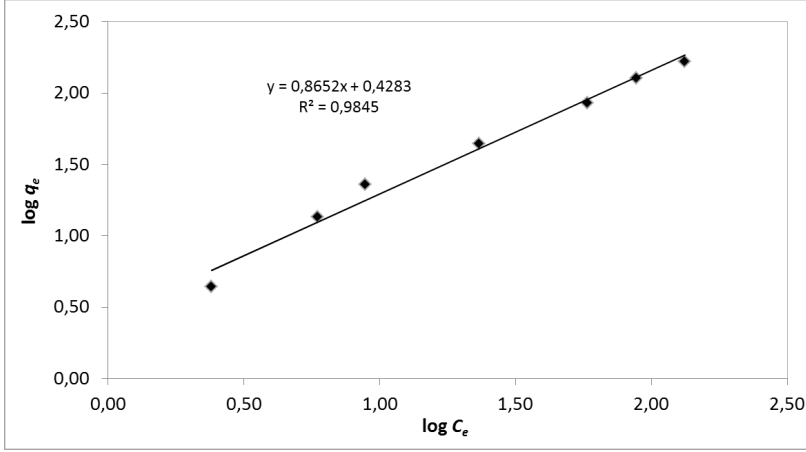
**Langmuir izotermi:** 298.15 K’de, 5 ila 200 mg/L konsantrasyon aralığında Pb (II) iyonları için denge verileri Langmuir izotermi ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 9).  $Q_0$  ve  $b_L$  değerleri,  $C_e$ ’ye karşılık  $C_e/q_e$  doğrusal grafiklerin eğim ve kesim değerlerinden hesaplanmıştır. İzoterm sabitleri ile birlikte korelasyon katsayılarının büyüklükleri dikkate alındığında, Langmuir izoterminin kurşunun adsorpsiyonu için iyi bir model olmadığı görülmektedir.



**Şekil 9.** Kurşun adsorpsiyonu için Langmuir'in lineer izoterm model eğrisi

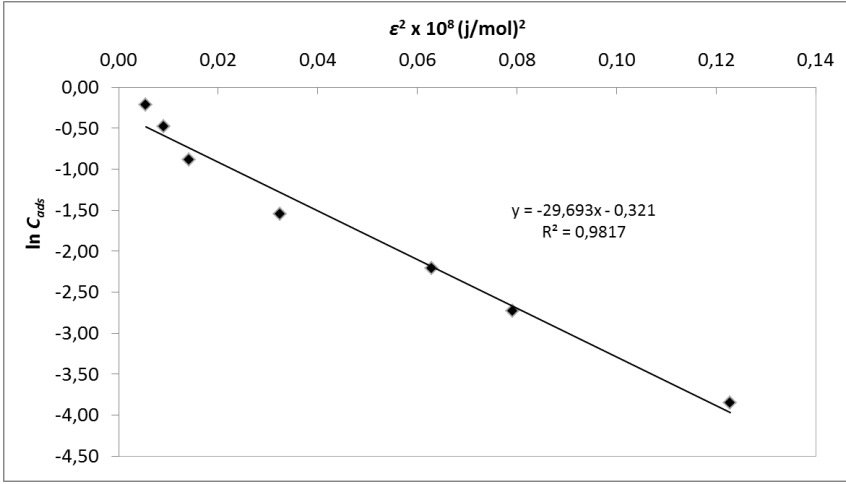
**Freundlich izotermi:** Log  $C_e$ ’ye karşı log  $q_e$ ’nin doğrusal grafiği, Freundlich izoterminin biyokompozit üzerine kurşun adsorpsiyonu için

uygulanabilirliğini göstermektedir (Şekil 10). Korelasyon katsayılarına göre, sorpsiyon süreci Freundlich denklemi ile iyi bir şekilde tanımlanabilir.  $1/n$  0–1 arasında değerler alır ve yüzey ne kadar heterojense  $1/n$ 'in değeri de sıfıra o kadar yakın olur. Bu izoterm heterojen sistemlerde Langmuir izotermine göre daha yüksek doğruluğa sahiptir. Bu model, sorbat tarafından sorbentin doygunluğunu tahmin eder, böylece çok katmanlı yüzey adsorpsiyonunu gösteren sonsuz yüzey kapasitesi matematiksel olarak tahmin edilir (Aytas et al., 2009). Elde edilen verilerden sorpsiyon kapasitesini ifade eden  $K_F$ 'nin değeri de 2.68 mg/g olarak belirlenmiştir.



Şekil 10. Kurşun adsorpsiyonu için Freundlich'in doğrusal izoterm model eğrisi

**Dubinin-Radushkevich (D-R) izotermi:**  $\epsilon^2$ 'ye karşı  $C_{ads}$  değerleri, Şekil 11'den görüleceği gibi düz doğrusal bir grafik vermiştir.  $\beta$  ve  $X_m$  değerleri sırasıyla grafiğin eğim ve kesim değerlerinden elde edilmiştir. Hesaplanan Dubinin–Radushkevich izotermi sabitleri ve ortalama serbest enerji değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Kurşun iyonları için D-R modelinin sorpsiyon kapasitesi ( $X_m$ ) 150.31 mg/g olarak hesaplanmıştır.  $E$  büyüklüğü biyosorpsiyon sürecinin reaksiyon mekanizmasını tahmin etmek için kullanılır.  $E$ 'nin değeri 1 ile 8 kJ/mol arasındaysa, fiziksel bir adsorpsiyonu; 8 kJ/mol'den yüksekse, kimyasal yapıda adsorpsiyonu işaret eder. Buna göre, 4.10 kJ/mol bulunan  $E$  değeri, sürecin fiziksel adsorpsiyon aralığında olduğunu göstermektedir. Böylece, kurşun denge verilerinin hem Freundlich hem de D-R izoterm modellerine iyi uyması gerçeği, biyokompozit üzerindeki Pb adsorpsiyonunun heterojen karakterde olduğunu göstermektedir. Hazırlanan biyokompozitin heterojen yapısı SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir. Ayrıca, 0.9'dan büyük olan  $R^2$  değeri ile D-R izotermine iyi uyum, bu adsorpsiyonun endüstriyel koşullar altında da uygun olabileceğini göstermektedir (Alfaro-Cuevas-Villanueva et al., 2014).



Şekil 11. Kurşun adsorpsiyonu için Dubinin-Radushkevich'in doğrusal izoterm model eğrisi

### 3.4 Aljinat-zeolit-*Ficus carica* L. biyokompozitinin diğer biyosorbentlerle kıyaslanması

Literatürde son yıllarda kurşunun adsorpsiyonu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Mevcut çalışmanın kurşun metal alım kapasitelerinin literatürde bildirilen diğer biyosorbentlerle karşılaştırılması Tablo 3'te verilmiştir. Çalışmamızın literatürde yer alan diğer biyosorbentlerle doğrudan karşılaştırılması, bu çalışmalarda kullanılan çeşitli deneysel koşulların farklılığı nedeniyle zor olsada, genel olarak, aljinat-zeolit-*Ficus carica* L. biyokompoziti diğer biyosorbentler ile karşılaştırıldığında makul bir adsorpsiyon kapasitesi sergilemektedir.

Tablo 3. Çeşitli biyosorbentlerin kurşun alım kapasitelerinin karşılaştırılması

Biosorbent	Q <sub>o</sub> (mg/g)	Kaynaklar
Zeytin çekirdeği atığı	9.3	Fiol et al., 2005
Sülfürlü Portakal Kabuğu	164	Liang et al., 2011
<i>Cinnamomum camphora</i> yaprakları	75.8	Chen et al., 2010
Modifiyeli mercimek kabuğu	81.4	Basu et al., 2015
Avustralya deniz yosunu	322	Matheickal ve Yu, 1999
Çay atığı	65.0	Amarasinghe ve Williams, 2007
Yeşil yosun	140.8	Gupta ve Rastogi, 2008
Aljinat-zeolit- <i>Ficus Carica</i> L. biyokompoziti	370.4	Bu çalışma

Son yıllarda, metal bağlama kapasitelerine sahip yeni düşük maliyetli biyosorbentlerin geliştirilmesi ve mevcut olanların performansını

arttırmak için biyosorbentlerin modifikasyonu üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bitkiler, ağır metal biriktirme özellikleriyle bilinmekte ve biyoidikatör olarak tanınmaktadır. *Ficus carica* kabuğu ve yapraklarının ağır metal birikim seviyesinin araştırılması amacıyla bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Ugurlu et al., 2016). Sasikala ve Muthuraman (2015), Cr (III)'ün adsorpsiyonu için *Ficus carica* tohumlarını kullanarak ortalama adsorpsiyon yüzdesini %94.6 olarak bulmuşlardır ve bu da metal ile adsorban arasında güçlü bir etkileşimin oluştuğunu göstermiştir. Cr (VI) adsorpsiyonu için *Ficus carica* sak elyafı kullanılmış ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi 19.68 mg/g olarak bulunmuştur (Gupta et al., 2013). Sharma et al., (2013), *Ficus carica* sak elyafını akrilik asit ile kimyasal olarak modifiye etmiş ve bu sorbent için Cr(VI) adsorpsiyon verimini %56 olarak bulmuştur. Bildiğimiz kadarıyla literatürde şu ana dek *Ficus carica* L. yaprak tozu içeren biyokompozit üzerinde kurşun iyonlarının adsorpsiyonu üzerine yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır.

## SONUÇ

Doğal adsorbanlar, temelde organik maddelerden oluşan biyobozunur malzemelerdir. Bu çalışmada incir yaprakları, aljinat ve zeolit gibi doğal malzemelerden biyokompozit hazırlanmıştır. Adsorpsiyon sürecinin kurşun iyonları konsantrasyonuna ve pH'a bağlı olduğu bulunmuştur. Biyokompozit üzerinde en yüksek Pb(II) iyonları adsorpsiyonu %86.67 olarak pH 6'de ve 25 mg/L başlangıç Pb(II) konsantrasyonunda elde edilmiştir. Entalpi değişiminin  $\Delta H$  (-23.491kJ/mol) negatif olması kurşun adsorpsiyonunun ekzotermik bir süreç olduğunu göstermiştir. Reaksiyon kendiliğinden gerçekleşmiştir ve düşük sıcaklıklarda daha uygundur. Adsorpsiyon süreci, Freundlich ve D-R modelleriyle iyi bir şekilde tanımlanabilmiştir. Sorpsiyon kapasitesinin değeri 2.68 mg/g olarak bulunmuştur. 4.10 kJ/mol olarak hesaplanan ortalama adsorpsiyon enerjisi, prosesin fiziksel adsorpsiyon aralığında olduğunu göstermiştir. Mevcut çalışmanın sonuçları, sorbent olarak hazırlanan biyokompozitin sulu çözeltilerden Pb(II) iyonlarının uzaklaştırılması için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Hazırlanan bu yeni biyokompozit, artılmış atık suyun kalitesini iyileştirmek ve kirli bir sulu ekosistemi temizlemek için yeni bir yaklaşım olarak düşünülebilir.

## Teşekkür

Bu çalışma, T.C. Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM) tarafından desteklenen TAGEM 14-ARGE44 proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Aksoy U., Can H.Z., Hepaksoy S., Sahin N. (2001). Incir yetistirciligi (Fig farming), Türkiye Tarımsal Araştırma Projesi Yayınları, İzmir.
- Alfaro-Cuevas-Villanueva R., Hidalgo-Vázquez A.R., Cortés Penagos C.J., Cortés-Martínez R. (2014). Thermodynamic, Kinetic, and Equilibrium Parameters for the Removal of Lead and Cadmium from Aqueous Solutions with Calcium Alginate Beads, *The Scientific World Journal*, 2014: 1-9.
- Amarasinghe B.M.W.P.K., Williams R.A. (2007). Tea waste as a low-cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chem. Engin. J.*, 132: 299–309.
- Aubakirova R.A., Popova M.V., Bektasova G.S., Kabdulkarimova K.K., Kaygusuz M. (2018). Adsorption of Heavy Metals on Mechanoactivated Zeolite from Tayzhuzgen Depository, *Fresenius Environmental Bulletin*, 27(3): 1372-1378.
- Aytas S., Yurtlu M., Donat R. (2009). Adsorption characteristic of U(VI) ion onto thermally activated bentonite, *J. Haz. Mat.*, 172(2-3): 667–74.
- Basu M., Guha A.K., Ray L. (2015). Biosorptive removal of lead by lentil husk, *J. Environ. Chem. Eng.*, 3 (2): 1088–1095.
- Bayomi M., Choi Y.S., Christodoulides K., Fathi P., Ghodasara A., Knazik J. et al. (2015). Zeolite-loaded alginate-chitosan hydrogel beads as a topical hemostat, University of Maryland, College Park, MD 20742-7011 (301): 314-1328.
- Bayramoglu G. (2003). Biosorption of heavy metal ions on immobilized white-rot fungus *Trametes versicolor*, *J. Haz. Mat.*, 101 (3): 285–300.
- Boufi S., Alila S. (2011). Modified cellulose fiber as a biosorbent for the organic pollutants. In: Kalia S, Averous L (eds) *Biopolymers: biomedical and environmental applications*, 1st edn. Wiley, New Jersey, USA, pp. 483–524.
- Chen H., Zhao J., Dai G., Wu J., Yan H. (2010). Adsorption characteristics of Pb(II) from aqueous solution onto a natural biosorbent, fallen *Cinnamomum camphora* leaves, *Desalination*, 262: 174–182.
- Chmielewská E., Sabová L., Peterlik H., Wu A. (2011). Batch-wise adsorption, SAXS and microscopic studies of zeolite pelletized with biopolymeric alginate, *Brazilian J. Chem. Eng.*, 28 (01): 63-71.
- Dabbagh R., Moghaddam Z.A., Ghafourian H. (2016). Removal of cobalt(II) ion from water by adsorption using intact and modified *Ficus carica* leaves as low-cost natural sorbent, *Desalin. Water Treat.*, 57(42): 19890-19902.
- Dubin M.M., Zaverina E.D., Radushkevich L.V. (1947). Sorption and structure of active carbons I. adsorption of organic vapors, *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, 21: 1351–62.
- Fiol N., Villaescusa I., Martínez M., Miralles N., Poch J., Serarols J. (2006). Sorption of Pb(II), Ni(II), Cu(II) and Cd(II) from aqueous solution by olive stone waste, *Sep. Purif. Tech.* 50: 132–140.
- Freundlich H. (1906). Adsorption in solution, *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 57: 384–410.

- Gok C. (2014). Neodymium and samarium recovery by magnetic nano-hydroxyapatite, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 301 (3): 641–51.
- Gupta V.K., Rastogi A. (2008). Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: Kinetics and equilibrium studies, *J. Haz. Mat.*, 152: 407–414.
- Gupta V.K., Pathania D., Agarwal S., Sharma S. (2013). Removal of Cr(VI) onto *Ficus carica* biosorbent from water, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20: 2632–2644.
- Isaac R.A., Gil L., Cooperman A.N., Hulme K., Eddy B., Ruiz M., Jacobson K., Larson C., Pancorbo O.C. (1997). Corrosion in drinking water distribution systems: A major contributor of copper and lead to wastewaters and effluents, *Environ. Sci. Tech.*, 31: 3198–3203.
- Jena J., Pradhan N., Dash B.P., Sukla L.B., Panda P.K. (2013). Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using microalga *Chlorococcum humicola* and its antibacterial activity, *Int. J. Nanomat. Biostructures*, 3(1): 1-8.
- Koizhaiganova Kaygusuz M., Isik N.O., Esen Erden K. (2017). The removal of Pb (II) from aqueous solutions by strong and weak acidic cation exchange resins. *Fresenius Environmental Bulletin* 26 (5), 3448-3454.
- Kosa S.A.; Al-Zhrani G.; Salam M.A. (2012). Removal of heavy metals from aqueous solutions by multi-walled carbon nanotubes modified with 8-hydroxyquinoline, *Chem. Eng. J.*, 181-182: 159-168.
- Langmuir I. (1918). The Adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *J. Amer. Chem. Soc.*, 40 (9): 1361–1403.
- Liang S., Guo X., Tian Q. (2011). Adsorption of Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> from aqueous solutions by sulfured orange peel, *Desalination*, 275: 212–216.
- Matheickal J.T., Yu Q. (1999)ç Biosorption of lead(II) and copper(II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of Australian marine algae, *Biores. Tech.* 69: 223-229.
- Mondal M.K. (2009). Removal of Pb(II) ions from aqueous solution using activated tea waste: Adsorption on a fixed-bed column, *J. Environ. Manag.*, 90 (11): 3266-3271.
- Navarro A.E., Musaev H., Serrano K., Masud M.E. (2014). Adsorption kinetics of cobalt (II) ions onto alginate beads from aqueous solutions, *J Earth SciClim Change*, 5(8): 223-228.
- Sarioglu M. (2005). Removal of ammonium from municipal wastewater using natural Turkish (Dogantepe) zeolite, *Separ. Purif. Technol.* 41: 1-11.
- Sasikala S., Muthuraman G. (2015). Studies on adsorption of chromium (VI) onto *Ficus carica* seed from wastewater, *Int. J. Recent Sci. Res.*, 6(3): 3100-3108.
- Sharma S., Pathania D., Singh P. (2013). Preparation, characterization and Cr(VI) adsorption behaviour study of poly(acrylic acid) grafted *Ficus carica* bastfiber, *Adv. Mat.Lett.*, 4(4): 271-276.
- Ugurlu I., Unver M.C., DoganY. (2016). Determination and comparison of heavy metal accumulation level of *Ficus carica* bark and leaf samples in Artvin, Turkey, *Oxid. Commun.*, 39: 765–775.

# Bölüm 23

## **GEOSENTETİK FONKSİYONLARINA VE ÇEŞİTLERİNE YÖNELİK BİR ANALİZ ÇALIŞMASI**



*Gamze GENCER<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Bitlis Eren University Technical Sciences Vocational School, 13000, Bitlis  
ggencer@beu.edu.tr





## 1. GİRİŞ

Geosentetikler, inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanan, en az bir bileşeni doğal veya sentetik bir polimerden imal edilen, zemin ve/veya diğer malzemelerle temas halinde kullanılan ve tabaka, şerit veya üç boyutlu bir yapıya sahip ürünleri tanımlayan bir terimdir (Wasti, 2007, Gökova, 2018). Geosentetikler karayolu, demiryolu, havaalanı, istinat duvarları, kanallar, seddeler, katı ve sıvı atık depolama alanları, barajlar, erozyon önleme projeleri, tarım ve madencilik faaliyetleri gibi birçok uygulamada ekonomik ve üstün çözümler sağlamaktadırlar (Güler, 2014). Tüm dünyada özellikle enerji sektöründe verimlilik ile ilgili birçok çalışma ekonomiklik amacıyla yapılmaktadır. Teknolojinin gelişimi verimliliğe bağlı ekonomik çözümler üretmek içindir. Bu nedenle hem ekonomik hem de enerji verimli ve dayanıklı malzemeler üretme çalışmaları günümüzde artmıştır.

Bu çalışmada, genel anlamda geosentetik malzeme türlerine ve geosentetik malzemelerin işlevlerine (fonksiyonlarına) değinilmiştir.

## 2. GEOSENTETİK TÜRLERİ

İlk üretim sürecine geotekstil imalatıyla başlanılmış ardından giderek birçok özelliğe ve şekilde üretilerek çeşitlendirilip yaygınlaştırılmıştır (Livaoglu, 2016). Başlıca geosentetik çeşitleri; geotekstilller, geogridler, geonetler, geomembranlar, geosentetik kil astarlar, geoborular, geofoamlar, geokompozitler, geoceller, geomatlar ve geotüplerdir (Güler, 2014).

### 2.1 Geotekstilller

Geotekstilller; polyester, poliamid, polipropilen, polietilen, polivinil klorid hammaddelerinden üretilen geçirgen geosentetik örtülerdir (Yetiz, 2018).

Geotekstilller genellikle diğer geosentetik malzemelere yardımcı olarak kullanılmalarının yanında, esnek ve ince yapıda olması, çekme mukavemetin güçlü olması ve oluşan gerilmelerin eşit bir biçimde dağılmasını sağlaması sebebiyle yol inşaatlarında ve diğer inşaat alanlarında yaygın olarak kullanılan sentetik ürünlerdir (Yetiz, 2018, Aydın, 2019).

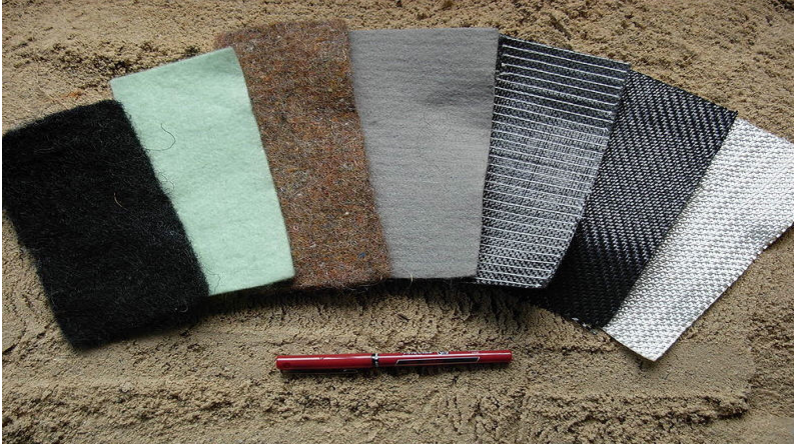
Geotekstilller örgülü ve örgüsüz olmak üzere 2'ye ayrılırlar.

#### - Örgülü geotekstilller

Örgülü geosentetikler; iplikçiklerin birbirine dik iki sıra halinde geleneksel örgü yöntemleriyle dokuma tezgahlarında üretilmesiyle elde edilirler. Boyuna ve enine doğrultudaki iplikler, çözgü ve atkı olarak isimlendirilirler (Aydın, 2019). Çift taraflı ve dik dokundukları için diyagonal mukavemet göstermektedirler ve yüksek çekme dayanımına sahiptir (Yetiz, 2018).

## - Örgüsüz geotekstiller

Örgüsüz geotekstiller, iplik üretme ve dokuma aşamaları olmadan üretilen geotekstillerdir. üç farklı üretim yöntemine göre elde edilebilirler. Bunlar, ısı yoluyla bağlanmış, iğnelenmiş ve kimyasal yöntemle bağlanmış geotekstillerdir (Aydın, 2019). Çekme dayanımları çok düşük olduğundan ayırma ve filtrasyon işlemlerinde kullanılmaktadır (Özkol, 2006).



Şekil 1. Geotekstil (Build-journal, 2020)

## 2.2 Geogrid

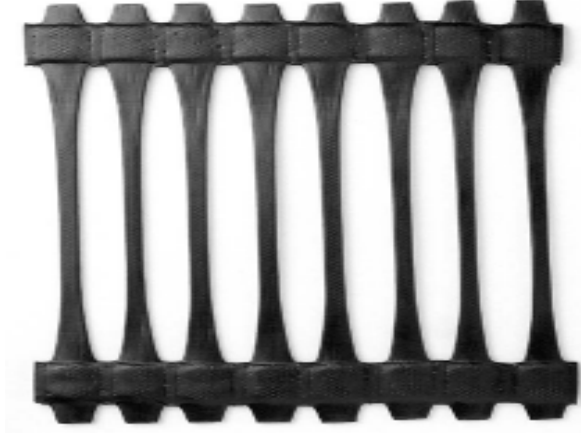
Geosentetik ürünler arasında son yıllarda hızla yaygınlaşan ve tercih edilen bir üründür. Üzerinde çekme elemanlarından oluşan açıklıklar bulunur. Bu açıklıkların şekli ve boyutları geogrid kullanım amacına göre tasarlanır (Aydın, 2019).

Geogridler zemin tabakalarının bütün halinde çalışmasını sağladığından zemin güçlendirmesinde, şev stabilizasyonunda, yolun altyapı ve üst yapı gibi kısımlarında kullanılmaktadır ve zemin içerisinde bir donatı görevi görmektedir (Yetiz, 2018, Aydın, 2019).

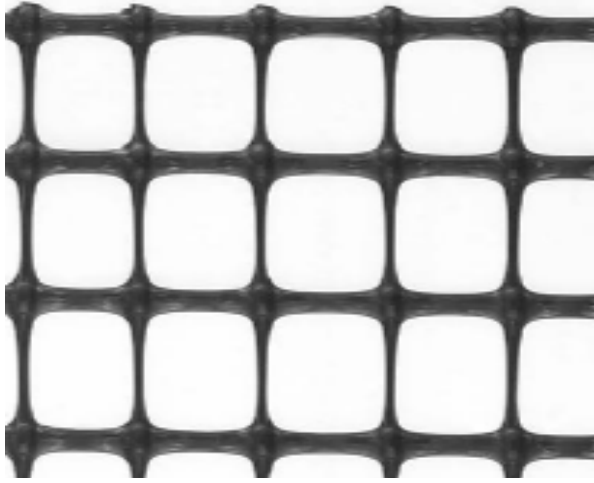
Geogridleri, birçok özelliğine bağlı olarak sınıflandırmak mümkündür. Bunların başında üretim yöntemi ve üzerindeki açıklığın şekli gelmektedir (Aydın, 2019).

### 1. Üretim yöntemine göre geogridler (Aydın, 2019)

- Ekstrüde yöntemi ile üretilen (Mukavemeti en yüksek olan geogrid çeşidi), Şekil 2’de Tek yönde ekstrüde geogrid ve Şekil 3’te Çift yönde ekstrüde geogrid görülmektedir.

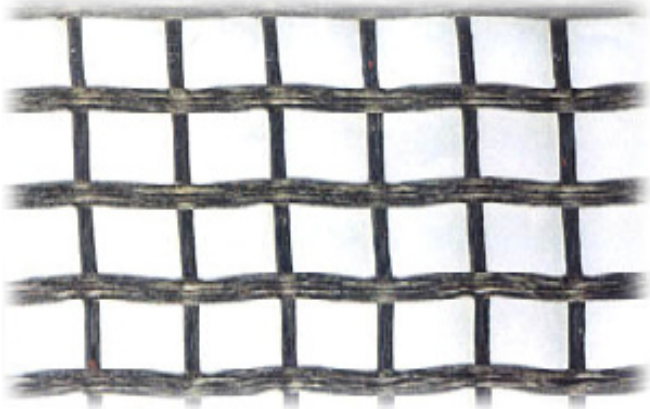


Şekil 2. Tek yönde ekstrüde geogrid



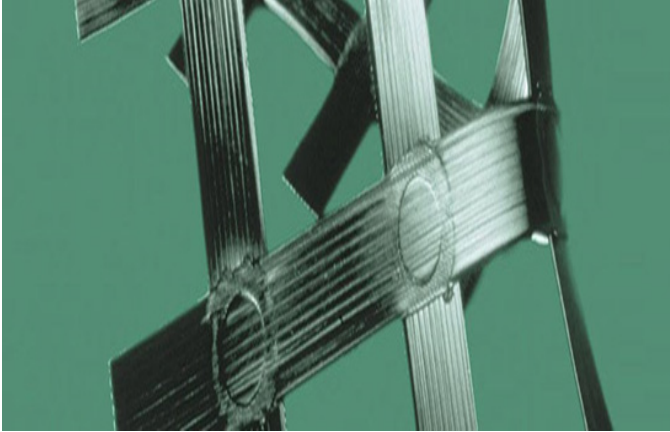
Şekil 3. Çift yönde ekstrüde geogrid

- Dokuma yöntemi ile üretilen, Şekil 4'te Dokuma geogrid türü örneği görölmektedir.



Şekil 4. Dokuma geogrid (Çetin Karagül, 2007)

- Yapıştırma veya kaynak yöntemi ile üretilen Şekil 5'te Kaynaklı geogrid türü örneği görülmektedir.



Şekil 5. Kaynaklı geogrid

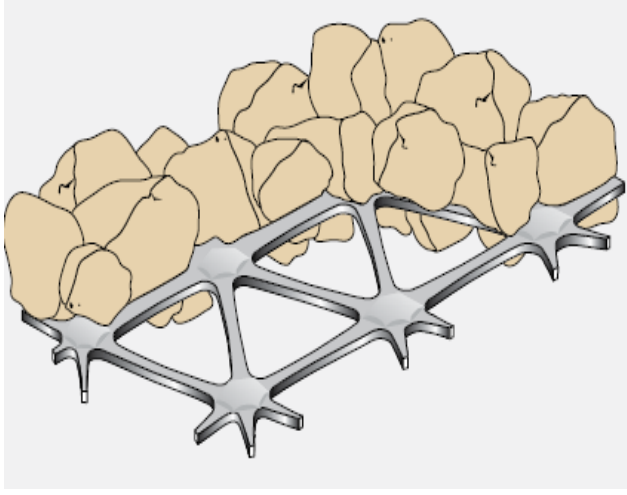
## 2. Açıklık şekline göre geogridler

- Tek yönlü geogridler
- Çift yönlü geogridler
- Üç yönlü geogridler.

Tek ve çift yönlü geogridler her üç üretim yöntemi ile (ekstrüde, dokuma, kaynak) üretilebilirken, üç yönlü geogridler sadece ekstrüde yöntemi ile üretilebilirler (Aydın, 2019).

Üç yönlü geogridler, son yıllarda geliştirilmiş, üzerindeki açıklıklar eşit kenar üçgenlerden oluşan ve yükü üç yönde dağıtma imkânı sağlayan bir geogrid türüdür. İçerisine aldığı zemin danelerini üç yönde çevreleyerek zemine üç yönde çekme dayanımı kazandırdığından dolayı daha güçlü

bir zemin elde edilir (Aydın,2019). Şekil 6’da Üç yönlü geogridin zemin daneleri ile kenetlenmesi görülmektedir.



Şekil 6. Üç yönlü geogridin zemin daneleri ile kenetlenmesi

### 2.3 Geonetler

Polietilenden üretilen bu geosentetik ürünler genellikle drenaj amacı ile kullanılırlar. Geonet üretiminde kullanılacak malzemeler karıştırılıp eritilerek, bir tezgâha gönderilir ve tezgah üzerindeki aparatlar vasıtasıyla iki yönde nervürler oluşturulur. Artan çapa sahip bir boruya bu eritilmiş karışım yerleştirilir, elmas şeklinde açıklıklar oluşturulur, soğutucu tank yardımı ile soğutulduktan sonra boyuna doğrultuda kesilerek geonete şekil verilir (Aydın, 2019). Şekil 7’de Geonet malzeme örneği görülmektedir.



Şekil 7. Geonet malzeme örneği

## 2.4 Geomembranlar

Geomembran Amerikan Standartlarına göre (ASTM D4439-14) ,geotekstil mühendisliği ile ilgili insan yapısı bir proje yapı ve sisteminde sıvı akımını kontrol altına alabilecek kadar düşük geçirgenlikte asfalt, polimer ve bunların karışımından üretilmiş sürekli membran tipi kaplama ve izole bariyeri olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal maddelere karşı dirençli, çekme dayanımı yüksek, geçirimsizliği düşük ve çatlamalara karşı dayanıklı olacak şekilde üretilirler. Geomembranlar daha çok göletlerde, havuzlarda, atıksu arıtma tesislerinde, katı atık sahalarında ve tünellerde kullanılırlar (Livaoğlu, 2016). Şekil 8’de Geomembran örneği görülmektedir.



Şekil 8. Geomembran örneği

## 2.5 Geosentetik kil örtüler (astarlar)

Geosentetik kil örtüler, tipik olarak iki geotekstil arasında ince bir kuru bentonit tabakası içeren ürünlerdir. Bentonit ıslanınca sızdırmaz bir tabaka teşkil eder. Alttaki ve üstteki geotekstil, dikiş veya iğneleme yöntemiyle birbirine tutturulur. Geomembrana yapıştırılmış bentonit tabakası şeklinde de geosentetik kil örtü vardır (Wasti, 2007). İlk kez 1988 yılında ABD’de inşa edilen bir katı atık depolama alanında kullanılan geosentetik kil örtüler akışkanlara karşı hidrolik bariyer görevi görür. Geosentetik kil örtüler; betonit şilteler, kil şilteler ve betonit hasırlar olarak da bilinirler (Benson *et al.*, 2004, Benson *et al.*, 2007, Benson *et al.*, 2010).

## 2.6 Geoboru

Geoborular polimerik malzemeden üretilmiş drenaj amacıyla kullanılan delikli ve deliksiz çeşitleri bulunan sert yüzeyli borulardır (Livaoğlu, 2016). Şekil 9’da Geoboru malzeme örneği görülmektedir.





**Şekil 12.** Geoboru örneği

Geoborular geniş kullanım alanına sahiptirler. Yeraltında bulunan polimerik borulardan özellikle HDPE olanları doğalgaz taşımacılığında kullanılırlar. Endüstri, tarım, taşıma ve drenaj önemli kullanım alanlarındandır. Geoborular genel olarak polivinil klorit (PVC), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polipropilen (PP), polibütilen (PB), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve selüloz asetat bütirit (CAB) gibi malzemelerden üretilmektedirler (Koerner, 2005).

Geoborular, karayolu, demiryolu ve hava alanlarında kenar dreni olarak, tünellerde sızma dreni olarak, istinat duvarlarının arkasında boşluk suyu dreni olarak, zemin ve kaya şevlerindeki sızmalar için kuşaklama dreni olarak, yerçekimi ile akışkan taşıma hatlarında, basınç altındaki kuvvet aktarma hatlarında, atık su drenaj sistemlerinde, kimyasalların taşındığı boru hatlarında, yeraltı suyunda oluşan sızmalar için kuşaklama dreni olarak kullanılmaktadırlar (Erbil, 2009).

## 2.7 Geofom

Kapalı ve içi gaz dolu muhtelif hücrelerin oluşumu ile sonuçlanan ve genleştirme yolu ile elde edilen geosentetik malzemedir. Pek çoğu polimerik veya camsı köpük esaslı olup, polistren köpük kapsamında EPS (expanded polystyrene) ve XPS (extruded polystyrene) gibi ürünleri mevcut olup en yaygın kullanılan türü EPS'dir. Geofomlar geoteknik uygulamalarında özellikle yol üst kaplamalarında ve sığ temellerin altında don etkilerini azaltması, istinat duvarları arkasında itkiyi azaltması, titreşim sönümleyici olması, şev kayması olaylarında kayan kitlenin ağırlığını oldukça azaltması, çok yumuşak zeminler üzerinde oturma problemlerini azaltması nedenleriyle kabul görmüş bir malzemedir. Geofomlar gazlara karşı geçirgen yapıdadır (Yılmaz *et al.*, 2005). Şekil 10'da Geofom bloklar görülmektedir.





Şekil 10. Geofoam bloklar

## 2.8 Geohücreler

Geohücre (geocell) Zemin güçlendirmek, zemindeki oturumları minimize etmek ve erozyon kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan U.V ışınlarına dayanıklı üç boyutlu yapıda geosentetik malzemelerdir. Petek şeklinde açılan bir yapıya sahip olup ve içine dolgu malzemesi doldurulan geosentetik üründür. Şeritlerin ek yerlerinde petekler arasında sıvı akışına izin verilir. Hüresel dolgu sistemi (HDS) olarak da nitelendirilmektedir (Akyıldız, 2019). Şekil 11’de Geohücre ile erozyon kontrolü örneği görülmektedir.

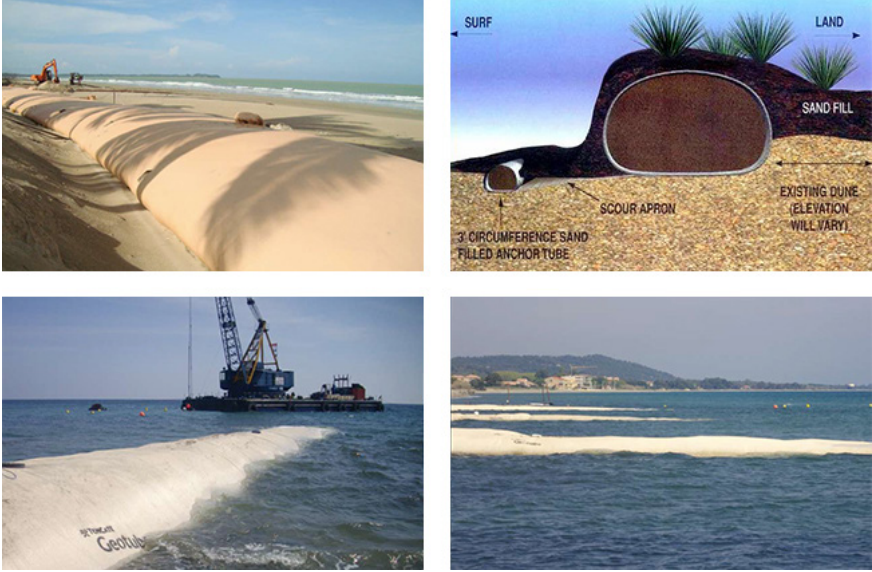


Şekil 11. Geohücre ile erozyon kontrolü

## 2.9 Geotüp

Geotüp kıyı yapılarında erozyona karşı kalıcı ve etkili çözümler sağlamak için geotüpler geliştirilmiştir. Geotüp dokuma geotekstil kumaşların kum, çamur, beton, kil gibi malzemelerle doldurulup bir araya getirilmesi (dikilmesiyle) ile oluşan kapsül şeklindeki elemandır.

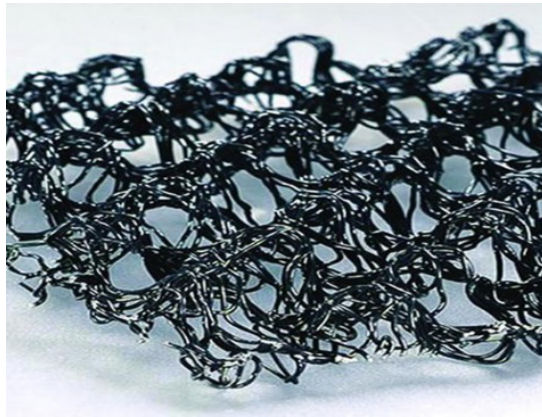
Geotüpler, gözenekli yapıdadırlar (Leshchinsky *et al.*, 1996, Livaoğlu, 2016). Şekil 12’de Kıyı koruma maksatlı geotüp kullanımı görülmektedir.



Şekil 12. Kıyı koruma maksatlı geotüp kullanımı

## 2.10 Geomatlar

Geoörtü olarak da adlandırılan geomatlar bitkilendirme ve erozyon kontrolü amacıyla kullanılır. Üç boyutlu, çok elyaflı, geçirgen ve 1 cm’den daha kalın özelliklere sahiptir. Geoörtünün ömrü ve işlevi şev yüzeyinde bitki tabakası oluşuncaya kadardır (Wasti, 2007). Şekil 13’te Geomat örneği görülmektedir.



Şekil 13. Geomat örneği

## 2.11 Geokompozit

Geokompozitler geosentetik malzemelerin değişik işlevleri göz önüne alınarak birden fazla geosentetiğin bir arada kullanılmasıyla oluşan geosentetik türüdür. Çeşitli geokompozit kombinasyonları şunlardır (Livaoğlu, 2016, Koerner, 2005);

- Geotekstil – geonet kompozitler (geotekstil - geonet – geotekstil), Şekil 14’te Geotekstil- geonet kompozit örneği görölmektedir.



Şekil 14. Geotekstil- geonet kompozit

- Geotekstil – geomembran kompozitler, Şekil 15’te Geotekstil-geomembran kompozit uygulaması görölmektedir.



Şekil 15. Geotekstil- geomembran kompozit uygulaması

- Geotekstil – geogrid kompozitler, Şekil 16’da Geotekstil- geogrid kompozit uygulaması görölmektedir.



Şekil 16. Geotekstil- geogrid kompozit uygulaması

### 3. GEOSENTETİKLERİN İŞLEVLERİ

Geosentetik ürünler bir veya birden fazla işleve (fonksiyona) sahip olabilirler. Geosentetiklerin literatürdeki işlevleri; sızdırmazlık, ayırma, filtrasyon, koruma, güçlendirme, drenaj ve erozyon kontrolü olarak sıralanmaktadır (Wasti, 2007).

#### - Sızdırmazlık (Geçirimsizlik)

Geosentetik malzemede sızdırmazlık işlevi geosentetiğin eksenini boyunca gaz ve sıvı geçişini engellemesi olarak ifade edilebilir. Sızdırmazlık amacıyla en yaygın kullanılan geosentetik malzeme geomembranlardır (Livaoğlu, 2016).

#### - Ayırma

Geosentetiğin herhangi iki malzeme veya zemin türlerinin (katmanlarının) karışmasını önlemek amacıyla kullanılması durumudur. Yaygın olarak kalın taneli ve ince taneli zeminlerin birbirine karışmasını engellemek amacıyla kullanılırken öte yandan da üst yapıdan gelen yükün üniform olarak aktarılmasını sağlar (Livaoğlu, 2016, Yılmaz & Eskişar, 2007).

#### - Filtrasyon

Geosentetik malzeme filtre özelliği sergileyerek suyun akışına izin verirken en küçük dane çapına sahip zeminin geçmesine izin vermez ve sürüklenmesini önler. Filtrasyon amacıyla kullanılan geosentetik ürün ise geotekstildir. Geotekstil malzeme su akımına karşı yerleştirilir ve kullanılacak geotekstilin yüksek poroziteli, uygun gözenek açıklığına sahip ve sıkışmadan az etkilenmesi istenir (Aksoy, 1993, Yılmaz & Eskişar, 2007).

#### - Koruma

Geosentetik, gerilmeyi ve de deformasyonu azaltarak istenilen bir tabakayı veya malzemeyi mekanik zararlara karşı korur. Sıklıkla örgüsüz

geotekstillerin geomembranları delinmeye, yırtılmaya karşı korumasında ve geotekstilin asfalt kaplamayı eski yol kaplamasından korumasında tercih edilir (Wasti, 2007, Ay, 2014).

#### - **Güçlendirme**

Noktasal yükleri eşit bir şekilde geniş bir alana yayarak gerilme kuvvetlerine direnir ve böylece zemini güçlendirir. Geosentetik malzemeler zeminlerin aksine çekme gerilmesi direncine sahiptirler. Yumuşak zeminlerde gerçekleştirilecek yol inşaatlarındaki zemin güçlendirmeye olan etkisiyle beraber agrega tasarrufunu da katkı sağlamış olur (Öztekin, 1992, Yılmaz & Eskişar, 2007)

#### - **Drenaj**

Geosentetiğin, kendi düzlemi boyunca bünyesindeki sıvı veya gazı istenilen çıkışa doğru taşınması işlevidir. Geotekstillere zemin ile kıyaslandığında daha çok geçirgen oldukları söylenebilir. Özellikle gözenekli olduklarında ve yeterli eğim sağlandığında, kendi düzlemlerinde su akımı sağlanabilir (Öztekin, 1992, Aksoy, 1993, Yılmaz & Eskişar, 2007, Ay, 2014).

#### - **Erozyon (zeminden danelerin sökülüp taşınması )kontrolü**

Geosentetiklerin erozyon kontrolü amacıyla rüzgâr, yağmur, dalga, su akımı gibi etkenlerle şev yüzeylerinde, nehir/göl/deniz gibi su kaynakları kıyılarında ve tabanlarında kullanılmasıdır (Wasti, 2007).

### **5. SONUÇLAR**

Geosentetikler, inşaat mühendisliği uygulamalarında ekonomik ve üstün çözümler sağlamaktadır.

Genel olarak geotekstillere koruma, filtrasyon ve ayırma amacıyla, geogridler yapıarda güçlendirme ve iyileştirme amacıyla, geonetler drenaj amacıyla, geohücreler erozyon kontrolü, yüzey ve şev stabilizasyonu sağlamak amacıyla, geomembranlar ise geçirimsizlik amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu yönüyle iş gücü ve kaynak kullanımını açısından verimlilik sağlamaktadırlar.



**KAYNAKLAR**

- S. Gökova, (2018). Karayolu Üstyapılarında Taşıma Gücü Düşük Taban Zeminine Sahip Kesimlerde Geogrid Kullanımının Üstyapı Yapısal Performansına Etkisi, (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- E. Güler, ‘‘Geoteknik mühendisliğinde yeni bir devir başlatan malzeme: Geosentetikler’’, *Zemin mekaniği ve temel mühendisliği 15. Ulusal kongresi*, 16-17 Ekim 2014, Ankara.
- Gencer, G. Eren, M. Yildirim, S. Kaynaklı, M. Palta, O. Cengiz, M.S. Numerical Approach to City Road Lighting Standards, Imeset Book of Abstracts, Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., 12-14 July 2017 Baku.
- P. Livaoğlu, (2016). İller Bankası Uygulamalarında Geosentetikler, (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi
- Y. Wasti, (2007). Geosentetikler Teori ve Uygulama, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- F. Yetiz, (2018) . Akçakale-Ceylanpınar Karayolunda Geofom Ve Zemin Dolgu Alternatifleri Arasındaki Stabilitate Analizi Ve Maliyet Karşılaştırması, (Yüksek Lisans Tezi), Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır
- Efe S. B., (2018),UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2018. V116, #3, pp. 391–406.
- Efe S. B., Aktaş D.D. (2018) Design and analysis of PV fed SRM System, *International Journal of Energy Applications and Technologies* 5 (2), pp. 76-81.
- R.M. Koerner, (1999). *Designing with geosynthetics*, Prentice Hall, New Jersey.
- W.K. Beckham and W.H. Mills, (1935). Cotton-Fabric-Reinforced Roads. *Engineering News Record*, 114 (14), 453-455
- S. Aydın, (2019). Geosentetik Ürünlerin Özellikleri Ve Kullanım Alanları, Geogridlerin Detaylı İrdelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Toros Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin
- O. Özkol, (2006). Geosentetik donatılı istinat yapılarının analizi, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- build-journal. <https://build-journal.ru/tr/kak-ustanovit/geotekstil-iz-chegosdelan-sposoby-primeneniya-geotekstilya-v-landshaftnom/> (Erişim Tarihi: 19.11.2020)
- Tenaxind.com <http://www.tenaxind.com/en/geosynthetics/products/tenax-geogrids.htm> (Erişim tarihi:19.11.2020)
- Archiexpo.com <https://www.archiexpo.com/prod/tenax-uk-ltd/product-70282-1278171.html> (Erişim tarihi:19.11.2020)

B. Çetin Karagül, (2007). Yol Dolgularının Geodrid Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Maccaferri.com <https://www.maccaferri.com.tr/wp-content/uploads/2018/01/geogrid-para-urunleri.jpg> (Erişim tarihi:19.11.2020)

<https://docplayer.fr/61106601-Stabilisation-mecanique-du-ballast-et-sous-ballast-des-voies-ferrees.html> (Erişim tarihi:19.11.2020)

Sjzhuatao.en.made.in-china.com <https://sjzhuatao.en.made-in-china.com/product-group/fqQJUSXvOzkA/Geosynthetics-Material-catalog-1.html> (Erişim tarihi:19.11.2020)

[https://www.solucoesindustriais.com.br/imagem.php?url=images/produtos/imagens\\_10098/p\\_geomembrana-pead-7.jpg](https://www.solucoesindustriais.com.br/imagem.php?url=images/produtos/imagens_10098/p_geomembrana-pead-7.jpg) (Erişim tarihi:19.11.2020)

C. Benson, T. Abichou, H. Jo, “Forensic Analysis of Excessive Leakage from Lagoons Lined with a Composite GCL”, Geosynthetics International, 11(3), 242-252, 2004.

C. Benson, P. Thorstad, H. Jo and S. Rock, “Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill Final Cover”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133(7), 814-827, 2007.

C. Benson, A. Ören and W. Gates, “Hydraulic Conductivity of Two Geosynthetic Clay Liners Permeated with a Hyperalkaline Solution”, Geotextiles and Geomembranes, 28(2), 206-218, 2010.

Alibaba.com <https://turkish.alibaba.com/g/hdpe-pipes-300mm.html> (Erişim tarihi:20.11.2020)

R.M. Koerner, “Designing With Geosynthetics” (Fifth Edition), New York: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 250-280, 2005

S. Erbil, (2009). Geosentetik Ürünlerin Türkiye’deki Uygulamaları, Gelişme Potansiyeli, Sağlanan Faydalar ve Mevcut Sorunlar İle Ekonomikliği Üzerine Genel Bir İnceleme, (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir

S. Yıldırım, I. Yapıcı, S. Atıç, M. Eren, O. Palta, Ç. Cengiz, MS. Cengiz, Y. Yurci. (2017) Numerical Analysis of Productivity and Redemption Periods in Illumination, Imeset Book of Abstracts, Int. Mult. Sci. Eng. Tech., 1 (1), pp. 12-14.

H.R. Yılmaz, T. Eskişar, P. Aklık, “Geofoam malzemesinin geoteknik mühendisliğinde kullanım alanları ve önemi”, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Haziran-2005, s. 14-19, 2005.

<https://polarboard.com.au/> (Erişim tarihi:20.11.2020)

M.H. Akyıldız, “ Geosentetik türlerinin inşaat mühendisliğindeki uygulamaları ve sağladığı kolaylıklar”, DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2 (2019) : 791-796, 2019

<https://www.movea.com.tr/hucresel-dolgu-sistemi-nedir/>

D. Leshchinsky, O. Leshchinsky, H.I. Ling, P.A. Gilbert, "Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some Design Aspects", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No.8, 1996.

[arieng.com/urun/12/geotup-geotekstil-tupler?sID=77](http://arieng.com/urun/12/geotup-geotekstil-tupler?sID=77) (Erişim tarihi:20.11.2020)

<http://www.psy.co.ir/fa/product/7>

<http://www.psy.co.ir/images/product/2017/06/25/Geomat-45111.jpg>

<https://images.app.goo.gl/D3dLF2KnySMJ7jz77>

<https://images.app.goo.gl/As7G3Lpy5B3oL81e6>

H.R. Yılmaz ve T. Eskişar, "Geosentetik Ürünlerin Geoteknik Mühendisliği Sorunlarının Çözümünde Kullanımı Ve Sağlanan Faydalar", İMO Adana Şubesi 2. Geoteknik Sempozyumu, 22-23 Kasım 2007, Adana

İ.M. Aksoy, (1993). Modern Yol İnşaatında Geotekstil ve Geogrid Uygulaması Konularında Araştırma, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İ. Ay, (2014). Geosentetik Malzemelerin Demiryollarında Kullanımı Ve Balast-Alt Balast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

A. Öztekin, (1992). Geotekstil Üzerine Bir İnceleme, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

S. Archer, "Subgrade Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids", Professional Development Hours Dergisi, Aralık Sayısı, 1-12, 2008.

A. Tunç, "Yol Mühendisliğinde Geoteknik Uygulamaları", Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2002.

B. Akın, "Yol Üst Yapısında Geosentetiklerin Kullanımı", Geosyntheticics in Pavements, 2015.

S.F. Brown, Geosyntheticics in Asphalt Pavements, IGS, 2002

N.W.M. John, (1987). Geotextiles, Blackie and Son Ltd. Glasgow, UK, 347p.

E. J. Yoder and M. W. Witzcak, (1975), "Principles of Pavement Design" (2 nd ed.), New York: John Wiley & Sons.

R. R. Berg, B. R. Christopher and S. Perkins, Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures, GMA, 2000.





# Bölüm 24

## GEOSENTETİĞİN KARAYOLU YAPISINDAKİ UYGULAMALARI



*Gamze GENCER<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Bitlis Eren University Technical Sciences Vocational School, 13000, Bitlis  
ggencer@beu.edu.tr



## 1. GİRİŞ

Geosentetikler, inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Geosentetik malzemelerin ulaşım alanında ilk kez 1926 yılında Güney ‘‘Carolina’’ Karayolunda kullanılmıştır. Dokuma malzemelerinin, özelliklerini kaybetmeyene kadar yol yapısında oluşabilecek çökme, bozulma, sökülme gibi bozulmaları azalttığı tespit edilmiştir (Koerner 1999, Beckham & Mills 1935).

Bu çalışmada, genel anlamda geosentetik malzemelerin karayolu ulaşım sisteminde kullanıldığı yerlere, kullanılma nedenlerine, kullanıldığında ne gibi faydalarının olacağına kısaca değinilmiştir.

## 2. KARAYOLU UYGULAMALARI

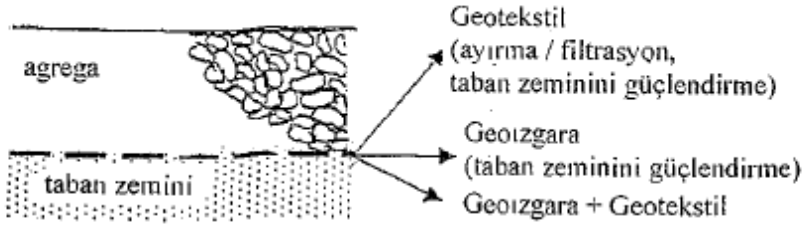
### 2.1 Kaplamasız Yollar

Kaplamasız yollar (temporary unpaved roads) üst yapı bakımından tesviye edilmiş taban üzerinde sadece bağlayıcısız granüler bir tabakadan oluşur. Servis yolları, şantiye yolları, köy/orman yolları gibi daha düşük standarttaki yollarda kaplamasız yol uygulaması tercih edilir (Wasti, 2007)

Geotekstiller örgülü ve örgüsüz olmak üzere 2’ye ayrılırlar.

#### 2.1.1 Kaplamasız Yollarda Kullanılan Geosentetik Malzemelerin Konumları ve İşlevleri

Taban zemininin yüksek plastisiteli kil (CH) olması halinde granüler tabaka ile zayıf (yumuşak) zemin tabakasının karışma olasılığı artar. Taban zemini ve agrega tabakası arasına geozgara konularak geozgaranın agrega danelerini kenetlemesi sağlanır. Dingil yükleriyle yumuşak zemin yukarı doğru agrega içerisine itilirken granüler tabakadaki agregalar da aşağıya yönde hareket ederek yumuşak (zayıf) zemine batar. Başlangıçtaki agrega kalınlığını korumak için yumuşak taban zemini – granüler tabaka arasına ayırma işlevli geotekstil kullanılabilir. Uzun süren yağışlar ve yer altı su düzeyinin yüksek olması nedenleriyle doymun hale gelen zeminlerde kullanılacak geotekstilin, dinamik trafik yükleri altında oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi için hem drenaja fırsat vermesi hem de ince daneli zemin partiküllerinin granüler tabakaya geçişini engellemesi gerekir İdeal sonuçlar almak geotekstil altta olacak şekilde geotekstil - geozgara kompoziti kullanılabilir (Şekil 1)(Wasti, 2007).



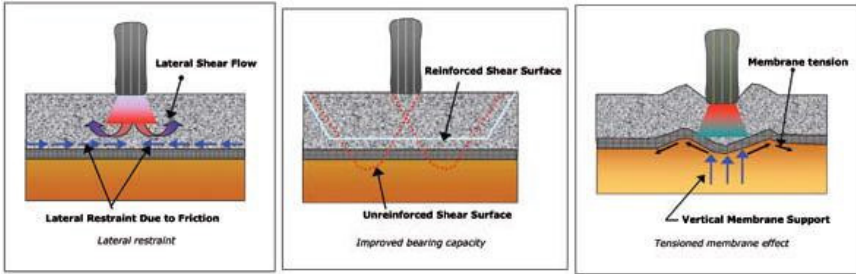
Şekil 1. İyi agrega, yumuşak taban zemini (Wasti, 2007)

Zayıf (yumuşak) taban zemini ve granüler tabaka arasında yerleştirilen geogrid (geozgara), geotekstil veya geotekstil-geogrid kompozit, aşağıdaki mekanizmalar ile taban zemininin stabilizasyonunu sağlar.

a - taban zemini, granüler tabaka ve geosentetik arasında sürtünmeden kaynaklı granüler temel ve taban zemininin yanal sınırlanması (Şekil 2a.)

b - muhtemel göçme yüzeyinin zayıf taban zemini üzerindeki daha yüksek kayma dayanımlı yüzeylere çekilerek taşıma gücünün artması (Şekil 2b.)

c - gerilme altında membran etkisi (Şekil 2c.)



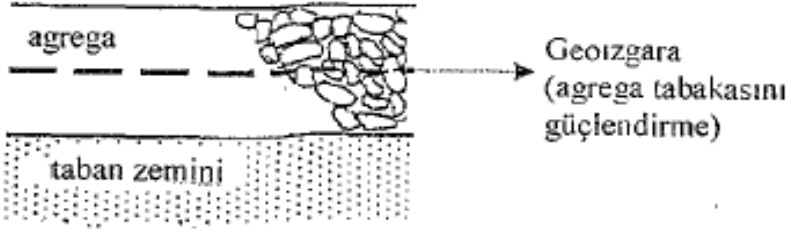
Şekil 2. (a)

(b)

(c)

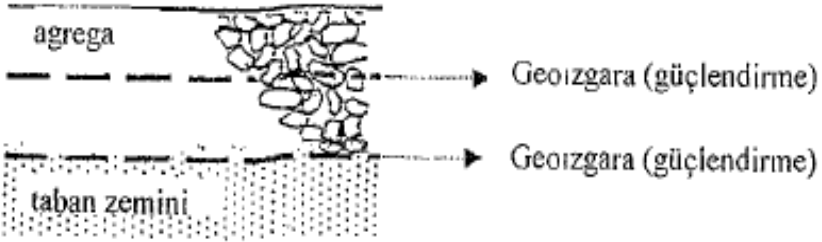
(Archer, 2008).

- Sağlam sert taban zeminine ve nisbeten düşük kalite granüler tabakaya sahip kaplamasız yollarda, granüler tabakanın stabilizasyonu ile tekerlek izi derinliklerinin kontrolü sağlanmak istendiğinde güçlendirici işlevine sahip geosentetikler (genellikle geozgara) kullanılır. Genellikle de granüler tabakanın ortasına yerleştirilir (Şekil 3) (Wasti, 2007).



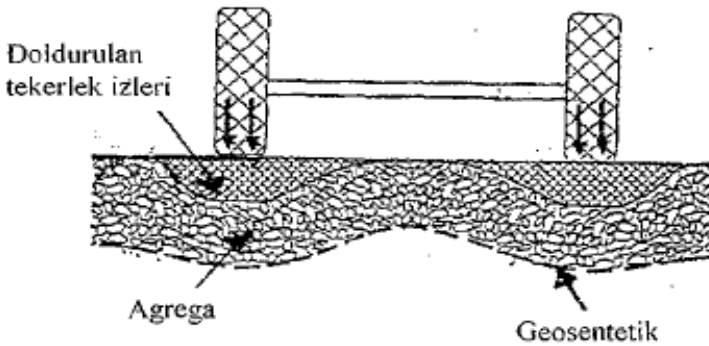
Şekil 3. Zayıf agrega, sert taban zemini (Wasti, 2007)

- Zayıf taban zemini ve düşük kalite granüle tabaka durumunda, hem taban zemini-granüler tabaka arasına hem de granüler tabakanın içerisine geosentetik konulabilir (Şekil 4) (Wasti, 2007)



Şekil 4. Zayıf agrega, zayıf taban zemini (Wasti, 2007)

Kaplamasız yollarda, geosentetiklerin derin tekerlek izi çöküntüleri arasındaki alanda açığa çıkmaması ve /veya yüzeye yakınlaşmaması amacıyla yüzeyin tesviyesi yerine çöküntülerin agrega ile doldurulması önerilir. Bu tür bir bakımlardan sonra geosentetiklerin kaplamasız yolların taşıma gücünü önemli derecede iyileştirdiği belirlenmiştir (Şekil 5) (Wasti, 2007).

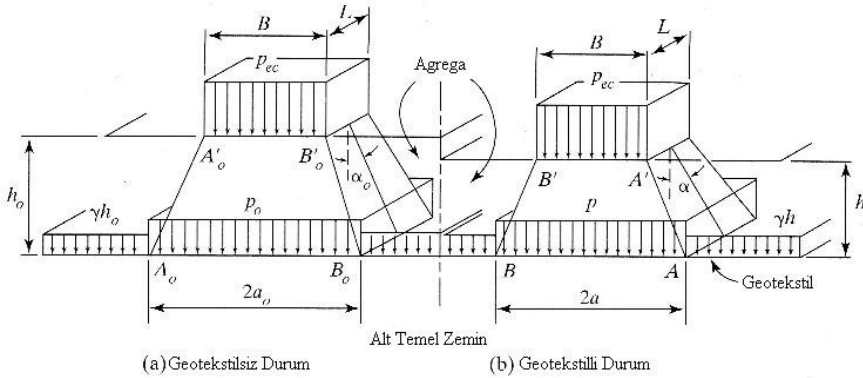


Şekil 5. Kaplamasız yollarda geosentetik konularak önerilen bakım yöntemi (Wasti, 2007)

### 2.1.2 Kaplamasız Yol Tasarım Metodları

Kaplamasız yollarda granüler tabakanın kalınlığı, taşıt yüklerinin taban zemininde oluşturduğu gerilmelerin, zeminin taşıma gücünün altında kalacağı şekilde tasarlanmalıdır. Zemin taşıma gücü değerleri azaldıkça tekerleklerden gelen yükleri daha geniş alana yaymak gerekir. Bu nedenle tabaka kalınlığı arttırılır ve dayanım açısından daha iyi granüler tabaka tercih edilir (Wasti, 2007)

Şekil 6'da gösterilen, Giroud ve Noiray tarafından kullanılan geometrik modelde, BxL temas yüzeyi (tekerlek iz düşüm alanı) olarak kabul edilen alan,  $p_{ec}$  bu alana etki eden tekerlek yükü (üniform etkidiği varsayılan eşdeğer temas basıncı),  $h_0$  geotekstilsiz durumdaki agrega kalınlığı ve  $h$  da geotekstilli durumdaki agrega kalınlığı olarak kabul edilmiştir. Bu geometriye göre, zemin alt tabakasında ortaya çıkan gerilmeler, geotekstilsiz durumda  $p_0$ , geotekstilli durumda ise  $p$  olarak belirlenmiştir (Koerner, 2005).



Şekil 6. Agrega tabakalarına göre yük dağılımı (Koerner, 2005).

$$P = 4 \times A_c \times P_c \quad (2.1)$$

$P$  = Dingil Yüğü

$A_c$  = Bir tekerin alanı

$P_c$  = Lastik hava basıncı

$$L \times B = 2 \times A_c \times \sqrt{2} \quad (2.2)$$

$$P = 2 \times L \times B \times P_c \quad (2.3)$$

Bağıntı (2.1) ve (2.3) eşitlenir ise ;

$$P_{ec} = \frac{P_c}{\sqrt{2}} \text{ bağıntısı elde edilir.} \quad (2.4)$$

$$p_0 = \frac{P}{2x(B+2h_0 \tan \alpha) x(L+2h_0 \tan \alpha)} + \gamma h_0 \quad (2.5)$$

$$p = \frac{P}{2x(B+2htana) x(L+2htana)} + \gamma h \quad (2.6)$$

Zeminin tam doygun olduğu kabul edilerek, zemin kayma mukavemetinin, zeminin drenajsız kayma mukavemetine eşit olacağı ( $\tau = C_u$ ) göz önüne alınmıştır. Zemin Mühendisliği'nde kullanılan yüzeysel temel teorisi bu durum için de kullanılabilir. Bu teoriye göre gerilmenin geotekstilsiz durumda zeminin elastik limit taşıma gücüne eşit olması halinde,

$$p_0 = \pi c_u + \gamma h_0 \quad (2.7)$$

gerilmenin geotekstilli durumda zeminin nihai taşıma gücüne eşit olması halinde,

$$p = (\pi + 2)c_u + \gamma h \quad (2.8)$$

olarak kabul edilir (Tunç, 2002).

Geotekstil kullanılmaması durumunda (2.5) ve (2.7) birbirine eşitlenirse (2.9) elde edilir.

$$\pi c_u = \frac{P}{2x(B+2h_0 \tan \alpha) x(L+2h_0 \tan \alpha)} \quad (2.9)$$

Geotekstil kullanılması durumunda (2.6) ve (2.8) birbirine eşitlenirse (2.10) elde edilir.

$$(\pi + 2)c_u = \frac{P}{2x(B+2htana) x(L+2htana)} \quad (2.10)$$

Elde edilen bu bağıntılar proje ömrü içerisinde; dingil geçiş sayısı 1-20, standart dingil yükü 80kN ve düşük trafik yoğunluğuna sahip yollar içindir. Eğer daha fazla olur ise yine aynı formül kullanılır. Fakat bir korelasyon kullanılır. N(geçiş sayısı) max 10000 olmak üzere geotekstil olmaması durumunda agrega kalınlığı;

$$h'_0 = \frac{125 \log N - 294(r - 0,075)}{c_u^{0,68}} \quad (2.11)$$

r= kabul edilebilir tekerlek izi derinliği

Yüksek kapasiteli bir yolda geosentetik kullanılması durumundaki agrega kalınlığını  $h'$  bulmak için;

Normal standart yollar için  $\Delta h$  bulunur. Daha sonra bağıntı (2.11)'den  $h'_0$  bulunur.

$$\Delta h = h'_0 - h' \quad (2.12)$$

$\Delta h$  ve  $h'_0$  bağıntı (2.12) 'de yerine bırakılarak  $h'$  bulunur.



## 2.2 Kaplamalı Yollar

Kalıcı kaplamalı yollar uzun hizmet ömrüne sahip olacak şekilde tasarlanır. Yol üst yapısı yaygın olarak taban zemini üzerinde sırasıyla granüler alt temel tabakası, granüler temel tabakası ve kaplama tabakasından (beton veya asfalt kaplama) oluşur. Granüler temel tabakada kullanılan agreganın kalitesinin iyi olması ve zeminin taşıma gücü açısından sağlam olması durumunda alt temel tabakasına gerek kalmayabilir. Kaplama tabakasında sıcak bitümlü malzeme kullanılması durumunda kaplama tabakası aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde yapılır (Wasti, 2007).

Geosentetik Kullanılarak Yapılan Güçlendirme Çeşitleri (Akın, 2015):

- a) Taban Zemini Güçlendirilmesi,
- b) Temel/Alt temel Tabakası Güçlendirilmesi,
- c) Taban Zemini ve Temel Tabakası Güçlendirilmesi,
- d) Kaplama (Asfalt) Tabakası Güçlendirilmesi,
- e) Kaplama (Asfalt) Tabakası Takviyesinde.

### a) Taban Zemini Güçlendirilmesi;

Taban zemini güçlendirmesinde zeminin CBR değeri belirleyicidir. CBR değeri  $< 3$  olan zeminler zayıf zemin,  $3 \leq \text{CBR} \leq 8$  olan zeminler orta dayanımlı zemin, CBR değeri  $> 8-10$  olan zeminler sağlam zemin olarak gruplandırılmaktadır (Akın, 2015).

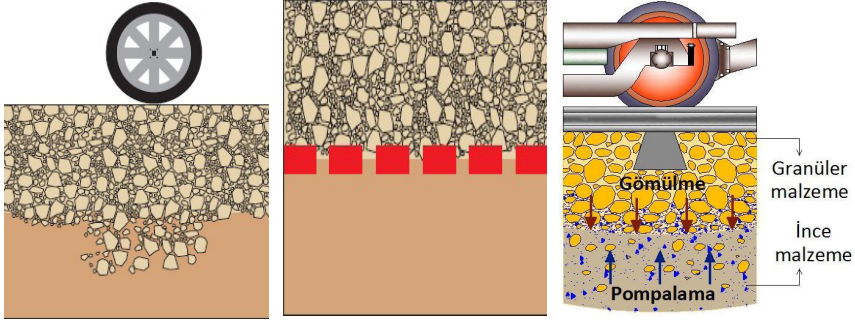
CBR değeri  $> 8-10$  olan taban zeminlerinin geosentetik ürünler kullanılarak güçlendirilmesi pek de mantıklı değildir (Akın, 2015).

CBR değeri  $\leq 2-3$  olan taban zeminlerinin güçlendirilmesi için; hem ayırma amaçlı geotekstil, hem de güçlendirme amaçlı geogrid (geoiçgara) veya geocellin (geohücre) birlikte kullanılması tavsiye edilmektedir (Akın, 2015).

Kaplamasız yollarda müsaade edilebilir tekerler izi derinliği 75 mm'ye kadar çıkarken kaplamalı yollarda bu değer 50 mm ile sınırlıdır (Brown, 2002). Bu nedenle kaplamalı yollarda, çekme dayanımı daha yüksek veya çekme elastisite modülü yüksek olan geosentetik ürünler tercih edilmelidir (John, 1987)

Zayıf taban zeminine sahip kaplamalı yollarda aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi agrega ve alttaki zayıf zeminin karışabilir. Tekerlek geçişleri ile uygulanan dinamik yüklerin etkisi altında yumuşak zemin yukarı doğru agrega içine itilirken agrega da aşağı doğru hareket ederek yumuşak zemine batar. Teorik olarak agregaya ağırlıkça yaklaşık %20 yumuşak zemin karışması halinde, agreganın taşıma gücünü yumuşak zeminin taşıma gücü seviyelerine düşüğü kabul edilir (Yoder and Witczak, 1975).

Zayıf taban zemini (Yumuşak taban zemini) ve granüler tabaka arasına “ayırıcı” geotekstil yerleştirildiği zaman Şekil. 7’de görüldüğü gibi agrega kirliliği (kontaminasyonu) önlenip, başlangıçtaki agrega kalınlığı korunur (Akın, 2015).



Şekil 7. Geosentetiğin Ayırma Fonksiyonu

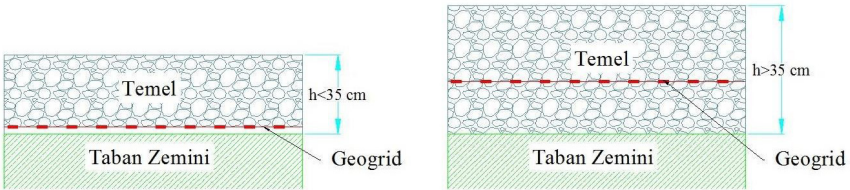
Taban zeminini geosentetik ile güçlendirmenin diğer bir yararı ise henüz yol yapım aşamasındayken ağır inşaat makinelerinin sebep olacağı tekerlek izi çöküntülerini minimize etmesidir (Akın, 2015).

### b) Temel/Alt temel Tabakasının Güçlendirilmesi

Bu uygulamada geosentetiğin esnek üstyapıda granüler temel/alt temel alt kısmına veya içine yerleştirilerek,

- i. Üstyapının tabaka kalınlıklarında değişiklik yapmadan yolun hizmet ömrünü (service life) uzatmak (tekerlek izi oluşumlarını azaltmak)
- ii. hizmet ömründe değişiklik yapmadan temel-alt temel tabaka kalınlıklarını azaltmak (ekonomiklik sağlamak)
- iii. Her ikisini yerine getirmesi yani hem tabaka kalınlığını azaltmak hem de hizmet ömrünü uzatmak amaçlanır (Akın, 2015; Berg *et al.* 2000).

Hem temel tabakasının güçlendirilmesi hem de tekerlek izi oluşumlarının kontrolü amacıyla geogrid/geocellin en ideal yerleştirilme konumu Şekil 8’de verilmiştir (USACE: US Army Corps of Engineers) (Akın, 2015).



Şekil 8. Geogrid/geocellin en ideal yerleştirilme konumu

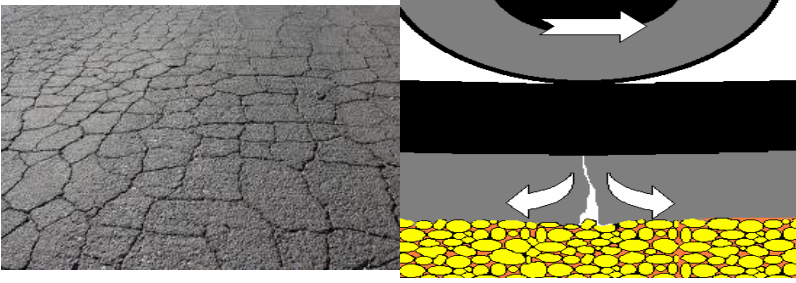
### c) Taban Zemini ve Temel Tabakasının Birlikte Güçlendirilmesi

❖ CBR değerleri  $< 2-3$  olan (düşük dayanımlı) taban zeminlerinin güçlendirilmesi için taban zemini ile agrega tabakası arasında geotekstil ve geogrid birlikte kullanılabilir (Akın, 2015).

❖ Ayrıca üstyapıdaki tekerlek izi oluşumları da kontrol altına almak amacıyla temel tabakası içinde yada altında da geogrid kullanılabilir (Akın, 2015).

### d) Kaplama (Asfalt) Tabakasının Güçlendirmesi

Kaplama tabakasında kullanılan geosentetiklerin türünün ve konumunun seçimi kaplamalardaki çatlak ve tekerlek izi oluşum mekanizmalarını kontrol etmeye yöneliktir (Brown, 2002). Klasik yorulma çatlakları asfalt tabakalarda ve kompozit kaplamalarda asfalt tabaka altındaki çimento bağlayıcılı tabakalarda tekrarlı trafik yükleri nedeniyle oluşur (Akın, 2015). Şekil 10'da Yorulma çatlakları görülmektedir.



Şekil 10. Yorulma çatlakları

Bu tür oluşan çatlaklar genellikle çekme birim uzamalarının yüksek değerlere ulaştığı alt seviyede başlar ve zaman içerisinde tabaka boyunca yüzeye doğru ilerleyerek;

- ❖ tabakanın dayanımını azalmasına,
- ❖ yük yayma etkinliğini azalmasına,
- ❖ çatlaklardan su girmesiyle daha alttaki tabakaları/tabana zeminini zayıflamasına neden olur (Akın, 2015).

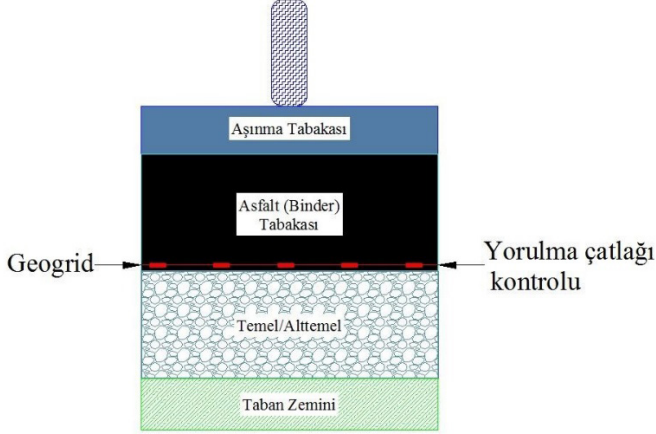
Kaplamalı yollarda çatlak ve tekerlek izi oluşum mekanizmaları doğrultusunda güçlendirme işlevli geosentetik kullanımıyla ilgili öneriler şöyle sıralanabilir.

❖ Asfalt kaplamaların güçlendirilmesinde kullanılan en etkili geosentetik ürün yüksek çekme dayanımına sahip rijit geogridlerdir.

❖ Güçlendirme işlevli geosentetik malzeme için en ideal yer üstyapıda kontrol edilmek istenen deformasyonun meydana geldiği yere en yakın olan yerdir (Brown, 2002).

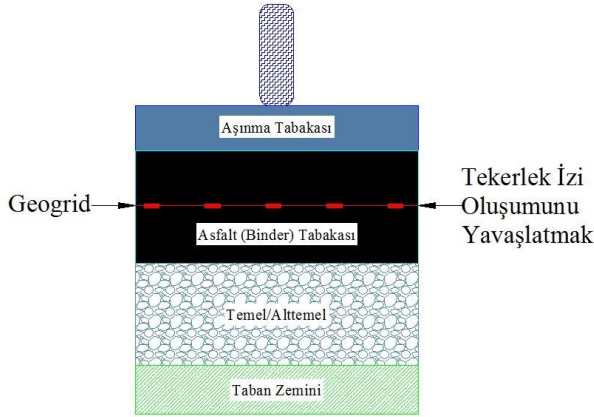
Bu doğrultuda:

❖ Yorulma çatlaklarını kontrol altına almak amacıyla kullanılan geozgaralar, çekme gerilmelerinin ve deformasyonlarının yüksek olduğu asfalt tabakasının altına yakın bir konumda yerleştirilmelidirler (Şekil 11) (Akın, 2015).



Şekil 11. Yorulma çatlakları kontrolü

❖ Asfalt tabakasındaki tekerlek izi oluşumlarını yavaşlatmak amacıyla kullanılan geozgaraların asfalt tabakasının üst yarısına yerleştirilmesi önerilir (Şekil. 12)(Akın, 2015).



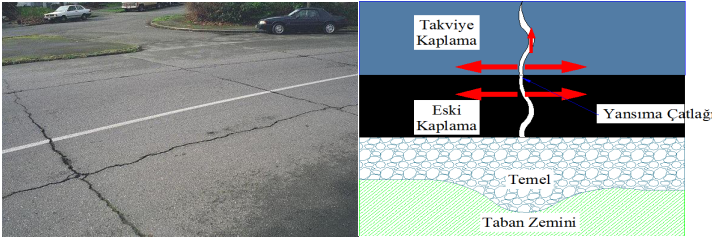
Şekil 12. Tekerlek izi oluşumlarını azaltmak için geozgara uygulaması

Asfalt tabakasında güçlendirme işlevli geozgara kullanımıyla tabaka kalınlığında azaltılmaya yönelik bir esnek üstyapı projelendirmesi yöntemi mevcut olmayıp kaplamanın hizmet ömrü uzatılarak ekonomiklik sağlanabilir (Akın, 2015).

Geogrid yorulma çatlaklarının oluşmasını önlemez fakat ilerlemesini kontrol ederek çatlama nedeniyle kaplama göçmesine sebep olan tekrarlı yük sayısını yaklaşık 10 kata varan mertebelerde artırır (Brown, 2002).

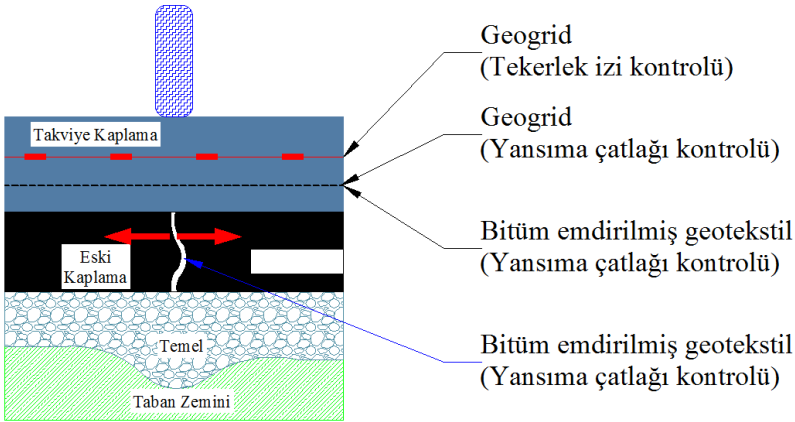
### e) Kaplama (Asfalt) Tabakasının Takviyesi

Kaplama tabakasında meydana gelen çatlaklar ve tekerlek izleri zamanla yolun güvenliğini ve konforunu tehdit eder. Bu durumda iyileştirmeye gidilir ve bu iyileştirmelerden biride mevcut eskimiş kaplamanın üstüne yaklaşık 25- 100 mm kalınlığında Bitümlü Sıcak Karışımdan oluşan yeni bir asfalt kaplama tabakası yapılır. Bu tabaka “TAKVİYE TABAKASI” olarak adlandırılmaktadır (Akın, 2015). Eski kaplamadaki çatlakların zaman içerisinde üstteki takviye tabakasına doğru ilerlemesine “YANSIMA ÇATLAĞI” adı verilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Yansımaya çatlak

Yansımaya çatlaklarını kontrol altına almak ve takviye tabakasının hizmet ömrünü uzatmak için asfalt takviye tabakalarının altına bitüm emdirilmiş geotekstil veya geozgara konulur. Bitüm emdirilmiş geotekstil hem sızdırmazlık fonksiyonuna sahip olmakta hem de mevcut/eski kaplamayı takviye tabakasına bağlayan bir ara yüz elemanı oluşturmaktadır (Şekil 14) (Akın, 2015).



Şekil 14 Geotekstil + Geogrid kompoziti kullanılarak Yansımaya Çatlaklarının kontrolü

### 3.UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Mevcut yola önce bitüm püskürtülür, daha sonra üzerine geotekstil yada geotekstil+geogrid kompoziti serilir (Şekil 35).



*Şekil 15. Bitüm püskürtülmüş mevcut yolun üzerine geotekstil + geogrid kompozitinin serilmesi*

### 5. SONUÇLAR

Geosentetikler, inşaat mühendisliği uygulamalarında ekonomik ve üstün çözümler sağlamaktadır. Geosentetiklerin kaplamalı ve kaplamasız yollarda uygulamalarına rastlanmaktadır. Karayolu ulaşımında güçlendirme, filtrasyon ve/veya ayırma, drenaj vb. amaçlarla hem mevcut yolların onarımı işlerinde hem de yeni yolların yapımında geosentetikler kullanılır. Bu yönüyle iş gücü ve kaynak kullanımı açısından verimlilik sağlamaktadırlar.



## KAYNAKLAR

- S. Gökova, (2018). Karayolu Üstyapılarında Taşıma Gücü Düşük Taban Zeminine Sahip Kesimlerde Geogrid Kullanımının Üstyapı Yapısal Performansına Etkisi, (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- E. Güler, “Geoteknik mühendisliğinde yeni bir devir başlatan malzeme: Geosentetikler”, *Zemin mekaniği ve temel mühendisliği 15. Ulusal kongresi*, 16-17 Ekim 2014, Ankara.
- Gencer, G. Eren, M. Yildirim, S. Kaynaklı, M. Palta, O. Cengiz, M.S. Numerical Approach to City Road Lighting Standards, Imeset Book of Abstracts, Int. Conf. Mult. Sci. Eng. Tech., 12-14 July 2017 Baku.
- P. Livaoğlu, (2016). İller Bankası Uygulamalarında Geosentetikler, (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi
- Y. Wasti, (2007). Geosentetikler Teori ve Uygulama, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- F. Yetiz, (2018) . Akçakale-Ceylanpınar Karayolunda Geofoam Ve Zemin Dolgu Alternatifleri Arasındaki Stabilitate Analizi Ve Maliyet Karşılaştırması, (Yüksek Lisans Tezi), Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır
- B. Çetin Karagül, (2007). Yol Dolgularının Geodrid Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- C. Benson, T. Abichou, H. Jo, “Forensic Analysis of Excessive Leakage from Lagoons Lined with a Composite GCL”, *Geosynthetics International*, 11(3), 242-252, 2004.
- C. Benson, P. Thorstad, H. Jo and S. Rock, “Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill Final Cover”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 814-827, 2007.
- Efe S. B., (2018), UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2018. V116, #3, pp. 391–406.
- Efe S. B., Aktaş D.D. (2018) Design and analysis of PV fed SRM System, *International Journal of Energy Applications and Technologies* 5 (2), pp. 76-81.
- R.M. Koerner, (1999). *Designing with geosynthetics*, Prentice Hall, New Jersey.
- W.K. Beckham and W.H. Mills, (1935). Cotton-Fabric-Reinforced Roads. *Engineering News Record*, 114 (14), 453-455.
- S. Aydın, (2019). Geosentetik Ürünlerin Özellikleri Ve Kullanım Alanları, Geogridlerin Detaylı İrdelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Toros Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin

- O. Özkol, (2006). Geosentetik donatılı istinat yapılarının analizi, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- B. Çetin Karagül, (2007). Yol Dolgularının Geodrid Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- C. Benson, T. Abichou, H. Jo, “Forensic Analysis of Excessive Leakage from Lagoons Lined with a Composite GCL”, *Geosynthetics International*, 11(3), 242-252, 2004.
- C. Benson, P. Thorstad, H. Jo and S. Rock, “Hydraulic Performance of Geosynthetic Clay Liners in a Landfill Final Cover”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 814-827, 2007.
- C. Benson, A. Ören and W. Gates, “Hydraulic Conductivity of Two Geosynthetic Clay Liners Permeated with a Hyperalkaline Solution”, *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 206-218, 2010.
- R.M. Koerner, “Designing With Geosynthetics” (Fifth Edition), New York: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 250-280, 2005
- S. Erbil, (2009). Geosentetik Ürünlerin Türkiye’deki Uygulamaları, Gelişme Potansiyeli, Sağlanan Faydalar ve Mevcut Sorunlar İle Ekonomikliği Üzerine Genel Bir İnceleme, (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- S. Yıldırım, I. Yapıcı, S. Atıç, M. Eren, O. Palta, Ç. Cengiz, MS. Cengiz, Y. Yurci. (2017) Numerical Analysis of Productivity and Redemption Periods in Illumination, *Imeset Book of Abstracts, Int. Mult. Sci. Eng. Tech.*, 1 (1), pp. 12-14.
- H.R. Yılmaz, T. Eskişar, P. Aklık, “Geofoam malzemesinin geoteknik mühendisliğinde kullanım alanları ve önemi”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Haziran-2005*, s. 14-19, 2005.
- M.H. Akyıldız, “ Geosentetik türlerinin inşaat mühendisliğindeki uygulamaları ve sağladığı kolaylıklar”, *DÜMF Mühendislik Dergisi* 10:2 (2019) : 791-796, 2019
- D. Leshchinsky, O. Leshchinsky, H.I. Ling, P.A. Gilbert, “Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some Design Aspects”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No.8, 1996.
- H.R. Yılmaz ve T. Eskişar, “Geosentetik Ürünlerin Geoteknik Mühendisliği Sorunlarının Çözümünde Kullanımı Ve Sağlanan Faydalar”, *İMO Adana Şubesi 2. Geoteknik Sempozyumu*, 22-23 Kasım 2007, Adana
- İ.M. Aksoy, (1993). Modern Yol İnşaatında Geotekstil ve Geogrid Uygulaması Konularında Araştırma, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İ. Ay, (2014). Geosentetik Malzemelerin Demiryollarında Kullanımı Ve Balast-Alt Balast Tabaka Kalınlıklarının Azaltılması, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul



- A. Öztekin, (1992). Geotekstil Üzerine Bir İnceleme, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- S. Archer, "Subgrade Improvement for Paved and Unpaved Surfaces Using Geogrids", Professional Development Hours Dergisi, Aralık Sayısı, 1-12, 2008.
- A. Tunç, "Yol Mühendisliğinde Geoteknik Uygulamaları", Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2002.
- B. Akın, "Yol Üst Yapısında Geosentetiklerin Kullanımı", Geosynthetics in Pavements, 2015.
- S.F. Brown, Geosynthetics in Asphalt Pavements, IGS, 2002
- N.W.M. John, (1987). Geotextiles, Blackie and Son Ltd. Glasgow, UK, 347p.
- E. J. Yoder and M. W. Witzak, (1975), "Principles of Pavement Design" (2 nd ed.), New York: John Wiley & Sons.
- R. R. Berg, B. R. Christopher and S. Perkins, Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures, GMA, 2000.

# Bölüm 25

## ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER



*Mehmet Arif KAYA<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Arif KAYA, Yalova Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü,  
marifkaya@yalova.edu.tr



## Giriş

Son yıllarda daha hafif, daha güçlü ve daha güvenilir malzemelere olan talep, çok işlevli malzemeler adı verilen yeni bir malzeme grubunun ortaya çıkmasına sebep olduğu görülmektedir. Dış uyarınları algılama, işleme ve bunlara yanıt verme becerisine sahip bu tür malzemelerin belirli bir alt grubuna akıllı malzemeler denir. Akıllı malzemeler, çevresel koşulları algılayarak ve bunlara tepki vererek özelliklerini değiştirebilen mühendislik ürünü malzemelerdir (Arun, Chakravarthy, Arockiakumar, & Santhosh, 2018).

Akıllı malzemeler, belirli fiziksel veya kimyasal özelliklerin değiştirilmesi ile belirli bir uyarana uygun şekilde yanıt verebilme özelliğine sahiptirler. Teknik olarak Uyarana Tepki Veren Materyaller (Stimulus Responsive Materials, SRM) adlandırılan bu malzeme grubu üzerinde etki gösteren uyarın türlerine göre ısı (ısıya duyarlı); stres ve/veya basınç (mekanik duyarlı); elektrik akımı ve/veya voltajı (elektro-duyarlı); manyetik alan (manyeto-duyarlı); pH, çözücü veya nem seviyesinin değiştirilmesi (kemoresponsif); ışık (ışığa duyarlı) olarak sınıflandırılabilir.

SRM ler kendi alt gruplarına sahiptirler örneğin biçim değişikliği uyarıcı etkisi ile çok hızlı ve aniden gerçekleşiyorsa, bu tip malzemeler Şekil Değişim Materyalleri (Shape Change Materials, SCM) olarak adlandırılır, elektro-aktif polimerler (EAP'ler) ve piezoelektrik malzemeler (PZT'ler) SCM'ler için iki tipik örnek olarak verilebilir.

Şekil Hafızalı Materyaller (Shape Memory Materials, SMM), uyarıcı etki ile karşılaşınca kadar geçici şekillerini neredeyse sonsuza kadar korur. Tüm SMM'ler, uyarın varlığında orijinal şekli geri kazanması olarak bilinen Şekil Hafıza Etkisi (Shape Memory Effect, SME) ile karakterize edilir (Huang et al., 2010).

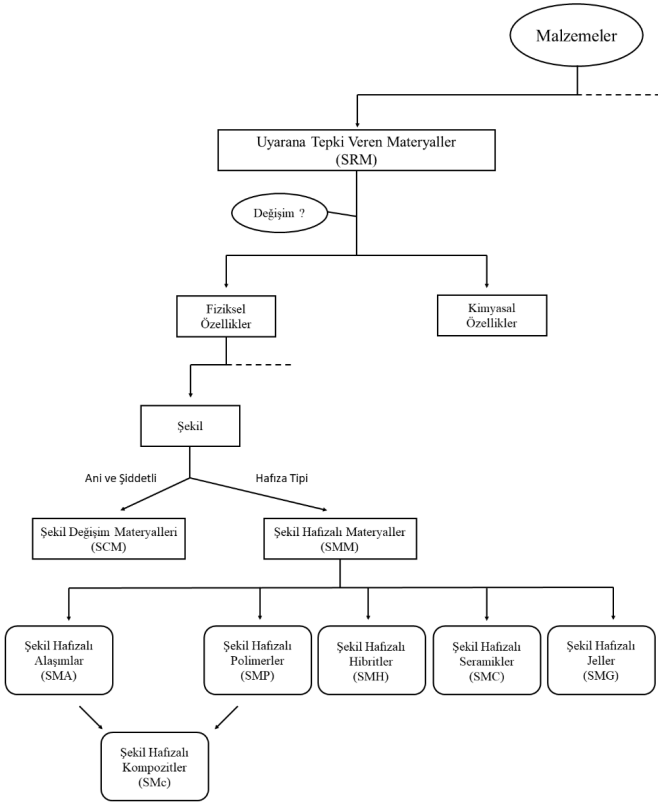
SMM'ler ise yine kendi içinde alt dallara ayrılmaktadır. Şekil Hafıza Etkisi ve malzeme kaynağına göre bu alt dallar aşağıdaki tabloda görülebilir.

**Tablo 1.** Şekil Hafızalı Materyallerin (Shape Memory Materials, SMM) alt sınıfları (Huang, Yang, & Fu, 2011).

Malzeme	Şekil Hafıza Etkisi / Mekanizma
Şekil Hafızalı Alaşımlar (Shape Memory Alloys, SMA)	Kristal yapılarında reversibl dönüşüm
Şekil Hafızalı Polimerler (Shape Memory Polymers, SMP)	İkili segment-domain
Şekil Hafızalı Seramikler (Shape Memory Ceramics, SMC)	Reversibl Faz dönüşümü
Şekil Hafızalı Jeller (Shape Memory Gels, SMG)	Reversibl Düzenlilik Düzensizlik dönüşümü

Bu alt dallar arasında SMA ve SMP grupları uygulama alanlarına çok daha başarılı şekilde entegre edilebildiklerinden diğer alternatifler arasında öne çıkmaktadırlar. Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA) martensitik (veya yer değiştirme) dönüşüm ve bunun ters dönüşümünden kaynaklanan sahip oldukları benzersiz şekil bellek etkisi (SME) ve süperelastisite (SE) özellikleri nedeniyle var olan fonksiyonel alternatifler arasında akıllı malzemeler olarak değerlendirilerek ciddi bir ilgiyle karşılaşmışlardır. Bu çalışmanın konusu olan Şekil Hafızalı Polimerler (SMP) ise hafiflikleri ve işlem kolaylıkları ile günümüzde yürütülen çalışmaların odağındadır (Kazuhiro Otsuka & Ren, 1999).

Şekil Hafızalı Polimerlerin (SMP) malzeme grupları içinde sınıflandırılması aşağıda verilmektedir.



Şekil 1. Uyarana Tepki Veren Materyallerin sınıflandırılması (Huang et al., 2011).

## Tarihçe

Şekil Hafıza Etkisinin (SME) ilk olarak martensitik dönüşümler sergileyebilen belirli alaşımlarda gözlemlendiği bilinmektedir. Bu alaşımlar düşük sıcaklık fazında deforme olsa bile, reversibl dönüşüm sıcaklığı olarak adlandırılan kritik bir sıcaklığa ısıtma ile ters dönüşüme uğrayarak, orijinal

şeklini geri kazanmaktadır. Bu etki ilk olarak Chang ve Read tarafından 1951 yılında bir Au-Cd alaşımında gözlemlendi ve sonrasında Buehler ve arkadaşları tarafından 1963 yılında Ti-Ni (Nitinol, eşdeğer oranlardaki Nikel ve Titanyum karışımı) alaşımları üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların dikkat çekici sonuçlarının yayınlanması ile popülerleşmeye başladı (K Otsuka & Wayman, 1999).

Ayrıca Buehler ve arkadaşlarının çalışmasının öncesinde 1941 yılında bir Birleşik Devletler patentinde L. B. Vernon'un, metakrilik asit reçinesinden yapılan bir dış materyalinde bir tür şekil hafızası etkisinden bahsettiği bilinmektedir. Ancak Nitinol'un keşfi ve şekil hafıza özelliklerinin ortaya konması, bu tip çalışmalarda tarihsel olarak başlangıç olarak değerlendirilebilir. Bu başlangıç sonrası araştırmacılar SME özelliğini bir dizi metal alaşım ve seramikte de gözlemledi. Böylelikle alaşımlarda gözlenen SME özelliğinin keşfi, şekil hafıza yeteneklerine sahip polimerler, jeller ve hibrit malzemeler üzerine çalışmalara yeni ufuklar açmıştır (Parameswaranpillai, Siengchin, George, & Jose, 2020).

Şayet büzüşebilir (shrink) polimerler Şekil Hafızalı Polimer (SMP) olarak adlandırılırsa, SMP'lerin tarihçesinin 1906 yılından itibaren başladığı düşünülebilir. SMA'lardan daha önce tanımlanmış olan SMP'lerin bu ilk örneklerinde gözlenen etkinin sadece büzülme ile sınırlı olduğu görülmektedir. Günümüzde ise SMP'lerin şekillerini geri kazanma özellikleri karakterize edildiği bilinmektedir. Bu tanım üzerinden SMP'lerin ilk örneklerinin Nippon Zeon C. Tarafından 1984 yılında polinorbornen esaslı bir polimer ile gerçekleştirildiği kayda geçmektedir.

Bu ilk örneğin ardından keşfedilen trans-izopoliprem ve stiren-bütadien esaslı SMP'lerin işlenebilirliklerinde gözlenen sıkıntılarının ardından, kolay işlenebilir ilk örnek olan ve günümüz için en sık kullanılan SMP olan termoplastik poliüretan esaslı malzemeler Dr. S. Hayashi tarafından ortaya konduğu bilinmektedir. Geniş bir aralıkta ürünler için başarılı bir ticari performans ortaya koyan olan termoplastik poliüretan esaslı SMP'lerin ardından çok sayıda SMP sistemleri geliştirilmiş, bu alanda takip eden çalışmalar devam etmektedir (Huang et al., 2011).

### **Şekil Hafızalı Polimerler**

Şekil Hafızalı Polimerler (SMP'ler), uyarılara duyarlı polimerlerin önemli bir türü olarak, dış uyarılara maruz kalmaları üzerine orijinal (veya kalıcı) şekillerini geri kazanabilirler. İlk SMP'nin literatürde yer almasından bugüne Şekil Hafızasına sahip farklı yapılara dayalı çok sayıda SMP laboratuvarlarda geliştirildi ve büyük ölçeklerde üretime geçirilerek ticarileştirildi (Kim, Shin, Cho, & Jeong, 2000).

Polinorbornen esaslı (Norsorex, CdF Chime), poliüretan esaslı (DiAPLEX, SMP Technologies Inc., orijinal olarak Mitsubishi Heavy'den),

polistiren bazlı (Veriflex, Verilyte, Veritex, Cornerstone Research Group, Inc.), alifatik poliüretan esaslı (Tecoflex, Lubrizol Advanced Materials), epoksi esaslı (TEMBO, Composite Technology Development, Inc.) ve UV ile kürlenmiş poliüretan esaslı (NOA-63, Norland Products Inc.) SMP'ler ticarileşen örnekler olarak verilebilir (Meng & Li, 2013).

Alternatif SMA tiplerine veya seramiklere kıyasla daha yüksek bir deformasyon ve daha geniş bir değişken mekanik özellikler kapsamı sunmaları nedeniyle Şekil hafızalı polimerler (SMP'ler) bilimsel ve teknolojik perspektiften artan bir ilgiyle karşılaşıldı (Ratna & Karger-Kocsis, 2008).

Şekil Hafızalı Polimerlerin (SMP), diğer SMM'lere kıyasla sahip olduğu avantajlar listelenirse;

- Düşük yoğunluk,
- Çeşitli geleneksel ve gelişmiş polimer işleme teknolojilerini kullanarak ince ve ultra ince filmler ve teller, farklı gözenekli köpükler olmak üzere yüksek kaliteli ve özel olarak şekillendirilmiş malzemeler üretmedeki kolaylık,
- Çok yüksek seviyede geri kazanılabilir gerilim,
- Farklı tipteki dolgu maddeleriyle karıştırılarak veya bileşimlerini değiştirilerek termomekanik özelliklerin istenilen yönde değiştirilebilmesi,
- Şeffaf ürün üretilebilme,
- Geniş bir şekil geri kazanım sıcaklık aralığına sahip olma,
- Geri dönüşüme imkân vermeleri,
- Yüksek kimyasal dayanımlı, biyoyumlu veya biyobozunur olarak dizayn edilebilme,
- Isı, IR, radyasyon, lazer, nem, çözücü ilavesi, pH ve ışık gibi çok farklı uyaranlara cevap verebilme

olarak sıralanabilir (Merline, Nair, Gouri, Bandyopadhyay, & Ninan, 2008).

### **Şekil Hafızalı Polimerlerde Şekil Hafıza Etkisinin Mekanizması**

Polimerik malzemeler, temel düzeyde şekil hafızası etkisine sahiptir, ancak sorumlu mekanizmalar metal alaşımlarından önemli ölçüde farklıdır. Şekil Hafızalı Alaşımlarda (SMA), yalancı (psuedo) plastik sabitleme martensitik ikizleşmeyi giderme mekanizması yoluyla sağlanırken, geri kazanım ise martensit-östenit faz geçişi tarafından tetiklenir. Böylece geçici bir şeklin sabitlenmesi tek bir sıcaklıkta, normalde oda sıcaklığının biraz altında gerçekleştirilir ve geri kazanım, martensitik dönüşüm sıcaklığının ötesine ısıtıldığında gerçekleşir. Bunun tersine, şekil hafızalı polimerler, çeşitli fiziksel yollarla geçici gerinim sabitlemesi ve geri kazanımı elde

eder, altta yatan çok büyük genişleyebilirlik polimerik ağların içsel elastikiyetinden türetilir. Kovalent veya fiziksel olarak (örneğin mikrofaz ayrımı) çapraz bağlı polimerler kendi  $T_g$  veya  $T_m$  değerleri üzerinde büyük oranlarda esneme gösterebilecek şekilde elastiktirler. Elastiklik modülü ana zincirlerin deformasyonu ile ortaya çıkan konfigürasyonel entropi azalması tarafından belirlenir ve bu nedenle sıklıkla “entropi esnekliği” olarak adlandırılır. Bu kritik sıcaklık değerlerinin üzerinde polimerik ağ yapıları, çapraz bağlantı noktaları arasındaki polimer zincir bölümlerinin oldukça serbest bir şekilde deforme olabileceği ve maksimum entropiyi koruyarak omurga bağları etrafındaki dönüşler yoluyla rastgele bükülmeye yatkın olduğu “süper esneklik” sergilerler (Liu, Qin, & Mather, 2007).

Basit bir bakış açısıyla, şekil belleği etkisi, erime veya camsı geçiş gibi bir termal geçişle ilişkili zincir hareketliliğindeki tersine çevrilebilir bir değişiklik ile etkinleştirilir ve entropi esnekliği tarafından yönlendirilir. Sonuç olarak, şekil hafızasını desteklemek için gerekli koşulları sağlayabilecek farklı kimya ve yapılarda çok fazla polimerin var olduğu söylenebilir (Yakacki, 2013).

Sentezlerdeki ve morfolojilerde ortaya çıkan farklılıklara ve çeşitli uyaranlara rağmen, SMP'lerin temel mekanizması, bir segmentin daima esnek, diğer segmentin ise uygun uyarıcı ile geçişe imkân sağlayacak şekilde sert, ikili bir yapıya sahip olmasına dayanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda elastik ve geçiş segmentlerin her ikisi de sert formdadır, geçiş sıcaklığının üzerindeki bir değere ısıtma uygulandığında, geçiş segmenti yumuşak yapısı dolayısıyla kolaylıkla deforme olabilecek bir karaktere sahip olmaktadır. Bu aşamada uygulanan bir gerilim ile yapı deforme edilir, ardından malzeme geçiş sıcaklığının altına soğutulur, soğutma sonrası uygulanan mekanik kuvvet kaldırıldığında deforme edilmiş yapının yeni formu bozulmadan kalır. Yeni bir ısıtma işlemi ile geçiş sıcaklığının üstüne çıkan malzemede geçiş segmentleri tekrardan yumuşar, uygulamada harici bir mekanik kuvvet artık bulunmadığından, elastik segmentin sergilediği geri dönme mukavemetine karşı koyamadığından ilk şekle geri dönüş sağlanır (Huang et al., 2011).

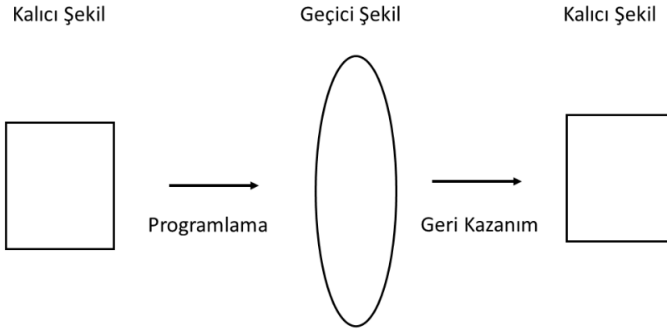
Programlama ve geri kazanım süreci şekil, Şekil 2’de görülebilir. İlk olarak, polimer, kalıcı şeklini almak için geleneksel olarak işlenir. Daha sonra polimer deforme edilir ve amaçlanan geçici şekil sabitlenir, bu sürece programlama denir. Programlama işlemi ısıtmayı takiben numuneyi deforme etmek ve sonrasında soğutmak ile ya da numuneyi düşük bir sıcaklıkta çekmek (“soğuk çekme” olarak adlandırılır) ile gerçekleştirilebilir. Böylelikle, numune geçici şekline sokulmuş, aynı zamanda kalıcı şekli hafızaya alınmış olur, geçiş sıcaklık değerine tekrar ısıtıldığında numune hafıza özelliğini ortaya koyacak şekilde kalıcı şekline geri döner. Bu etki tek-yönlü hafıza etkisi olarak bilinir, çeşitli deformasyonlarla daha fazla programlama ile iş parçası tekrar geçici bir şekle getirilebilir. Bu yeni geçici şeklin, ilk geçici şekle mutlaka uyması gerekmez. Kalıcı şekil, uygun



şekilde optimize edilmiş programlama koşulları ile %99'un üzerinde bir hassasiyetle geri kazanılabilir, bu hassasiyet, SMP'leri hassas uygulamalar için uygun bir değerli bir alternatif haline getirmektedir.

İlk örnekleri 1960'larda görülen, iyonlaştırıcı radyasyon yoluyla kovalent olarak çapraz bağlanmış ısı ile büzüşen polietilen örnekleri, özellikle elektrik kabloları veya boru hatlarının korozyonuna karşı koruma materyali olarak geniş bir spektrumda uygulama alanına sahiptir. Isıyla büzüşme işleminin mekanizması, termal olarak indüklenen şekil-hafıza etkisine benzer. Burada kalıcı şekil aynı zamanda kovalent çapraz bağlarla sabitlenir ve anahtarlama işlemi polietilen kristalitlerin erime sıcaklığı tarafından kontrol edilir. Başlıca poliüretanlar olmak üzere pek çok doğrusal, faz-ayrımli multiblok kopolimer örneği, literatürde "şekil hafızalı polimerler" adı altında sınıflandırılmaya başlandığı görülmektedir.

Bu elastik malzemeler en az iki ayrı faz gösterir. En yüksek termal geçişi gösteren faz, fiziksel çapraz bağlantı görevi görür ve kalıcı şekilden sorumludur. Bu sıcaklığın üzerinde polimer erir ve geleneksel işleme teknikleriyle (ekstrüzyon veya enjeksiyonlu kalıplama) forma sokulabilir. İkinci faz, bir moleküler anahtar görevi görür ve geçici şeklin sabitlenmesini sağlar. Anahtarlama bölümlerinin sabitlenmesi için geçiş sıcaklığı, bir camı geçiş ( $T_g$ ) veya bir erime sıcaklığı ( $T_m$ ) olabilir. Malzemeyi anahtarlama sıcaklığının üzerinde oluşturduktan sonra, geçici şekil, polimerin anahtarlama sıcaklığının altına soğutulmasıyla sabitlenebilir. Malzemeyi tekrar ısıtmak anahtarlama aşamasında fiziksel çapraz bağlantıları keser. Entropi esnekliğinin bir sonucu olarak malzeme kalıcı şekline geri dönmeye zorlanır (Lendlein & Kelch, 2002).

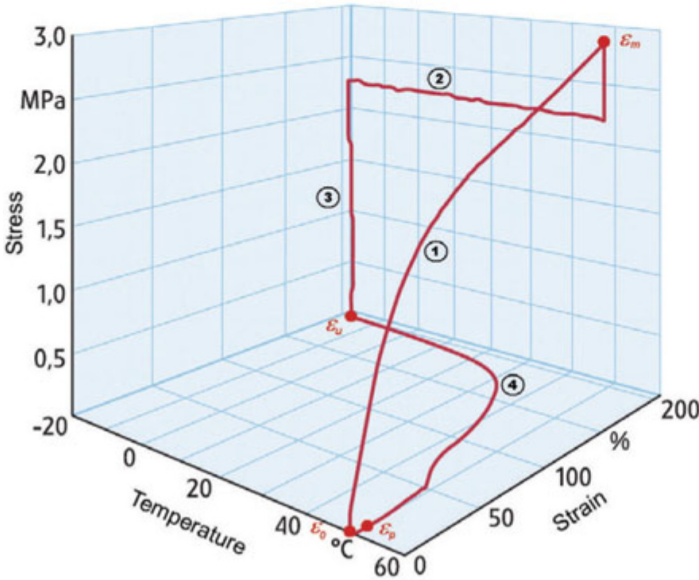


Şekil 2. Tek-yönlü hafıza etkisinin görsel gösterimi.

### Şekil Hafıza Döngüsü

Genel olarak bir Şekil Hafızalı Polimer (SMP)'inin sergilediği Şekil Hafıza döngüsü (SM), dört ardışık adımı içerir: deformasyon, soğutma, sabitleme ve geri kazanım.

İlk adımda, numune bir deformasyon sıcaklığında ( $T_d$ ) önceden belirlenmiş bir gerilim veya gerinim ile deforme edilir. Moleküler anahtarların açılması bu adımda gerçekleştirilir çünkü malzeme, şeklin deforme olabileceği geçiş sıcaklığı veya “anahtarlama sıcaklığı”  $T_{trans}$ 'ın üzerindeki  $T_d$ 'ye kadar ısıtılır. Bunu, ön gerilme kısıtlaması altında  $T_d$  sıcaklık değerinden  $T_{trans}$ 'ın altındaki ayarlı sıcaklık  $T_s$ 'ye kadar soğutma izler. Soğutma sırasında bir gerinim depolama işlemi olan deformasyon geçmişi saklanır. Bu adım, “anahtarların” kapatılmasını ve geçici bir şeklin sabitlenmesini sağlar. Bir sonraki adımda,  $T_s$  sıcaklığında ilk deformasyona sebep olan gerilim kaldırılır ve gerilimsiz bir koşul elde edilir. Bu durumda, numune önceden deforme olmuş bir SMP olarak düşünülebilir. Son adım, test örneğinin kalıcı şeklini geri kazandığı gerilimsiz koşullar altında  $T_{trans}$ 'ın üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılarak moleküler anahtarların açıldığı geri kazanım adımıdır. SM döngü süresi, daha açık olarak sayılan adımları gerçekleştirmek için gereken toplam süre, malzeme özelliklerine, geometrik değerlendirmeye ve deneysel koşula bağlıdır. Şekil 3, SM döngüsünü görselleştiren karakteristik bir gerilme-gerinim-sıcaklık diyagramını gösterir (Parameswaranpillai et al., 2020).



Şekil 3. Tipik Şekil Hafıza döngüsü (Parameswaranpillai et al., 2020).

Programlama işlemi, genel olarak, numunenin önce ısıtılıp, deforme edildikten sonra soğutulması ile olur. Programlama aşamasından sonra geçici şeklindeki malzeme,  $T_{trans}$ 'ın üzerine ısıtılarak, şekil hatırlama özelliği tetiklenir ve malzeme kalıcı şekline geri döner.

Şekil hafıza özellikli polimerlerde, geçiş sıcaklığı malzemenin camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) veya erime sıcaklığı ( $T_m$ ) olarak seçilir. Şekil hafıza

özelliikli alaşımllara oranla, polimerlerde programlama ve geri dönüşüm aşamaları çok daha kısa sürelerde gerçekleşir ve polimerler daha yüksek oranlarda deformasyon gösterebilir.

Şekil hafıza özelliği malzemenin şekil hatırlama performansına göre, tek veya çift yönlü olabilir. Tek yönlü şekil hafıza özelliğinde, malzeme ekstrüzyon, enjeksiyon gibi üretim prosesi ile belirlenen orijinal şeklindedir. Programlama aşamasından sonra ısıtıldığında kalıcı şeklini hatırlar, ancak tekrar soğutulduğunda kalıcı şeklini hatırlayamaz. Çift yönlü şekil hafıza özelliğinde ise, soğutulduğunda tekrar kalıcı şekline döner.

Genel olarak polimerler çift yönlü şekil hafıza özelliğine sahipken, alaşımlar tek yönlü şekil hafıza özelliğine sahiptir. Son dönemde, yapılan araştırmalar sonucu şekil hafızalı polimerlerin üç şekli birden hatırlaması sağlanmıştır. Bu özelliikte şekil hafızalı polimerlerin programlanması daha zordur. İki yönlü şekil hafıza özelliikli polimerlerin, programlama aşamalarının daha kolay olması, bu polimerleri daha esnek ve çeşitli uygulamalara daha kolay adapte edilebilir hale getirmiştir (Huang et al., 2011).

### **Polimerlerde Şekil Hafıza Tetikleme Yöntemleri**

Farklı dış etkiler altında şekil değiştirip özgün hallerine dönebilen SMP'lerin bu özelliklerini sağlayan moleküler yapıları ile alakalı birtakım parametreler mevcuttur. Bir elastomer, belirli bir uygulama için gerekli olan bir ısı aralığında bozulma durumunda kalabiliyorsa, şekil hafıza özelliğine sahip olduğu söylenebilir.

Eğer ısı, dönüşümü tetiklemek için tasarlanmışsa, birtakım segmentlerin esnekliği sıcaklığın bir fonksiyonu olacaktır. Şekil Hafızalı Polimer (SMP)ler orijinal (veya kalıcı) şekillerini “ezberleyebilir” ve şekillerini ısının etkisi altında geçici bir şekilden orijinal (veya kalıcı) şekline hızla değiştirebilirler. Bu döngü uygulanan ısı enerjisinin tetiklemesi ile gerçekleştirilmektedir (Meng & Hu, 2010).

Tetikleme işlemi için gerekli ısı enerjisi, ışık, elektrik veya manyetik gibi farklı enerji formlarının uygun yöntemlerle dönüştürülmesi ile sağlanabilmektedir. Böylelikle elde edilen dolaylı ısıtma, SMP'lerin çalışması ve geliştirilmesi için alternatif yöntemler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Örneğin, Lendlein ve arkadaşlarının ışığa maruz kaldıklarında sinamik asit tipi moleküllerin ışıkla tersine çevrilebilir siklo-katılma reaksiyonlarına maruz kaldığı ışığa duyarlı SMP'ler geliştirmek için öncü çalışmasından bu yana, araştırmacıların, şekil belleğini gerçekleştirmek için ışığı etkili bir şekilde soğuran ve ısıya dönüştüren ışığa duyarlı malzemeleri SMP'lerin hazırlanmasında kullanıldığı görülmektedir. Burada, geçici şekil termo-mekanik programlama ile elde edilir ve orijinal

şekil foto-ısıtma ile geri kazanılır.

Araştırmacılar ayrıca, karbon nanotüp (CNT), grafen, vb. gibi elektrik iletken malzemelerin SMP'lere katılmasının tetikleme işlemi için ideal bir ısıtma kaynağı olarak hareket edeceğini de gösterdi. Bu, iletken dolgu maddelerinin bir eş-sürekli şekil hafızalı polimer karışımında dağıtılmasıyla, iletken bir ağ oluşumu ile sağlanmaktadır.

Benzer şekilde, manyetik nanopartiküllerin SMP'lere dahil edilmesi, şekil geri kazanım sürecini indüklemek için ısı üretmelerini sağlar. Aynı zamanda, çözücü moleküllerinin SMP'deki ikincil bağı bozduğu ve çalışma koşullarının altındaki  $T_g$ 'yi baskılaması esaslı çözücü odaklı şekil hafızası etkisi, birçok araştırmacı tarafından şekil hafızalı uygulamalara yönelik SMP malzemelerin geliştirilmesi için kullanıldığı rapor edilmektedir (Parameswaranpillai et al., 2020).

### **Şekil Hafızalı Polimerlerin Sınıflandırılması**

Şekil Hafızalı Polimer (SMP)'ler şekillerini, sıcaklık, ışık, elektrik alanı, manyetik alan, pH, özel iyon veya enzim gibi uygun uyaranlar altında geçici bir halden orijinal (veya kalıcı) hallerine hızlı bir şekilde değiştirebilirler. Uyarın duyarlı SMP'ler arasında, termal duyarlı SMP'ler endüstride yaygın olarak çalışılan ve kullanılan tiplerdir. Termal duyarlı SMP'ler, genellikle fiziksel çapraz bağlı yapı (kristalin/amorf sert segment) veya kimyasal çapraz bağlı yapı ve düşük kristalin geçiş sıcaklığı olan, amorf veya sıvı-kristal faza (dönüştürücü olarak) sahiptir.

(SMP)'ler uyaran tipi, bileşim ve kimyasal yapı perspektiflerinden sınıflandırılabilir. SMP'ler kimyasal yapılarına bağlı olarak dört farklı sınıfa ayrılabilir:

- Sınıf 1 Kimyasal olarak çapraz bağlı amorf SMP'ler
- Sınıf 2 Kimyasal olarak çapraz bağlı yarı kristal SMP'ler
- Sınıf 3 Fiziksel olarak çapraz bağlı amorf SMP'ler
- Sınıf 4 Fiziksel olarak çapraz bağlı yarı kristal SMP'ler

Tablo 2. de bu sınıfların önemli özellikleri özetlenmektedir.

**Tablo 2.** Kimyasal yapılarına göre Şekil Hafızalı Polimerler (Parameswaranpillai et al., 2020).

Tip	Önemli Özellikleri	Örnekler
Sınıf 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil geçiş sıcaklığı <math>T_g</math> dir (keskin)</li> <li>- Kalıcı şekil kimyasal çapraz bağlanma ile, ikincil şekil camsılaşma ile sağlanır</li> <li>- Mükemmel derecede şekil geri kazanımı</li> <li>- Yeniden işlenmesi zor</li> </ul>	Polinorbornen
		Termoset Poliüretan
		Epoksi
		Stiren kopolimerleri
		PET-EG kopolimerleri
		PMMA-PBMA kopolimerleri
Sınıf 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil geçiş sıcaklığı <math>T_m</math> dir</li> <li>- Kalıcı şekil kimyasal çapraz bağlanma ile, ikincil şekil kristallenme ile sağlanır</li> <li>- Hızlı şekil geri kazanımı</li> </ul>	Metakrilatlar
		PCL-BA kopolimerleri
		Polisikloktan
		PE
		PE/PP Blendleri
		Poli( $\epsilon$ -kaprolakton)
Sınıf 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil geçiş sıcaklığı <math>T_g</math> veya <math>T_m</math> dir</li> <li>- Kalıcı şekil fiziksel çapraz bağlanma (rijit amorf veya kristalin bölgeler, hidrojen bağları veya iyonik kümeler yardımıyla) ile, ikincil şekil düşük <math>T_g</math> ve <math>T_m</math> değerlerine sahip yumuşak segmentlerin soğutulması ile sağlanır</li> <li>- Görece düşük şekil geri kazanımı</li> <li>- Daha iyi işlenebilirlik</li> </ul>	Akrilatlar
		Poli(propilen sebakat)
		POSS-PN blok kopolimerleri
		Stiren blok kopolimerleri
		PET-ko-PEO
		PE-ko-Nylon 6
		PE-PMCP
		PCL-b-ODX
POSS telekelik		
Sınıf 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil geçiş sıcaklığı <math>T_g</math> veya <math>T_m</math> dir</li> <li>- Kalıcı şekil fiziksel çapraz bağlanma (polar etkileşimler, hidrojen bağları veya kristallenme yardımıyla) ile, ikincil şekil düşük <math>T_g</math> ve <math>T_m</math> değerlerine sahip yumuşak segmentlerin soğutulması ile sağlanır</li> </ul>	PVDF/PMMA blendleri
		Polilaktid
		Oligo( $\epsilon$ -kaprolakton)
		SBS-TBCP
Sınıf 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Şekil geçiş sıcaklığı <math>T_g</math> veya <math>T_m</math> dir</li> <li>- Kalıcı şekil fiziksel çapraz bağlanma (polar etkileşimler, hidrojen bağları veya kristallenme yardımıyla) ile, ikincil şekil düşük <math>T_g</math> ve <math>T_m</math> değerlerine sahip yumuşak segmentlerin soğutulması ile sağlanır</li> </ul>	Kopoliesterler
		PCL
		Farklı yumuşak segmentlere sahip Poliüretan kopolimerleri

### Şekil Hafızalı Polimerlerin Karakterizasyonları

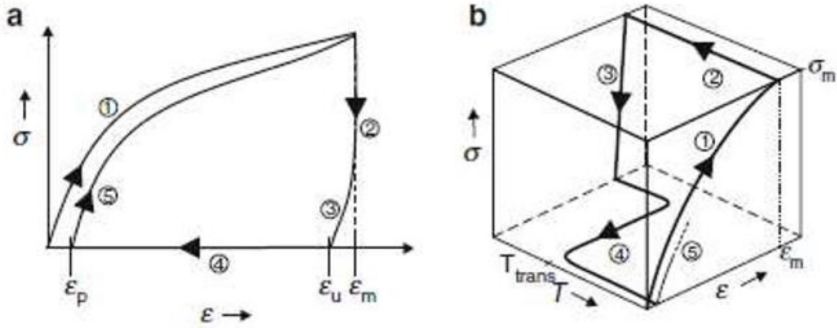
Şekil-hafıza etkisinin iç yüzünü kapsamlı bir şekilde aydınlatılabilmek için, makroskopik ve moleküler seviyede karakterizasyonların gerekli olduğu söylenebilir. Termo-mekanik programlama ve şekil-bellek özelliklerinin mikro ve nano düzey özelliklerini keşfetmek ve şekil geri kazanım mekanizmasını görselleştirmek için çeşitli gelişmiş karakterizasyon teknikleri kullanılabilir.

Polimer yapısının moleküler düzeyde hiyerarşik organizasyonunun, çapraz bağ yoğunluğu ve işlevselliği açısından kimyasal ağ noktalarının incelenmesinde NMR (Nükleer Manyetik Spektroskopi) yöntemi araştırmacılara yardımcı olmaktadır.

Dinamik Mekanik Termal Analiz (DMTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) gibi termal karakterizasyon teknikleri, SMP'lerin kristallik, faz geçişleri ve cam geçiş davranışları dahil termal özellikleri incelemek için yaygın olarak kullanılır.

SMP'lerin statik mekanik özellikleri, geleneksel mekanik testlerle değerlendirilebilirken, şekil sabitliği, şekil geri kazanımı vb. gibi şekil hafıza parametreleri termo-mekanik döngü testleri ile incelenebilir. Termo-mekanik döngü testi ısıtma haznesine sahip bir çekme cihazında gerçekleştirilir. Polimere uygulanan termo-mekanik döngü testlerinde ilk olarak numune geçiş sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır ve maksimum germe ( $\epsilon_m$ ) uygulanır. Özellikle termoplastik polimerlerle yapılan uygulamalarda, polimerin en yüksek geçiş sıcaklığı olan sert kısımlara ait geçiş sıcaklığının üzerine ısıtma yapılmamasına dikkat edilir. Çünkü, bu sıcaklığın aşılması durumunda polimer eriyebilir. Testin bir sonraki aşamasında, numuneye uygulanan kuvvet sabit tutularak, geçiş sıcaklığının altına soğutulur ve geçici şekli sabitlenir. Son olarak, geçici şeklindeki numune üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldıktan sonra, ısıtma yapılarak tekrar orijinal şeklini alması sağlanır. Bu aşamadan sonra ilk döngü tamamlanmıştır ve ikinci döngü için numune uygun durumdadır.

Termo-mekanik döngü testi sonucunda, malzemenin şekil hafıza performansı genel olarak, gerinim ( $\epsilon_m$ ) ile çekme gerilmesi ( $\sigma$ ) arasında oluşturulan grafik yardımı ile belirlenir. Termo-mekanik döngü testinin iki yönlü bir ölçüm yöntemi olarak adlandırılmasının sebebi de budur. Şekil 4'de görüldüğü gibi ilerleyen termomekanik döngü testi sonuçları programlama aşamasında kontrol edilen parametreye göre hesaplanır.



**Şekil 4.** Termo-mekanik döngü test sonuçlarının şematik olarak gösterimi (Huang et al., 2011).

Şekil hafıza performansının belirlenmesinde kullanılan bir diğer yöntem ise, bükme testidir. Bu testte numune geçiş sıcaklığının üzerinde belirli bir açı kazandırılmak üzere bükülür. Sonrasında soğutulan polimere geçici şekli kazandırılmış olunur. Soğutma esnasında malzeme yapısındaki amorf bölgeler, polimeri orijinal şekline döndürmek üzere etkilerler.

Polimere uygulanan kuvvet kaldırıldığında geçici şeklin bir miktar bozulması bu bölgeler sebebi ile gerçekleşir. Şekil hafıza testlerinde şekil kararlılığı oranının ölçülmesi, bu bölgelerin şekil hafıza performansına etkisini ortaya koymaktadır.

Yüksek sıcaklıkta uygulanan nano-indentasyon tekniği, nano ölçekli boyutlarda şekil-hafıza sürecini analiz etmek için güçlü bir tekniktir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), optik ve polarize optik mikroskopi (OM ve POM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), lazer taramalı konfokal mikroskopi (LSCM) gibi mikroskobik teknikler, şekil hafızalı polimerlerin morfolojik özelliklerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. SEM tekniği mikro ölçekli yüzey desenlerini, mikro ve nano seviyeli yapısal özellikleri, nano-kıvrımların oluşum ve toplanmalarını, nano-malzemelerin SMP matrisinde dağılımını analiz etmek için kullanılabilir. Nano düzeydeki yapısal özellikler hakkında daha kapsamlı bir analiz TEM yöntemi ile araştırmalardan elde edilebilir. SMP'lerin yapısal organizasyonu ve morfoloji evrimi OM ve POM tarafından görselleştirilebilirken, AFM, yüzey topografisine ek olarak şekil geri kazanımı süreci hakkında bilgi sağlar. LSCM, biyolojik örneklerin yapısal özelliklerinin 3 boyutlu görselleştirilmesi için güçlü bir tekniktir (Parameswaranpillai et al., 2020).

X ışını saçılma tekniği, malzemenin mikro ve nano durum yapısal özelliklerini analiz ederek şekil hafıza davranışını araştırmak için başka bir güçlü yöntemdir. Bu yöntem, numune hazırlama açısından esnekliğe sahiptir (Gu & Mather, 2012).

### **Şekil Hafızalı Polimerlerin Uygulamaları**

Şekil hafızalı polimerler, sensör fonksiyonu (termal, stres, elektrik veya manyetik alana duyarlı), geniş mesafeli çalıştırma, yüksek sönmüleme, uyarlanabilir tepkiler, şekil hafızası ve süper esneklik kapasitesi gibi üstün performans özellikleri sergilerler, ve bu potansiyelleri nedeniyle akıllı sistemler için çeşitli mühendislik uygulamalarında sıklıkla görev alırlar (Wei, Sandström, & Miyazaki, 1998).

Keşfedilen ilk sıcaklık kontrollü şekil hafızalı polimer olan polinorbornenin (PN) tetiklenme sıcaklığı 35 °C - 45 °C aralığında olduğundan, vücut içi çeşitli tıbbi uygulamalarda başarılı görevler üstlendiği bilinmektedir (Wang & Yuen, 2006).

SMP'lerden, biyobozunabilir ve fonksiyonel kardiyovasküler implantlar ve diğer iyileştirici uygulamalar için çeşitli malzemeler imal edilmektedir. Son yıllarda yoğun araştırmalar sonucu ortaya konan bir stent bu uygulamalar için en dikkat çekici mikro cihazlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 5). Biyo-bozunur özelliğe de sahip olan



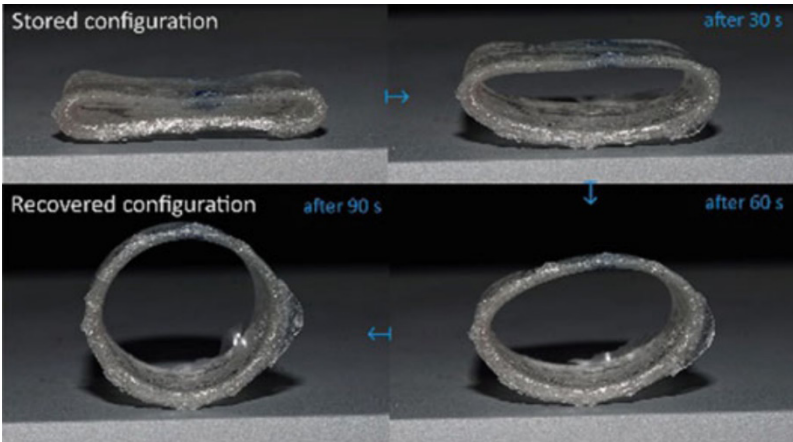
SMP'den imal edilen stentlerin en önemli avantajı ilave bir kaldırma işlemi gerektirmemesidir. Bu tür SMP'lerden yapılan ameliyat iplikleri de yine daha sonrasında kaldırılmaya gerek duymamaktadır.



**Şekil 5.** Şekil hafızalı stentler. (Huang et al., 2011)

Kontrollü ilaç salınımı için hem biyolojik olarak bozunabilir hem de bozunmayan SMP'ler kullanıldığı rapor edilmektedir. Günümüzde SMP'ler endovasküler trombektomi cihazlarında, aktif mikroakışkan rezervuarlarda, oküler implantlarda ve kendiliğinden yerleşen nöronal elektrotlarda da kullanılmaktadır.

Şekil hafıza özelliğine sahip polimerler, vücut içi cerrahide kullanıma olanak vermeleri sebebiyle, akıllı medikal cihazların, doku iskelelerinin, çeşitli implantların üretiminde önemli faydalar sağlamaktadır. Geleneksel olarak üretilen şekil hafıza özellikli poliüretan, polistiren ve epoksi temelli polimerler, özellikle biyomedikal uygulamalar için tasarlanmamıştır. Ancak son dönemde biyomedikal olarak kullanıma uygun şekil hafıza özellikli polimerlerle ilgili araştırmalar yaygınlaşmıştır. Şekil hafıza özellikli polimerlerin biyomedikal alandaki ilk kullanımı Hayashi vd. tarafından üretilen kateterlerdir. Bu kateterler, uygulama esnasında kapalı forma uygulanarak vücutta organ ve doku yaralanmalarına engel olmaktadır (Şekil 6).



**Şekil 6.** Şekil hafızalı trakeal kateter (Parameswaranpillai et al., 2020).



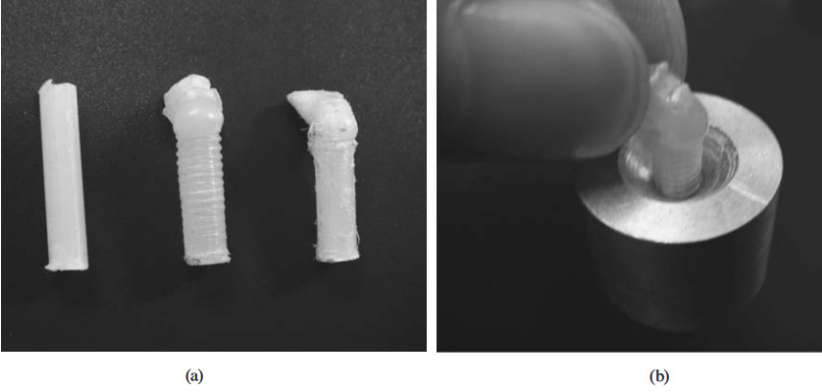
Şekil hafıza özellikli polimerler ilaç transferinde, şişme özelliği ile tokluk oluşturmada ayrıca biyomedikal uygulamalarının yanı sıra akıllı kumaşların ve tekstil ürünlerinin üretiminde de kullanılmaktadır.

Görme engelliler için kullanılacak, yazımsal hataların kolay giderildiği ve tekrar yazılmaya müsait, yeni nesil Braille alfabe malzemesine duyulan ihtiyaç için poliüretan esaslı şekil hafızalı levhalar SMP Technologies, Japonya firması tarafından geliştirilerek kullanıma sunulmuştur. Bu levhalarda yazım esnasında meydana gelebilecek noktasal hatalar, nokta ısıtıcılar yardımıyla düzeltilebilmektedir. Buna ek olarak bu yeni nesil levha tamamı ısıtılarak, tekrar yazıma hazır hale gelebilme özelliğine sahiptir. Şekil hafızalı polimerlerin düşük fiyatları sayesinde görme engelli insanlar için uygun ve ucuz yenilikler uygulanabilmektedir.

SMP'ler otomobil mühendisliğinde de başarı ile görev almaktadırlar. SMP'lerin bazı ilginç uygulamaları arasında koltuk tertibatları, yeniden yapılandırılabilir saklama kutuları, enerji emici tertibatlar, ayarlanabilir araç yapıları, kaput tertibatları, çıkarılabilir bağlantı sistemleri, hava akımı kontrol cihazları, uyarlanabilir lens tertibatları ve şekil değiştirebilen otomotiv gövde yapımı bulunur.

Akıllı malzemelerin ve SMP teknolojisinin modern cep telefonlarının aktif sökülmesine uygulanması bir başka ilginç uygulama olarak değerlendirilebilir. Poliüretan esaslı SMP'lerden imal edilen vidaların kullanımı ile Nokia 6110 cep telefonu 1,5 saniye içinde başarılı şekilde kendi kendine sökülebilmektedir. Geleneksel vidaların kullanımında bu süre ortalama 8 saniye iken bu yaklaşım söküm işlemini ciddi oranda hızlandırabilmektedir. Bu teknik, Aktif Söküm (Active Disassembly) olarak adlandırılır ve farklı cep telefonlarına da başarıyla uygulanabilmektedir (Şekil 7).

SMP'ler, köpükleri ve kompozitleri, havacılık ve uzay uygulamaları için konuşlandırılabilir yapılarda bir menteşe gibi fonksiyon gösterecek şekilde kullanılmaktadır. Tekerlekler, direkler, güneş yelkenleri, güneş dizileri ve antenler gibi konuşlandırılabilir yapılar, fırlatma roketleri ve hava araçları içindeki sınırlı alan nedeniyle kompakt olmalı, ardından konuşlandırıldığında genişletilmiş asli yapı şekillerini almalıdır. Bu gereksinimler SMP'ler kullanılarak başarı ile sağlanabilmektedir.



**Şekil 7.** Aktif Söküm için SMP kullanımı (a) Soldan sağa: Başlangıç şekli, deforme şekil, geri kazanılmış şekil, (b) SMP vidanın kullanımı (Huang et al., 2011).

### Sonuç

Şekil hafızalı polimerler (SMP'ler), son 25 yılda geliştirilen yüksek katma değerli yeni tip akıllı malzemeler grubundandır. Isı, ışık veya nem gibi belirli bir dış uyarının uygulanmasıyla büyük bir deformasyona cevap verme ve geri kazanma yeteneği ile bu yeni tip malzemeler bilimsel ve teknolojik açıdan öneme sahiptir.

Bu malzemeler muazzam bir yenilik potansiyeli sergilemektedir. Yeni özellikleri ve davranışları nedeniyle, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilirler ve ileri havacılık, ticari ve biyomedikal teknolojilerindeki zorlukları giderirler.

SMP'lerin eski tip metalik bazlı şekil hafızalı alaşımlara kıyasla sahip oldukları hafiflikleri, yüksek gerilme ve şekil geri kazanma yetenekleri, işleme kolaylıkları, düşük maliyetleri ve çeşitli uygulamalar için uyarlanabilmeleri gibi önemli avantajlara sahiptirler. SMP'lerin benzersiz özelliklerinin temsil ettiği büyük potansiyel, uzaydan insan vücudunun derinliklerine kadar birçok uygulamayı mümkün kılmaktadır. Şekil belleği etkisi (SME) adı verilen benzersiz bir özelliğe dayanarak, geleneksel yaklaşımların birçok sınırlaması SMP'ler için geçerli olmadığından, tasarım yaklaşımlarını dahi birçok şekilde yeniden şekillendirmektedir.

Ayrıca SMP'ler, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, film döküm, spin ve daldırma kaplama, fiber gibi birçok geleneksel polimer işleme tekniği kullanarak kolaylık ve düşük malzeme ve imalat maliyetlerinin avantajlarına sahiptir. Malzeme özelliklerinin uyarlanması, belirli bir uygulamanın gereksinimlerini karşılamak için bir bileşimi harmanlayarak veya değiştirerek kolayca gerçekleştirilebilir.

Bu malzemelerin “akıllı” doğası yeni bir tasarım paradigmasını temsil eder ve bizi geleneksel polimerlerle uygulanabilir olmayan uygulamalarda kullanılmak üzere düşünmeye davet etmektedir.

Bir Şekil Hafızalı Polimer geliştirmek için, bu malzemelerin termomekanik özelliklerini anlamak önemlidir. Şekil hafızalı polimerlerin termomekanik çok karmaşıktır. Şekil hafızalı polimerin en temel ve önemli özellikleri malzeme bilimi ve mühendisliği alanındaki tüm kişiler için ilgi çekici bir konu olarak görölmektedir.

Bugüne kadar bildirilen çeşitli SMP sınıfları arasında, poliüretan bazlı SMP'ler en kapsamlı şekilde araştırılan ve aynı zamanda ilk ticarileştirilen örnekler olarak öne çıkmaktadırlar.

Moleküler mimarileri ve yapı-özellik ilişkileri incelenerek ortaya konan bilimsel bilgi, bu materyallerin benzersiz işlevlerinin anlaşılması için bir temel sağlayacaktır. Bu tür bilgilerin yeni yeteneklerin geliştirilmesine çevrilmesi topluma fayda sağlayacak önemli yeniliklere yol açacaktır.

Bu çalışma ile, şekil hafıza mekanizmaları ve karakterizasyonları dahil olmak üzere, SMP'ler ile ilgili temel kavramlarla tanışma zemini oluşturulması hedeflenmektedir. Buna ek olarak, modern toplumda bu malzeme sınıfının potansiyel faydasını değerlendirmek için, iyi bir çerçeve oluşturarak çeşitli uygulamalar için öncü olması beklenmektedir.

**KAYNAKLAR**

- Arun, D. I., Chakravarthy, P., Arockiakumar, R., & Santhosh, B. (2018). *Shape Memory Materials*. First edition. | Boca Raton, FL : CRC Press/ Taylor & Francis Group, 2018. | “A CRC title, part of the Taylor & Francis imprint, a member of the Taylor & Francis Group, the academic division of T&F Informa plc.”: CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/9781351119948>
- Gu, X., & Mather, P. T. (2012). Entanglement-based shape memory polyurethanes: Synthesis and characterization. *Polymer*, 53(25), 5924–5934. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.09.056>
- Huang, W. M., Ding, Z., Wang, C. C., Wei, J., Zhao, Y., & Purnawali, H. (2010). Shape memory materials. *Materials Today*, 13(7–8), 54–61. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(10\)70128-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70128-0)
- Huang, W. M., Yang, B., & Fu, Y. Q. (2011). *Polyurethane Shape Memory Polymers*. *Polyurethane Shape Memory Polymers*. CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/b11209>
- Kim, B. K., Shin, Y. J., Cho, S. M., & Jeong, H. M. (2000). Shape-memory behavior of segmented polyurethanes with an amorphous reversible phase: the effect of block length and content. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 38(20), 2652–2657. Retrieved from [https://doi.org/10.1002/1099-0488\(20001015\)38:20<2652::AID-POLB50>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1099-0488(20001015)38:20<2652::AID-POLB50>3.0.CO;2-3)
- Lendlein, A., & Kelch, S. (2002). Shape-Memory Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 41(12), 2034–2057. Retrieved from [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20020617\)41:12<2034::AID-ANIE2034>3.0.CO;2-M](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020617)41:12<2034::AID-ANIE2034>3.0.CO;2-M)
- Liu, C., Qin, H., & Mather, P. T. (2007). Review of progress in shape-memory polymers. *Journal of Materials Chemistry*, 17(16), 1543–1558. Retrieved from <https://doi.org/10.1039/b615954k>
- Meng, H., & Hu, J. (2010). A brief review of stimulus-active polymers responsive to thermal, light, magnetic, electric, and water/solvent stimuli. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(9), 859–885. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/1045389X10369718>
- Meng, H., & Li, G. (2013). A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, 54(9), 2199–2221. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.02.023>
- Merline, J. D., Nair, C. P. R., Gouri, C., Bandyopadhyay, G. G., & Ninan, K. N. (2008). Polyether polyurethanes: Synthesis, characterization, and thermoresponsive shape memory properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(6), 4082–4092. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/app.27555>

- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1999). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=DvItE9XUIN8C>
- Otsuka, Kazuhiro, & Ren, X. (1999). Recent developments in the research of shape memory alloys. *Intermetallics*, 7(5), 511–528. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0966-9795\(98\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0966-9795(98)00070-3)
- Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., George, J. J., & Jose, S. (2020). *Shape Memory Polymers, Blends and Composites: Advances and Applications*. Springer Singapore (Vol. 115). Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-981-13-8574-2>
- Ratna, D., & Karger-Kocsis, J. (2008). Recent advances in shape memory polymers and composites: A review. *Journal of Materials Science*, 43(1), 254–269. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2176-7>
- Wang, H. H., & Yuen, U. E. (2006). Synthesis of thermoplastic polyurethane and its physical and shape memory properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(1), 607–615. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/app.24335>
- Wei, Z. G., Sandstroröm, R., & Miyazaki, S. (1998). Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems: Part I Shape-memory materials. *Journal of Materials Science*, 33(15), 3743–3762. Retrieved from <https://doi.org/10.1023/A:1004692329247>
- Yakacki, C. M. (2013). Shape-memory and shape-changing polymers. *Polymer Reviews*, 53(1), 1–5. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.752745>

# Bölüm 26

## HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ KÖTÜ ETKİLERİNİN AZALTILMASI



*Dr. Öğr. Gör. Yıldırım ÖZÜPAK<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Gör. Yıldırım ÖZÜPAK , Dicle Üniversitesi, Silan MYO, yildirimosupak@gmail.com



## 1. GİRİŞ

Son yıllarda lineer olmayan yükün artması nedeniyle güç sistemlerindeki harmonikler önemli ölçüde artmıştır. Doğrusal olmayan yüklerin artmasıyla güç dağıtım sistemlerinde harmoniklerin çoğalması, hem kullanıcılar hem de güç dağıtım sistemi için güç kalitesi için sorun teşkil etmektedir. Doğrusal olmayan yüklerin transformatör ile beslenmesi transformatörde, daha yüksek kayıplara, aşırı ısınmaya, yalıtımın erken bozulmasına, erken arızaya ve transformatörün faydalı kullanım ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Transformatör standart kullanım ömrü beklentisine kadar çalıştırılmazsa, ekonomik kayıp meydana gelecektir.

Güç transformatörleri, iletim ve dağıtım trafo merkezlerindeki sermaye yatırımının en büyük bölümünü temsil eder ve bunların doğru çalışmaları güç sistemleri için hayati önem taşır. Doğrusal olmayan yüklerin yaygın kullanımı, harmonik seviyesini yoğun bir şekilde artırmıştır. Transformatör güç kayıplarının artması ve bunun bir sonucu olarak transformatördeki sıcaklık artışları, harmonik etkilerin sonuçlarıdır. Harmonik akım nedeniyle artan en sıcak nokta sıcaklığı (Hot Spot Temperature-HST), termal yalıtımın hızlı bozulmasına olur (K. T. Muthanna, A. Sarkar, K. Das, K. Waldner 2006).

Bir transformatörün yükleme kapasitesinin ve faydalı ömrünün sınırlarını tahmin etmek için, transformatör sargısının HST'sini tahmin etmek gerekir. Sinüzoidal koşullar altında sıcak nokta sıcaklığını belirlemek için bugüne kadar birçok yöntem önerilmiştir. Isı transferi teorisinin temellerine dayanan eşdeğer bir devre şeklinde bir transformatör termal modelleme yaklaşımı önerilmiştir (Özüpak Y, MAMIS M. S 2019). Yalıtımın bozulma süresini değerlendirmek için tam simülasyon ve yenileme süreci yaklaşımları sunulmuştur. Transformatörün verimli ömrü, ulaşma süresi tasarım ömrü ve belirli bir zamanda arıza olasılığı gibi bazı ilgili güvenilirlik parametrelerinin tahminleri de sunulmuştur (S.B. Sadati, A. Tahani, M. Jafari, M. Dargahi, 2008). Transformatörün farklı noktalarındaki sıcaklığı ve sıcaklık dağılımını tahmin etmek için analitik yöntemler, genelleştirilmiş ısı iletimi modelini kullanan kapalı form matematiksel tekniğe dayalı olarak sunulmuştur (IEEE Std C57.110-1998). Bununla birlikte, sıcak nokta sıcaklığını harmonik koşullar altında değerlendirmenin birkaç yöntemi vardır. Sıcak nokta sıcaklığını ve transformatör ömrünü tahmin etmek için geleneksel transformatör eşdeğer devresine benzer bir model kullanılmıştır.

Bu çalışmada, harmonikleri harmonik bozulmaları tahmin etmenin farklı yöntemleri incelenmiştir. Harmonik bozulmaların tavsiye edilen limitleri, harmonik kaynakları, dağıtım trafosu kayıplarının analizi ve değerlendirilmesi, trafonun doğrusal olmayan yük altındaki ömür kaybı hakkında araştırmalar yapılmıştır. Ayrıca, transformatörler üzerindeki harmonik etkilerin azaltılmasında kullanılan çeşitli yöntemler çalışmada sunulmuştur.



## 2. HARMONİKLERİN TANIMLANMASI

AC güç sistemindeki bir harmonik bileşen, sistemin temel frekansının bir tam sayı katına eşit frekansa sahip periyodik bir dalga biçiminin sinüzoidal bir bileşeni olarak tanımlanır. Harmonik yük içeriğini tahmin etmenin üç yöntemi vardır. Bunlar sırasıyla bu çalışmada incelenmiştir.

### 2.1 Tepe Faktörü

Gerçek RMS değerine oranla dalga formunun tepe değerinin bir ölçüsüdür. Tepe faktörünün matematiksel tanımı denklem (1) ile verilmiştir:

$$CF = \frac{\text{Harmonik dalganın tepe değeri}}{\text{RMS dalgası}} \quad (1)$$

Akım veya gerilimin iyi bir sinüs dalgası,  $\sqrt{2}$  veya 1,414 tepe faktörüne sahip olmaktadır. Bu değerdeki herhangi bir sapma, bozuk bir dalga biçimini ifade etmektedir.

### 2.2 Toplam Harmonik Bozulma

Gerilim dalga biçimi ile ilgili en yaygın harmonik indeks, temel bileşenin bir yüzdesi olarak ifade edilen harmoniklerin kök ortalama karesi olarak yani tanımlanan Toplam Harmonik Bozulma (THB)'dir. THB aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (M. Nageswara Rao, Malay Mandal 2011).

$$THB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (2)$$

Burada  $V_n$ , harmonik n'deki tek frekanslı r.m.s voltaj, N dikkate alınması gereken maksimum harmonik sırası ve  $V_1$  nötr r.m.s gerilimin ana hattıdır.

Mevcut bozulma seviyeleri bir THB değeri ile de karakterize edilebilir. Ancak temel yük akımı düşük olduğunda bu durum yanıltıcı olabilir. Yük hafifse, giriş akımı için yüksek bir THB değeri önemli bir sorun olmayabilir. Çünkü temel frekansa göreceli distorsiyon yüksek olmasına rağmen harmonik akımın büyüklüğü düşüktür. Bu tür bir belirsizliği önlemek için, bunun yerine aşağıdaki şekilde tanımlanan toplam talep bozulması (TTB) faktörü kullanılır.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_R} \quad (3)$$

Bu faktör, distorsiyonun, temel akımın bir yüzdesi olarak değil, bazı nominal akım veya maksimum yük akımı büyüklüğünün bir yüzdesi olarak ifade edilmesi dışında THB'ye benzer. Elektrik güç kaynağı sistemleri, nominal veya maksimum yük akımına dayanacak şekilde tasarlandığından,

yük seviyelerinde dalgalanan bir referanstan ziyade, tasarlanan değerlere dayanan akım bozulmasının sistem üzerindeki etkisi daha gerçekçi bir değerlendirme olacaktır.

Hem tepe faktörü hem de % THB, başlangıçta harmonik akım distorsiyonunun olup olmadığını belirlerken kullanışlıdır. Ancak harmonik frekans dikkate alınmadığından, bu iki tahmin tekniği, harmonik yük ortamında çalıştırılacak ekipmanı belirlerken yeterli değildir.

### 2.3 K-Faktörü

K-Faktörü hesaplaması, frekansın trafo kayıpları üzerindeki önemli etkisini dikkate alır. K-faktörü, birim harmonik akımın karelerinin toplamının harmonik sayısının karesinin çarpımı olarak tanımlanır. Denklem formunda, K faktörü şu şekilde tanımlanır:

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_{h(pu)}^2 h^2 \quad (4)$$

Burada  $I_{h(pu)}$ ,  $pu$  olarak ifade edilen harmonik akımdır ve  $h$  harmonik sayıdır.

K faktörü, harmonik akım frekansının etkisini dikkate alır. Birim başına harmonik yük akımlarının karesi ve harmonik sayısının karesi nedeniyle ek ısıtma, “anormal sargı sıcaklığı yükselmesi nedeniyle sinüzoidal olmayan akımları besleyen transformatörlerin erken bozulmasına egemen olan özelliktir”.

## 3. HARMONİKLERE SEBEP OLAN ETKENLER

Harmonik problemler temel olarak, güç elektroniği devreleri ve bu cihazların ac/dc iletim bağlantılarında kullanılması veya güç elektroniği, mikroişlemci denetleyicileri kullanan güç sistemlerinin kontrolündeki yükler gibi teknolojik gelişmeler nedeniyle doğrusal olmayan yüklerin önemli ölçüde artmasından kaynaklanmaktadır.

Genel olarak, harmonik kaynakları şunlara ayırılır:

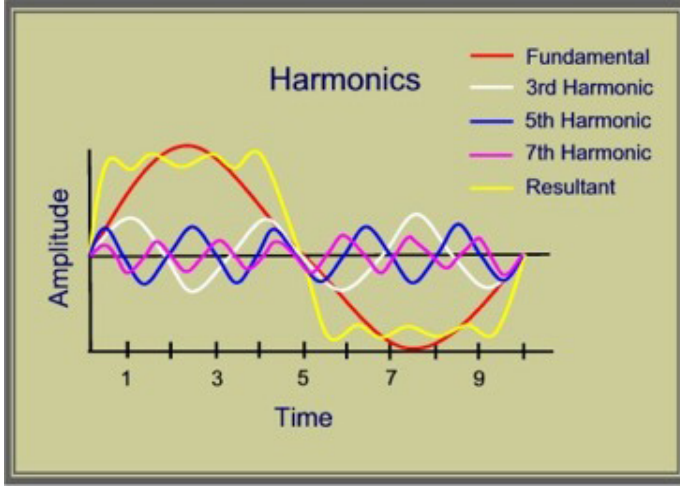
- (a) Ev içi yükler,
- (b) Endüstriyel yükler ve
- (c) Kontrol Cihazları.

IEEE 519: 1992 aynı zamanda güç sistemindeki ana harmonik kaynağını da tanımlar. Bu standartta açıklanan harmonik kaynaklar şunları içerir:

1. güç dönüştürücüler,
2. ark fırınları,
3. statik VAR kompanseör,

4. dağıtım nesil invertörler,
5. gücün elektronik faz kontrolü, anahtarlamalı güc kaynakları ve
6. Darbe genişliğinde modülasyonlu sürücüler.

Ayrıca, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, transformatör çekirdeğinin doğrusal olmayan doğası da gerilimlerde ve akımlarda ciddi bozulmalara neden olarak güc kaybını artırır. Bu nedenle harmonik çalışması, transformatörlerin çalışmasında büyük pratik öneme sahiptir.



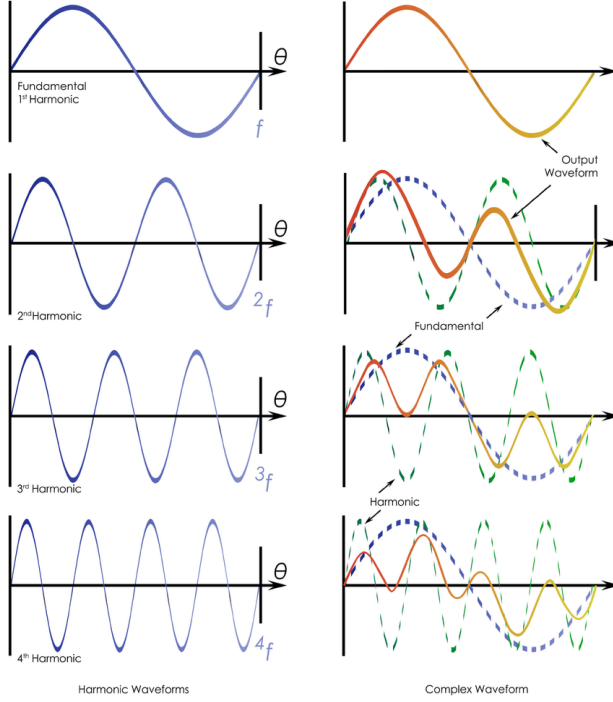
Şekil 1. Güç sistemindeki harmonikler

#### 4. HARMONİKLERİN ETKİLERİ

Özellikle akımın ve gerilimin harmonik bozulması, dağıtım trafosunun performansını aşağıdakilerle etkileyecektir:

- Harmonikler nedeniyle akımın RMS değerinin artması nedeniyle artan omik kayıp,
- Üçlü harmonikler nedeniyle artan nötr akım. 3-fazlı sistemdeki bu üçlü harmoniklerin toplamı sıfır değildir, bunun yerine aşağıdaki Şekil 2’de gösterildiği gibi toplanırlar.
- Yük akımının karesi ve frekansın karesiyle orantılı olduğundan, artan sargı girdap akımı kaybı PEC.
- Sıvı dolu trafolar için harmonik yükleme ile toplam yük kayıpları arttıkça en yüksek yağ artışı artacaktır. Diğer başıboş kayıplardaki herhangi bir artış, öncelikle en yüksek yağ artışını etkileyecektir
- Yağ ve yalıtımın daha fazla ısınması
- Transformatörün kullanım ömrü kaybı

- Transformatör anma kapasitesinin daha az kullanılması ve dolayısıyla değer kaybı.
- Artan nötr akım
- p.f düzeltme kapasitörleri (PFC) ile harmonik rezonans.
- Azaltılmış güç faktörü.



Şekil 2. Harmoniklerin toplamı

## 5. TRANSFORMATÖR KAYIPLARI

Transformatörde demir kayıpları, bakır kayıpları, histerezis kayıpları, girdap akım kayıpları, kaçak kayıplar ve dielektrik kayıplar gibi çeşitli kayıp türleri vardır. Transformatörlerde meydana gelen çeşitli kayıp türleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### 1.1 Nüve Kayıpları

Nüve kayıpları, transformatörün çekirdeğindeki değişen akıdan kaynaklanmaktadır. Bu kayıp esas olarak transformatörün manyetik çekirdeğinde meydana gelir ve çekirdek malzemenin manyetik özelliklerine bağlıdır. Bu kayıplar, histerezis kaybının ve girdap akımlarının meydana getirdiği kayıpların toplamıdır. Nüve kaybı aşağıda verilen denklemle ifade edilebilir.

$$P_{core} = P_h + P_e = k_h f B_m^x + K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (5)$$

### 1.2 Histerezis kaybı

Transformatörün çekirdeği, alternatif bir mıknatıslama kuvvetine maruz bırakılır histerezis döngüsü izlenir. Güç, histerezis kaybı olarak bilinen ısı şeklinde dağıtılır ve aşağıda gösterilen denklemlerle ifade edilir.

$$P_h = k_h f B_m^x \quad (6)$$

Burada,  $k_h$  ana malzemenin hacmine, miktarı ve kullanılan birimlerle orantılı bir sabit,  $B_m$  çekirdekdeki maksimum akı yoğunluğu,  $f$  alternatif akımın frekansı ve 'X' üssüne Steinmetz sabiti denir. Çekirdek malzemenin manyetik özelliklerine bağlı olarak değeri 1.5 ile 2.5 arasında değişir.

### 1.3 Girdap akım kayıpları

Akı kapalı bir devre ile bağlandığında, devrede bir elektromanyetik kuvvet (emf) indüklenir ve akım akar. Akımın değeri devre etrafındaki emf miktarına ve devrenin direncine bağlıdır. Çekirdek iletken malzemeden yapıldığından, bu emf'ler akımın malzemenin gövdesi içinde dolaşmasını sağlar. Bu dolaşım akımlarına girdap akımı denir. İletkende değişen bir manyetik alan meydana geldiğinde bu akımlar oluşmaktadır. Girdap akımı kaybı, çekirdeği ince laminasyonlarla yaparak en aza indirilir.

Girdap akım kaybının denklemleri;

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (7)$$

Burada,  $K_e$  girdap akımının eş verimliliği değeri çekirdek malzemenin hacmi ve öz direnci, laminasyonların kalınlığı gibi manyetik malzemenin doğasına bağlıdır.  $B_m$  akı yoğunluğunun maksimum değeri  $Wb/m^2$ ,  $t$  laminasyon kalınlığı,  $f$  frekans,  $V$   $m^3$  cinsinden manyetik malzeme hacmidir.

### 1.4 Bakır Kaybı

Bu kayıplar, transformatör sargılarının omik direncine bağlı olarak meydana gelir.  $I_1$  ve  $I_2$  birincil ve ikincil akım,  $R_1$  ve  $R_2$ , birincil ve ikincil sargı dirençleridir. Birincil ve ikincil olarak sargılarda meydana gelen bakır kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{bakır} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (8)$$

Akım harmoniklerinin günümüzde trafo performansını etkileyen önemli engeller olduğu varsayılmaktadır. Bu harmonik akım bileşenleri, sargılarda ve diğer yapısal parçalarda ek kayıplara neden olur. Herhangi bir sinüzoidal olmayan yük akımından kaynaklanan girdap akımı kayıpları şu şekilde ifade edilebilir [8]:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (9)$$

Burada  $P_{EC-R}$ ,  $I_h$  ve  $I_R$  anma girdap akımı kayıpları, harmonik sıradaki akım  $h$  ve nominal akımdır. Diğer kaçak kayıplardan kaynaklanan ısıtma genellikle kuru tip transformatörler için dikkate alınmasa da, yağlı tip transformatörler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Sinüzoidal olmayan yük akımından kaynaklanan diğer kayıplar ise şu şekilde ifade edilebilir [8]:

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^{0.8} \quad (10)$$

Burada  $P_{OSL-R}$  diğer kayıpları ifade etmektedir.

## 6. HARMONİK KAYIP FAKTÖRÜ

Harmonik kayıp faktörü,  $F_{HL}$ , sargı girdap kaybı ve diğer kaçak kayıplar üzerindeki mevcut armonik etkinin önemli bir göstergesidir. Harmonik kayıp faktörü, temel veya rms akımına normalleştirilir.

Sargı girdap akımı için  $F_{HL}$ , harmoniklerden kaynaklanan toplam girdap akımı kayıplarının güç frekansındaki girdap akımı kayıplarına oranıdır.  $F_{HL-STR}$ , harmoniğe bağlı diğer kaçak kaybın güç frekansındaki diğer kaçak kayıplara oranıdır. Girdap akımı kaybı, bir  $F_{HK}$  faktörü ile artırılır ve diğer kaçak kayıp, harmoniklerin varlığında bir  $F_{HL-STR}$  faktörü ile artar. Denklem (12) 'de gösterildiği gibi sinüzoidal olmayan durumdaki trafo yük kayıpları (M. Nageswara Rao, Malay Mandal 2011);

$$P_{LL} = P_{I^2R-rated} + F_{HL} P_{EC-rated} + F_{HL-STR} P_{OSL-rated} \quad (12)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (13)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (14)$$

Burada  $F_{HL}$  girdap akım kaybının harmonik faktörü,  $h$  harmonik sayısı ve  $h_{max}$  maksimum harmonik sayısını ifade etmektedir.

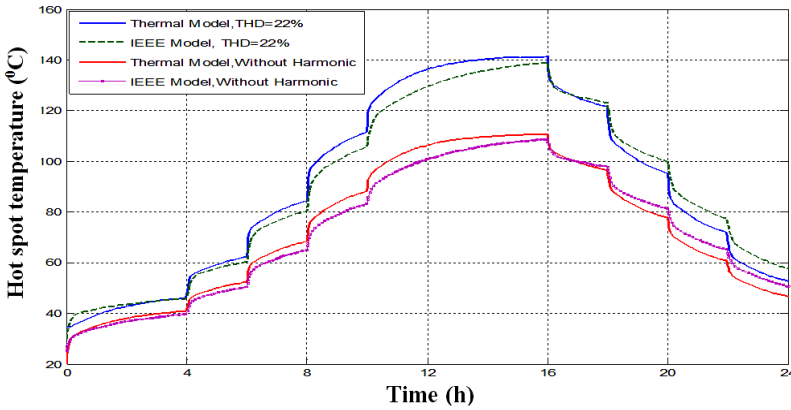
## 7. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖRÜN VERİMLİ ÖMRÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sıcak nokta sıcaklığı, faydalı transformatör ömrünün belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Sıcak nokta ve üst yağ sıcaklığını belirlemek için bu çalışmada IEEE kılavuzu ve dinamik termal model olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Üst yağ ve sıcak nokta sıcaklık hesaplamaları için yaygın olarak kullanılan model, IEEE Kılavuzunun 7'nci maddesinde açıklanmıştır. Bir transformatör içindeki sıcaklık koşullarını analiz etmek için, dinamik termal model adı verilen termal ve elektriksel süreçler arasındaki analogi kullanılır. Bazı basitleştirmelerden sonra, sıcak nokta sıcaklığını hesaplamak için kullanılan diferansiyel denklem (IEEE Std C57.91-1995):

$$\frac{I^2 \left[ K_{\theta} + \frac{P_{EC-R}}{K_{\theta}} \right]}{1 - P_{EC-R}} [\Delta\theta_{H-R}]^{1/m} = \tau_H \frac{d\theta_H}{dt} + [\theta_H - \theta_o]^{1/m} \quad (15)$$

Burada  $\theta_H$  sıcak nokta sıcaklığıdır,  $K_{\theta-R}$  sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç düzeltmesidir,  $\Delta\theta_{H-R}$  nominal sıcak nokta yükselişidir,  $\tau_H$  sıcak nokta zaman sabiti ve  $m$  doğrusal olmamayı tanımlayan üsdür.

Transformatöre sağlanan aynı harmonik yükler için sıcak nokta sıcaklığı Şekil 3'te gösterilmiştir. % 22'lik THD, sıcak nokta sıcaklıkları için harmoniklerin olmadığı yerden 30 °C'lik bir sıcaklık artışı sağlar. Simülasyon sonuçları, termal modelin ve IEEE modelinin harmonik koşullar altında üst yağ ve sıcak nokta sıcaklığını doğru şekilde hesaplayabildiğini doğrulamaktadır.



Şekil 3. Öngörülen sıcak nokta sıcaklığı.

Sıcak nokta sıcaklığı, yalıtım ömrü kaybının ve şiddetli aşırı yük koşullarında gaz kabarcıkları salma olasılığının belirlenmesinde en önemli parametre olarak kabul edilir. Sıcak nokta sıcaklığı ile yaşlanma hızlanma faktörü arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir :

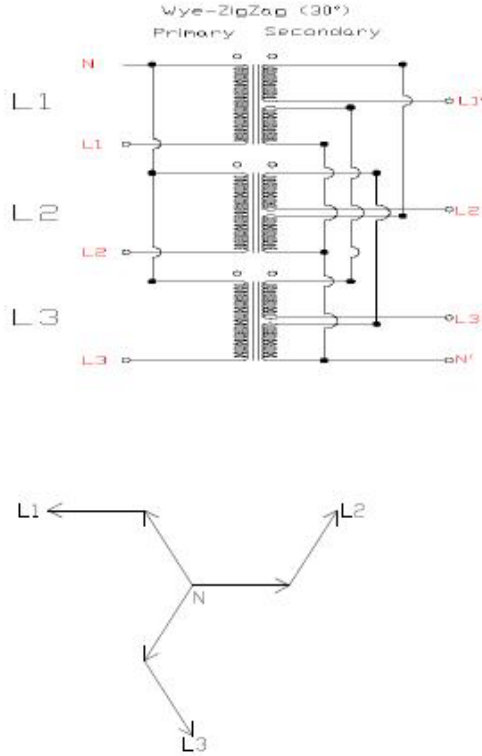
$$F_{aa} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_h + 273}\right) \quad (16)$$

İzolasyon ısıtma etkisini tahmin etmek için, ömür kaybı faktörü belirli bir süre boyunca (T) şu şekilde entegre edilir:

$$L = \frac{\int_{t=0}^{t=T} F_{aa} dt}{T} \quad (17)$$

## 8. HARMONİK AZALTMA TRANSFORMATÖRLERİ

Bu transformatörler, doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmoniklerden kaynaklanan voltaj bozulmasını ve güç kayıplarını en aza indirmek için özel olarak tasarlanmışlardır. Transformatörün kendisinden kaynaklanan voltaj bozulma artışını en aza indirmek için Harmonik Azaltma Transformatörleri (HAT), harmonik akımların gördüğü empedansı azaltmak için tasarlanmıştır. Bu, sıfır sıralı akı iptali ve Hammond'un öncülüğünü yaptığı birleşik bir strateji olan faz değiştirme yoluyla gerçekleştirilir. Bu trafolar, 300 faz kaydırmalı Wye-Zigzag vektör grubuna bağlıdır. Şematik diyagram ve vektör diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir (M. Nageswara Rao, Malay Mandal 2011).



Şekil 4. Wye-Zigzag vektör ve faz değiştiren transformatör



HAT'nin ikincil sargı konfigürasyonu, sıfır dizi akışlarını (3., 9., 15. akım harmonikleri tarafından üretilenler) birincil sargılara bağlamadan iptal eder. Bu, üçlü akım harmoniklerinin bir delta-wye transformatöründe olduğu gibi birincil sargılarda dolaşmasını önler. Ancak dengesiz bir yük için, dengesiz artık akımlar nötr iletkende kalacaktır. Akı iptali ayrıca sıfır dizi akımlarına çok daha düşük empedans ve dolayısıyla bu harmoniklerde daha düşük voltaj distorsiyonu ile sonuçlanır. Ek olarak, azaltılmış birincil sargı dolaşım akımı kayıpları azaltacak ve transformatörün daha soğuk çalışmasına izin verecektir. Kalan ana harmonikler (5., 7., 11., 13., 17. ve 19.), çeşitli HAT modellerinde faz kaymalarının eklenmesiyle değişen derecelerde işlenir.

- $3 \cdot n$  (tüm üçlü) harmonikleri iptal etmek için iki kaynak arasındaki  $60^\circ (= 180^\circ/3)$  faz kayması gerekir.
- Harmonikleri azaltmak ( $6 \pm 1$ ) için iki kaynak arasında  $30^\circ (= 180^\circ/6)$  faz kayması gereklidir.
- Harmonikleri azaltmak için ( $12 \pm 1$ ), yani 11. ve 13. harmonikleri azaltmak için iki kaynak arasında  $15^\circ (= 180^\circ/12)$  faz kayması gerekir.

## 9. K-FAKTÖR TRANSFORMATÖRLERİ

Bir transformatöre atanan K-Faktörü derecesi, transformatörün çalışma sıcaklığı sınırları içinde kalırken yük akımında harmonik içerik sağlama yeteneğinin bir indeksidir. K-faktörü 1.0, doğrusal bir yükü gösterir (harmonik yok). K faktörü ne kadar yüksekse, harmonik ısıtma etkileri o kadar büyük olur. Dolaşımdaki üçlü harmonik akımları taşımak için genişletilmiş birincil sargılar içerirler. Manyetik çekirdek, daha yüksek geçirgenliğe sahip malzeme ile tasarlandığından daha düşük bir akı yoğunluğuna sahiptir. K faktörü transformatörleri, cilt etkisini azaltmak için paralel olarak daha küçük ve yalıtılmış ikincil iletkenler kullanır. K faktörü transformatörleri, geleneksel transformatörlerden daha pahalıdır.

Dağıtım trafosundaki toplam kayıplardan, girdap akımı kayıpları, harmonikler mevcut olduğunda en yüksek değerde olurlar. Çünkü bunlar yaklaşık olarak frekansın karesiyle artar. Toplam girdap akımı kaybı  $P_{EC}$  şu şekilde verilir:

$$P_{EC} = P_{EC-rated} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 \quad (18)$$

Burada  $I_h$ , h harmonik sayısındaki toplam rms yük akımının oranıdır.

ANSI / IEEE C57.110-1986'ya göre hesaplanan yaygın referans derecelendirmeler aşağıdaki gibidir:

- K-1: Bu, yalnızca girdap akımlarının ısıtma etkilerini ve transformatör üzerindeki 50 Hz, sinüs dalgası akım yüklemesinden kaynaklanan diğer kayıpları işlemek için tasarlanmış herhangi bir geleneksel transformatörün derecelendirmesidir.
- K-4: Bu dereceye sahip bir transformatör, normal 50 Hz, sinüs dalgası, temel akım ve temel akımın %16'sından oluşan bir yüke aşırı ısınma olmadan nominal KVA sağlamak üzere tasarlanmıştır. 3. harmonik akım olarak; 5. harmoniğin %10'u; 7. harmoniğin %7'si; 9. harmoniğin % 5.5'i ve 25. harmonikten daha küçük yüzdeler. "4", bir K-1 transformatörünün girdap akımı kayıplarının dört katını karşılama yeteneğini belirtir.
- K-9: Bir K-9 transformatörü, bir K-4 nominal transformatörün harmonik yükünün %163'ünü barındırabilir.
- K-13: Bir K-13 transformatörü, K-4 nominal transformatörün harmonik yükünün %200'ünü barındırabilir.
- K-20, K-30, K-40 ve K-50: Bu K-faktörü derecelendirmelerinin her birinin yüksek sayısı, art arda daha büyük miktarlarda harmonik yük içeriğini aşırı ısınma olmadan idare etme yeteneğini gösterir.

## 10. SONUÇ

Bilgisayarlar, güç elektroniği dönüştürücülerinin vb. kullanımının artması nedeniyle, güç sistemine dahil olan harmonikler büyük ölçüde güç sistemine enjekte edilir. Güç sistemlerindeki harmonik yükler, transformatörde ek kayıplara ve ısınmaya sebep olmaktadır. Bu trafoyun beklenen kullanım ömrünün kısılmasına neden olur. Transformatör ömür kaybını doğru bir şekilde tahmin etmek için, harmonik akım spektrumunu, elektriksel özellikleri, termal davranışı, yükü ve ortam sıcaklığı profillerini hesaba katmak gerekir. Bu çalışmada, transformatörün çeşitli bölümlerindeki toplam kaybı belirlemek için bir elektromanyetik analiz kullanılmıştır. Harmoniklerin transformatörün ömür kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, harmonik akımın sıcak nokta sıcaklığını artırdığını ve kullanım ömrünü düşürdüğünü göstermektedir. Harmoniklerin dağıtım transformatörlerinin performansını ve kullanım ömrünü olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır. Sistemde yaygın olan baskın harmonikleri azaltmak/yok etmek için gereken özen gösterilmelidir.

## KAYNAKÇA

- Özüpak Y, MAMIS M. S (2019) Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(10), 1478-1484. Doi: 10.1002/tee.22966.
- K.T. Muthanna, A. Sarkar, K. Das, K. Waldner (2006) “Transformer Insulation Life Assessment”, *IEEE Trans. Power Deliv.* 21150 – 156.
- M. Lee, H. A. Abdullah, J. C. Jofriet, D. Patel, (2010) “Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers”, *Electric Power Systems Research* 80 121–129.
- Soh T. L. G, Said D. M, Ahmad N, Nor K. M, Salim F (2013) Experimental study on the impact of harmonics on transformer”, *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp.686-690.
- M. Nageswara Rao, Malay Mandal (2011), *Impact of Harmonics, Estimation of Losses and Life expectanc & Mitigation of ill effects*, academia.edu.
- S.B. Sadati, A. Tahani, M. Jafari, M. Dargahi, (2008) “Derating of Transformers under Non-sinusoidal Loads”, in: *11th International Conferenece on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM*, pp.263-268.
- Özüpak Y, MAMIS M. S, TEKE İ. H (2019) Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method. *International Journal of Engineering And Computer Science*, 8(1), 24451-24460. (Yayın No: 5774086)
- IEEE Std C57.91-(1995), “IEEE Guide for loading Mineral Oil Immersed Transformers”, 1995.
- IEEE Std C57.110-(1998), “Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Non sinusoidal Load currents”, 1998.
- IEEE 519 (1992) “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.
- I. Daut, H.S. Syafruddin, Rosnazri Ali, M. Samila and H. Haziah (2006) “The Effects of Harmonic Components on Transformer Losses of Sinusoidal Source Supplying Non-Linear Loads” *American Journal of Applied Sciences* 3 (12): 2131-2133,
- Hussein A. Attia, M. El-Metwally and Osama M. Fahm (2010) “Harmonic Distortion Effects and Mitigation in Distribution System” *Journal of American Science*.
- “Harmonic Mitigating Transformer” (2003) *Application Guide Class 7400*, Nashville, TN, USA, July
- IEEE Std C57.110-(1998) “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents”

# Bölüm 27

## MATLAB GRAFİK KULLANICI ARAYÜZÜ (GUI) TABANLI OPTİK FİBER DAĞINIK ALGILAMALI SİSTEM SİMÜLATÖRÜ



*Abdurrahman GÜNDAY<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> **Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY**, Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle Kampüsü, 16240 Nilüfer / BURSA



## 1.GİRİŞ

Son yıllarda optik fiberli algılama sistemlerini konu alan çok sayıda bilimsel araştırma yapılmış ve buna paralel olarak çeşitli projeler geliştirilmiştir. Bu çalışmalar; özellikle, çalışma ortamındaki sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının algılandığı sistem yapılarının yanı sıra sismik dalgalardan kaynaklanan harici titreşimler ve akustik frekansların algılandığı yapıları da kapsamaktadır.

Elektronik esaslı sıcaklık ve gerginliklerin algılandığı sistem yapıları, gerek Elektro Manyetik Girişim'den (EMI) etkilenmeleri gerekse eş zamanlı algılamanın yüksek maliyetleri ve kullanımdaki uygulama çeşitliliğinin dar olması nedeniyle, yerini optik fiber tabanlı algılama sistemlerine bırakmıştır. Ortamdaki ısı etkilerden kaynaklı sıcaklıklar ile ısı gerginlik oluşumlarının dağınık algılandığı optik fiberli algılama sistemlerinde, her iki parametrenin ayrı ayrı veya eş zamanlı ölçüm ve tespitinde genellikle Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarından yararlanılmaktadır [1 - 5].

Bu saçılma mekanizmalarında algılayıcı olarak kullanılan optik fiber kabloya pompalanan optik dalga formundaki sinyallerin, ortamdaki ısı değişimlere ve/veya harici ya da içsel gerginliklere bağlı olarak optik dalga kılavuzunda geriye saçılması bu tür algılama sistemlerinin temelini teşkil etmektedir. Optik dalga kılavuzunda geri yönde saçılan toplam sinyalin zaman ya da frekans domeninde ayrıştırılarak düşük frekanslı Stokes ve yüksek frekanslı, yüksek enerjili anti - Stokes bileşenlerinin elde edilmesi ve matematiksel olarak analizi ile sıcaklık ve ısı gerginlik verilerine erişilmesi mümkün mertebe yüksek zorluk içermektedir.

Sıcaklık ve ısı gerginliklerin algılanması için literatürdeki çalışmalara bakıldığında çoğunlukla OTDR (Optik Zaman Domeni Yansıma Ölçer) ve BOTDR (Brillouin Optik Zaman Domeni Yansıma Ölçer) ölçme teknikleri kullanılmaktadır [6 - 9]. Bu teknikler ve yazılım tabanlı matematiksel çözümleme yöntemleri kullanılarak Stokes ve anti - Stokes bileşenlerinden sıcaklık ve ısı gerginlik verilerini türetmek için harici programlara veya kapalı kaynak kodlu simülatörlere gereksinim duyulmaktadır.

Bu çalışmada ise geri planda Matlab kodlarını kullanan GUI (Graphical User Interface - Garafiksel Kullanıcı Arayüzü) tabanlı bir simülatör geliştirilmiştir. Bu simülatör ile tasarımı yapılan arayüz üzerinden algılayıcı optik fibere ait parametreler girilmekte ve esas alınan saçılma tipi belirlenerek, algılama performansı açısından belirleyici olan sıcaklık ve ısı gerginlik oluşumlarına ait değişimler ile algılayıcı fiberin ısı duyarlılıklarına ilişkin benzetimler gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. Simülatör, geri planda Raman ve Brillouin sinyallerindeki güç değişimi ve frekans kayması bilgilerinden, sıcaklık ve ısı gerginlik verilerinin algılayıcı fiber uzunluğu boyunca elde edildiği, matematiksek

denklem çiftlerini kullanmaktadır. Ayrıca, sistem arayüzüne girilen parametreler aracılığıyla, algılayıcı fiber uzunluğu boyunca sıcaklık ve ısı gerginlik verilerinin yanı sıra her iki parametrenin çözünürlüklerine ilişkin benzetimler görselleştirilebilmektedir.

## 2. TEORİK ALTYAPI VE BENZETİMLER

Ortamdaki sıcaklık ve ısı gerginlik gibi oluşumların dağınık olarak algılandığı optik fiberli algılama sistemleri, özellikle Raman ve Brillouin saçılmasını esas almaktadır. Raman saçılması, sıcaklık duyarlılığı yüksek bir saçılma olmasına karşılık ortamdaki gerginlik oluşumlarından etkilenmeyen ve elastik olmayan bir saçılmadır. Brillouin saçılması ise hem sıcaklık hem de gerginlik bağımlılığı olan ve her iki parametrenin eş zamanlı algılandığı sensörel sistemlerde yaygın olarak kullanılan bir saçılma mekanizmasıdır. Bu sebeptendir ki, ortamdaki sıcaklık oluşumlarının dağınık algılanmasında, optik fibere pompalanan ve geriye saçılan optik sinyalin Raman gücündeki değişimler ölçülüp değerlendirilirken, sıcaklık ve gerginliklerin eş zamanlı dağınık algılanmasında, optik sinyalin Brillouin gücü değişimleri üzerinden işlem yapılmaktadır.

Kavram olarak optik fiberli dağınık algılama yöntemi ise algılayıcı sistemlerde daha çok sıcaklık ve ısı gerginlik gibi ortamda meydana gelen parametrelerin algılanması amacıyla kullanılan ve tek bir algılayıcı ile kablo üzerinde çok sayıda noktadan algılamanın yapılabildiği bir yöntemdir.

Bu yöntemde, algılayıcı fiber içerisine gönderilen ve geri yönde saçılan ışığın enerjisindeki değişim, bir foto alıcı ile algılanarak matematiksel metotlar aracılığıyla analiz edilmektedir [10, 11, 12].

Algılayıcı optik fiber uzunluğu boyunca sıcaklık değişimleri (T), geriye saçılan ve foto alıcıda tespit edilen optik sinyalin Raman gücü ve Brillouin gücü değişimlerine bağlı olarak elde edilmektedir. Raman ve Brillouin güçleri, sırasıyla, T sıcaklık ve z kablo uzunluğunun fonksiyonu olarak eşitlikler (1) ve (2)'de verilmektedir [10, 13].

$$R_{(T)} = \left[ \frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 e^{-\left( \frac{h\Delta V_T}{kT} \right)} \quad (1)$$

$$P_B(z) = 0.5P_O \tau Y_B S v_g e^{(-2Y_R z)} \quad (2)$$

Eşitlik (1)'de  $\lambda_S$  ve  $\lambda_{AS}$  sırasıyla Raman Stokes ve anti-Stokes dalga boylarına, h Planck sabitine,  $\Delta V_T$  Raman anti-Stokes ve fibere pompalanan optik sinyalin arasındaki frekans farkına, k Boltzmann sabitine ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklığa karşılık gelmektedir.

Raman güç değişiminin sıcaklık duyarlılığı ya da sıcaklıkla yüzdesel değişimi (3)'te verildiği gibi ifade edilmektedir [13].

$$\frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} = \frac{h\Delta V_r}{kT^2} \quad (3)$$

Eşitlikte,  $\Delta V_r = 13.5$  THz ve  $T = 293$  °K ve  $k$  Boltzmann sabiti ( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ) değerleri için Raman gücün sıcaklıkla yüzdesel değişimi yaklaşık olarak  $0.80\%K^{-1}$  olarak elde edilmektedir.

Algılayıcı fiber uzunluğu boyunca meydana gelen sıcaklık oluşumlarının optik fiber kablo uzunluğu boyunca değişimi ise (4)'te verilmektedir [13].

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln \left[ \frac{h_s(t)}{h_{AS}(t)} x \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_{AS}} \right)^4 x \exp(\Delta\alpha_p xz) \right]} \quad (4)$$

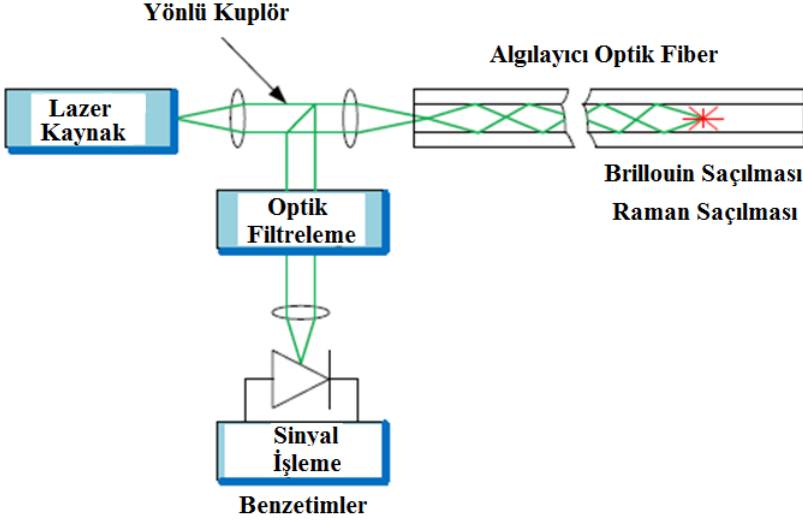
Eşitlikte  $h_s(t)$  ve  $h_{AS}(t)$  sırasıyla, Stokes ve anti-Stokes darbe cevaplarını ifade etmektedir. Burada,  $\Delta\alpha_p$  ise tek - modlu optik fiber için Neper cinsinden diferansiyel zayıflama katsayısıdır ve değeri yaklaşık  $1.3 \times 10^{-6}$  olarak alınabilir [14].

Dağınık algılamalı sistemlerle tespiti ve ölçümü yapılan ısıl oluşumların kaynağı, genel olarak algılayıcı fiberin entegre edildiği yüksek gerilim toprak altı veya havai hat enerji kabloları olabileceği gibi solar radyasyon, rüzgar efekti, yağmur ve kar gibi çevresel oluşumlar sonucu meydana gelen ısıl faktörler de olabilir.

Gerginlik oluşumlarının dağınık olarak algılandığı sistemlerde ise içsel gerginlikler ve ısıl gerginliklerin kaynağı, köprü ve tünel gibi betonarme yapıların yanı sıra raylı sistemlerde hat uzunluğu boyunca meydana gelen gerilmeler ya da çalışma ortamındaki ısıl iç dinamiklerin neden olduğu gerginlik oluşumları olabilmektedir. Bu oluşumların tamamı, eş zamanlı ve gerçek zamanlı olarak yüksek çözünürlüklerde optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerle rahatlıkla tespit edilebilmektedir.

Şekil 1'de optik fiberli dağınık algılamalı bir sisteme ait temel blok yapı verilmiştir. Blok yapıdan görüldüğü gibi algılayıcı optik fiberden geriye saçılan Brillouin ve Raman sinyalleri optik filtrelemeden geçirilerek bir foto diyot aracılığıyla alınıp, sinyal işleme ünitesinde analizi yapılmaktadır. Matematiksel analizlerden sonra sıcaklık, ısıl gerginlik ve duyarlılık değişimleri Brillouin ve Raman bileşenlerinden elde edilebilmektedir.





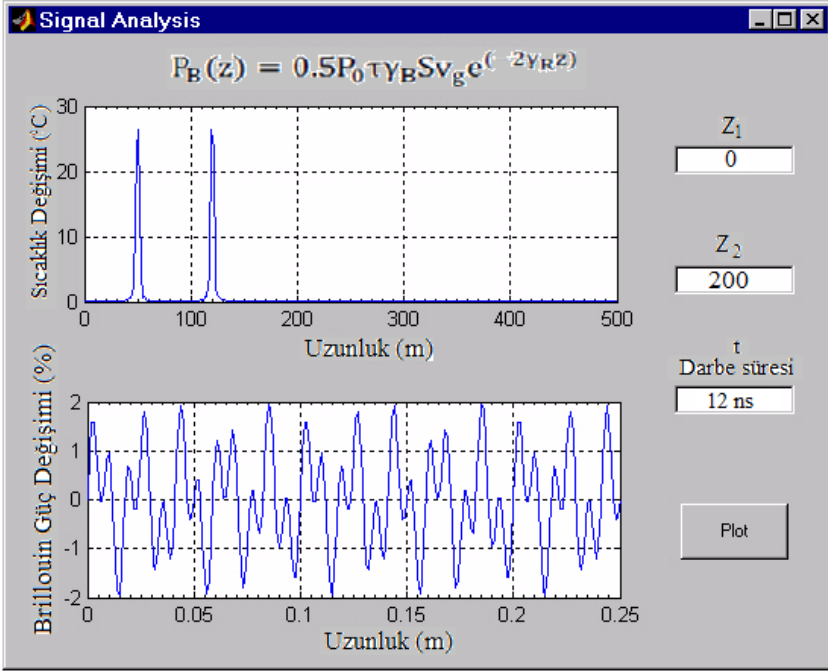
*Şekil 1. Optik fiberli dağıtık sıcaklık ve gerginlik algılamalı sistem blok diyagramı*

Bu çalışmada, tasarımı verilen Matlab GUI tabanlı simülatör, algılama sisteminin sinyal işlemeden sonraki kısmında yer almakta olup GUI arayüzün arka planında Matlab kodları ile yazılmış alt programlar aracılığıyla benzetimlerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Simülatörde, GUI arayüzü üzerinde veya alt programda yer alan algılayıcı fiber parametrelerinden bazıları; algılayıcı fibere pompalanan sinyalin darbe süresi, sinyalin dalga boyu, algılayıcı fiberin zayıflama katsayısı, lazer kaynağın fibere pompaladığı sinyalin maksimum gücü, fiberin çekirdek ve kılıf kırılma indisi, ışığın boşluktaki hızı, uzamsal çözünürlük, fiber kablo uzunluğu, dağıtık sıcaklık algılamada ölçüm alınan nokta sayısı, silika fiberin yoğunluğu, Raman ve Brillouin gücünün sıcaklık ve ısıl gerginlikle değişim katsayıları, fiber yakalama katsayısı, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları olarak verilebilir.

Şekil 2’de verilmiş olan simülatör ekranında algılayıcı fiber uzunluğu (z) boyunca algılayıcı fiberin algıladığı ve ortamdaki sıcaklık değişimine ve Brillouin güç değişimine ilişkin benzetimlere ait ekran görüntüleri verilmiştir. Görüldüğü gibi, ilk ekranda z1 ve z2 mesafeleri girilerek algılayıcı fiber boyunca sıcaklığın arttığı bölgelere ait yakınlaştırılmış görüntüler elde edilmektedir.

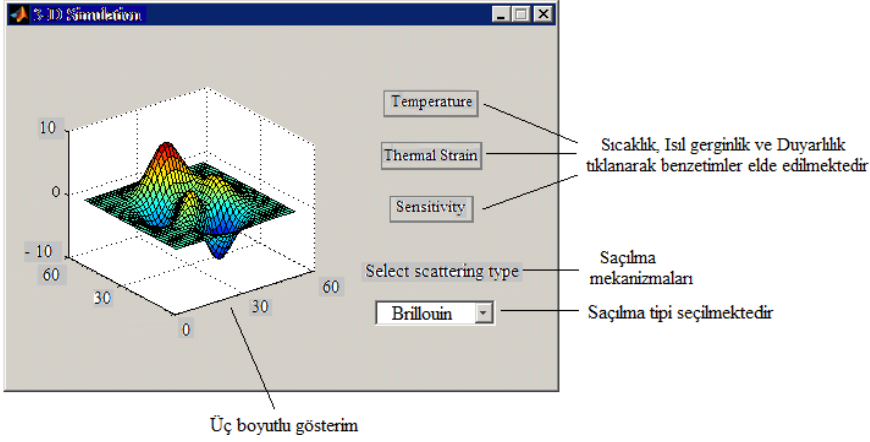
Aynı durum geriye saçılan optik sinyalin Brillouin gücündeki değişim için de geçerlidir. Brillouin gücündeki değişimler, 0 m - 0,25 m aralığında 12 ns darbe süresi (1,2 m uzamsal çözünürlükte) için elde edilmiştir. Burada uzamsal çözünürlük parametresi değişimi veya kablo mesafesinde değişimler girilerek istenen verilere ulaşmak mümkün olabilmektedir.



Şekil 2. GUI tabanlı simülâtörde sinyal analizi ekranı

GUI tabanlı simülâtörde, optik fiber için saçılma mekanizmasının tipi seçilerek algılayıcı fiber boyunca sıcaklık (temperature), ısıl gerginlik (thermal strain) ve duyarlılık (sensitivity) benzetimleri, 3 - boyutlu olarak elde edilebilmektedir.

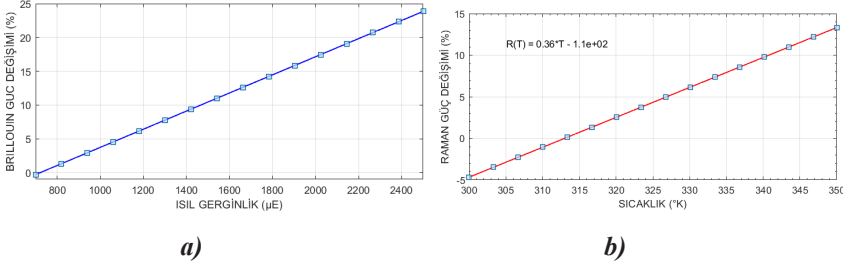
Şekil 3'te Brillouin saçılmasını esas alan bir algılama sistemi için 3 - boyutlu sıcaklık verileri elde edilmiştir. Gösterimde koyu kırmızı renkli bölgeler, algılayıcı fiberde sıcaklığın maksimum değerlere ulaştığı kısımları, açık renkler ise daha düşük sıcaklıklı bölgeleri temsil etmektedir.



**Şekil 3.** Isıl parametrelere ilişkin 3 - boyutlu gösterim ekranı

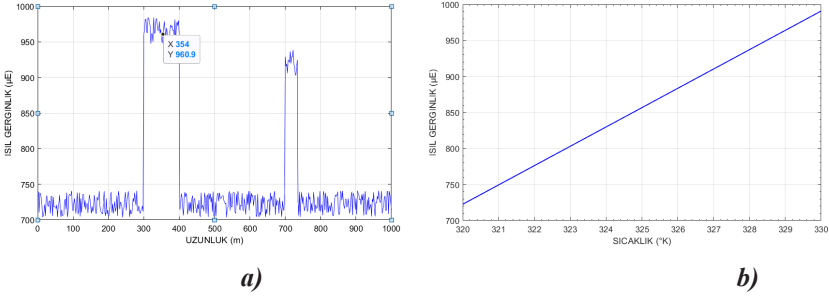
Görüldüğü gibi bu ara yüzde istendiğinde sıcaklık, ısıl gerginlik ve her iki parametreye ilişkin Brillouin güç değişimi ve Raman güç değişimi ilişkilerine ait benzetimler elde edilebilmektedir. Bu benzetimler istendiğinde Matlab editörde kodlara dönüştürülerek m.file üzerinden 2 - boyutlu grafikler halinde çizdirilebilmektedir.

Şekil 4'te Brillouin güç değişiminin ısıl gerginlikle değişimi, Raman güç değişiminin ise ortamdaki sıcaklık değişimleri ile ilişkisi gösterilmiştir. Şekil'den de açık bir biçimde görüldüğü gibi, sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumları her iki güç bileşenine lineer olarak bağlıdır.



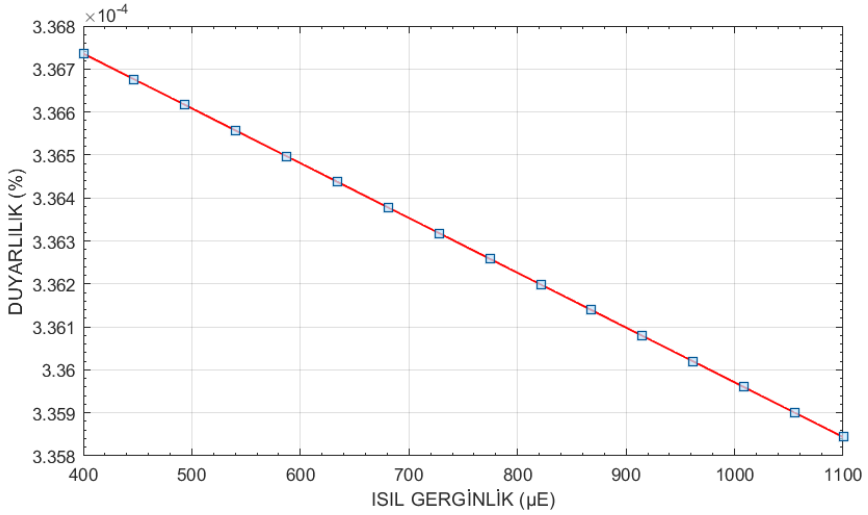
**Şekil 4. a)** Brillouin güç değişiminin ısıl gerginlikle değişimi **b)** Raman güç değişiminin sıcaklıkla değişimi

Şekil 5'te, ısıl gerginlik oluşumlarının 1000 m uzunluklu algılayıcı optik fiber boyunca aldığı değerler ve sıcaklığın 320 °K - 330 °K aralığındaki değişimi gösterilmiştir.



**Şekil 5.** Isıl gerginlik oluşumlarının **a)** kablo boyunca değişimi ve **b)** sıcaklıkla değişimi

Şekil 6’da, GUI tabanlı simülörün 3 - boyutlu gösterim ekranında belirlenen seçimleri yaptıktan sonra ısıl gerginlik ve duyarlılık (Brillouin ve Raman güç değişimlerine ilişkin) ilişkisine ait grafiksel gösterim Matlab editörü kullanılarak elde edilmiştir. Grafikten, duyarlılığın ısıl gerginlikle lineer olarak azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.** Isıl gerginlik ile duyarlılık değişimi gösterimi

### 3. SONUÇ

Bu çalışmada, Matlab GUI tabanlı bir simülör geliştirilmiştir. Simülörün optik fiberli dağılık sıcaklık ve ısıl gerginlik algılama ile Raman ve Brillouin güç bileşenlerinin ısıl duyarlılıklarının elde edilmesi süreçlerinde kullanımına ilişkin benzetimler elde edilmiştir. Kullanıcı arayüzü üzerinden girilen parametrelerle benzetimler türetilbildiği gibi alt program kodlarının Matlab editörüne transferi ile de istenen çözümler ve analizler elde edilebilmektedir.

Bunlara paralel olarak, dağınık algılamalı çalışmalardaki veri analizlerinin genellikle Matlab editörü üzerinden ya da kapalı kaynak kodlu harici simülasyon programları ile gerçekleştirilebildiği düşünülürse, çalışma bu hali ile alanda çalışan araştırmacı ve akademisyenlere büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

**KAYNAKLAR**

- [1] J. Smith, A. Brown, M. DeMerchant and X. Bao, “Simultaneous Distributed Strain and Temperature Measurement,” *Applied Optics*, vol. 38, no. P. 5372, September, 1999.
- [2] K. R. C. P. De Souza, “Fiber Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering”, PhD Dissertation, University of Southampton, 1999.
- [3] S. Cherukupalli et al., “Application of Distributed Fiber Optic Application Sensing on BC Hydro’s 525kV Submariner Cable System”, *Cigré Session*, B1 - 203, 2006.
- [4] J. Downes, H. Y. Hung, “Distributed Temperature Sensing Worldwide Power Circuit Monitoring Applications”, *International Conference on Power system Technology-Powercon*, Singapore, 2004.
- [5] Makhkamova I., “Numerical Investigations of the Thermal State of Overhead Lines and Underground 656, 2012. Cables in Distribution Networks”, PhD Dissertation, School of Engineering and Computing Sciences, Durham University, 2011.
- [6] A. Gunday, S. E. Karlık, G. Yılmaz, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3), 517, 2014.
- [7] Angulo-Vinuesa, X., Martin-Lopez, S., Nuno, J., Corredera, P., Ania-Castanon, J.D., Thevenaz, L. ve Gonzalez-Herraez, M., “Raman-Assisted Brillouin Distributed Temperature Sensor Over 100 km Featuring 2 m Resolution and 1.2°C Uncertainty”, *Journal of Lightwave Technology*, 30 (8): 1060-1065, 2012.
- [8] Luo, J., Hao, Y., Ye, Q., Hao, Y. ve Li, L., “Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Lines”, *Journal of Lightwave Technology*, 31 (10): 1559-1565, 2013.
- [9] Gunday A., *Computational analysis of the core refractive index dependencies of Brillouin frequency shift and Brillouin power change in Brillouin coherent detection based distributed sensing systems Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications* 502 - 511 12 / 9-10, 2018.
- [10] G. Yılmaz, S. E. Karlık, “A Distributed Optical Fiber Sensor for Temperature Detection in Power Cables”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 125(2), 148-155, 2006.
- [11] A. Gunday, S. E. Karlık, G. Yılmaz, “Analysis of Variation of Brillouin and Rayleigh Scattering Coefficients with Thermal Strain in Landau-Placzek Ratio Based Optical Fiber Distributed Sensing for XLPE Insulated Power Cables”, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 8(2):920-929, 2013.

- [12] M. Cirigliano, G. Cattaneo, P. Boffi, A. Barberis, U. Perini, G. Pirovano, M. Martinelli, “Overhead power lines temperature measurements by a fiber optic Raman sensor”, 20th Int. Conf. on Optical Fibre Sensors, Edinburgh, UK, 2009.
- [13] Alahbabi, M., Distributed Optical Fiber Sensors Based on the Coherent Detection of Spontaneous Brillouin Scattering, PhD Dissertation, University of Southampton, 2005.
- [14] Farahani, M.A., Gogolla, T. “Spontaneous Raman Scattering in Optical Fibers with Modulated Probe Light for Distributed Temperature Raman Remote Sensing”, J. Lightwave Technologies. 1379-1391 p. 1999.

# Bölüm 28

## İKİ EKSENLİ GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİ İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI MİKRODENETLEYİCİ DENETİMLİ KONTROL ÜNİTESİ PROTOTİPİ



*Öğr.Gör. Olcay PALTA<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Bitlis Eren Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, [paltaolcay@gmail.com](mailto:paltaolcay@gmail.com)





## 1. GİRİŞ

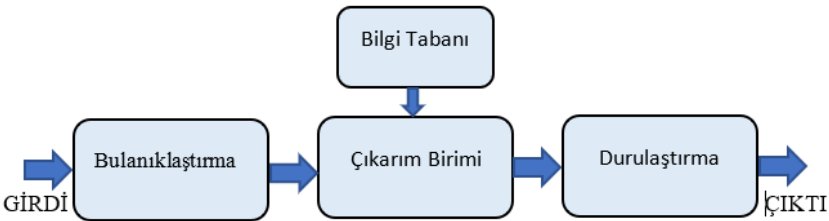
Güneş takip sistemleri, tek eksenli veya enerji verimliliğini artırmak için iki eksenli olarak tasarlanmaktadır. Güneş takip sistemleri güneş panellerini, güneşten gelen ışınları absorbe edecek şekilde, güneşe en uygun pozisyona yönelmeye çalışarak, elde edilecek enerjinin büyüklüğünün maksimuma çıkarılması hedeflenmektedir.

Ancak, güneş ışınlarının  $90^0$  dik düşmesini sağlamada yüksek hassasiyete de ihtiyaç yoktur,  $90^0$  dik açıdan  $10^0$  lik sapmanın verimi % 98.5'in üzerindedir. Güneş panellerinin kullanımında, güneş takip sistemlerinin olması zorunlu değildir, ancak verimliliğinin maksimum olması için gerekli şartlardan biridir [1].

Bulanık mantık, sistem kontrollerinde belirli girdi verilerine karşı, çıkışa en uygun cevabı veren bir mantık yapısıdır. Belirsizliği ifade edebilmemizi ve nonlinear fonksiyonları da modelleyebilmemizi sağlar. Örnek verecek olursak; Çamaşırın makinelerinde, giysilerin kirliliğini, ağırlığını, kumaş cinsini algılamada, elektrik süpürgelerinde, yerin durumuna ve kirliliğine bağlı olarak motor gücünü ayarlar

Bulanık bir sistemin oluşumu şu şekildedir;

- Bilgi tabanı: Kural tablosunun oluşturulduğu, verilerin tutulduğu yerdir.
- Bulanıklaştırma katı: Kesin sayısal değerler, üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık değerlere dönüştürülür.
- Çıkarım birimi: Girdilere karşı gelen kurallardan sonuç çıkarır.
- Durulaştırma birimi: Bulanıklaştırılmış sonuçları kesin değerlere dönüştürür.



Şekil 1. Bulanık bir sistemin çalışma katları

## 2. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ

Enerjinin bir ülkenin sanayi ve sosyo-ekonomik kalkınması için temel bir unsur olduğu gerçeğini inkâr etmek mümkün değildir [2].

Fosil yakıtların gün geçtikçe ihtiyaç doğrultusunda kullanımının artması, bunun sonucunda çevreye verdikleri zarar ve hızlı bir şekilde tükeniyor olması yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmıştır [3]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden sağlanan enerji ise bunlardan başlıcalarıdır.

Önceleri, ısıtma ve sıcak su elde etme amacı ile kullanılan güneş enerjisi, günümüzde güneş panel teknolojileri sayesinde, güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren önemli elektrik enerjisi kaynaklarından biri haline gelmiştir. Elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan güneş pilleri fotovoltaik olarak adlandırılmaktadır. Güneş pilleri, akım veya gerilim ihtiyacına, dolayısı ile tüketilecek güç miktarına ve uygulamaya bağlı olarak, seri veya paralel bağlanmak suretiyle kullanılabilir [1]. Bir fotovoltaik (PV) panelin performansı, yönünden ve yatay düzlemle olan eğim açısından etkilenir. Bunun nedeni, bu parametrelerin her ikisinin de PV panelinin yüzeyi tarafından alınan güneş enerjisi miktarını değiştirmesidir [4]. Fotovoltaik güneş panellerin enerji üretim verimliliğinin artırılması için güneş takip sistemleri kullanılmaktadır [5].

Güneş panelleri üzerine düşen ışımının  $90^0$  olarak dik açıda gelmesi verimliliği daha etkin yapacaktır. Bunun için ise kontrollü hareketli platformlarla güneşi takip eden sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerden daha fazla verim alınması için, hareketli panellerin kontrollerinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi ve enerji veriminin daha etkili olması amaçlanmaktadır. Literatürde, güneş takip sistemlerinin, hareket kontrolünün birçok yöntem-teknikle yapıldıkları da görülmüştür.

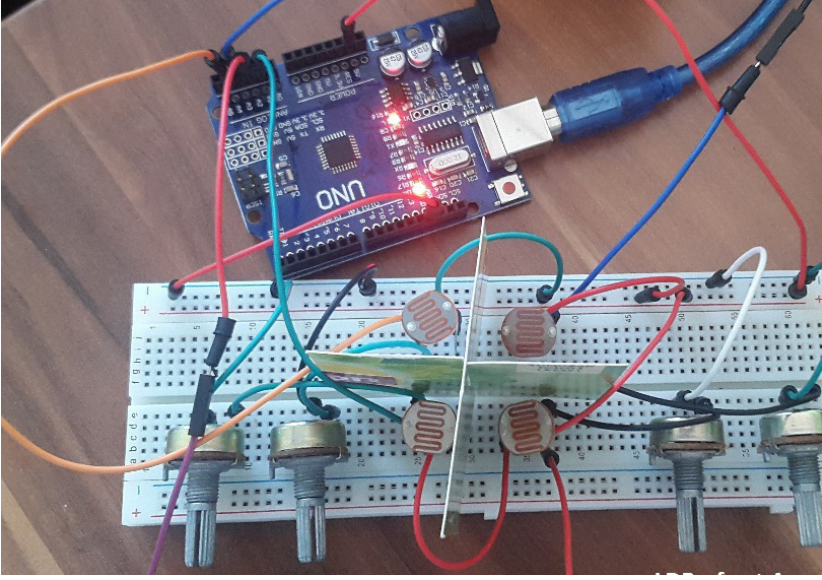
## 3. MATERYAL-YÖNTEM

### 3.1. Kontrol Ünitesi Prototipinin Tasarlanması

Güneş panellerinde, sabit panel sistemlerine kıyasla daha yüksek verim elde edilen, 2-eksenli güneş takip sistemlerinin kontrolü birçok farklı yöntem ve tasarımla yapılmaktadır. Bu çalışma ile, doğu-batı, güney-kuzey yönlerinde monte edilmiş LDR ışık sensörlerinden gelen analog bilgiyi, programsal yapısı oluşturulmuş mikrodenetleyici yardımı ile sayısal bilgiye dönüştürülmüştür. Bu sayısal girdiler, bulanık mantığın bilgi tabanında bulunan kural tablosu yardımıyla, kurala karşılık gelen sonuç, motor kontrol ünitesine aktarılır.

Çalışma kapsamında, denetleyici arduino (atmega) kullanılarak güneş ışığı bilgisi, 4 kenar yerleştirmeli bir LDR sensör dizisinden programa anlık olarak aktarılması sağlanmıştır. Tasarımda 4 adet 12mm LDR Işık

Sensörü, 4 adet of-set ayarı için 100K luk potansiyometre (ayarlı direnç), denetleyici olarak, kullanımı ve programsal yapısı kolay olan Uno serisi Arduino kullanılmıştır.



**Resim 1.** 4 kenar dizimli LDR sensörleri ve of-set dirençleri



**Şekil 2.** Kontrol ünitesi prototipinin oluşum bloğu

### 3.2. Kontrol Ünitesi Prototipinin Çalışması

Prototipimiz, 4 köşe dizimli 12mm çapında LDR ışık sensörlerimiz yardımıyla ışık şiddeti direnç değerini analog olarak ölçer, bu analog değer denetleyicimiz olan arduino(atmega) uno ya aktarılmıştır. Analog girişlerden sağlanan bu 4 LDR çıkış bilgisi bilgisayar ortamında kod yazılımı (Şekil 3)' de yapılan programda sayısal değerlere çevrilmiştir.

```

yeni_ldr_okuma_al_an
#define ldr1bati A1
#define ldr2guney A2
#define ldr3dogu A3
#define ldr4kuzey A4
void setup() {
  pinMode(ldr1bati, INPUT);
  pinMode(ldr2guney, INPUT);
  pinMode(ldr3dogu, INPUT);
  pinMode(ldr4kuzey, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int deger0 = analogRead(ldr1bati);
  int deger1 = analogRead(ldr2guney);
  int deger2 = analogRead(ldr3dogu);
  int deger3 = analogRead(ldr4kuzey);
  float bati = (5.00/1024.00)*deger0;
  float guney = (5.00/1024.00)*deger1;
  float dogu = (5.00/1024.00)*deger2;
  float kuzey = (5.00/1024.00)*deger3;
  float dogubati = dogu-bati;
  float kuzeyguney = kuzey-guney;
  Serial.print("olcay palta ");
  Serial.print("bati=");
  Serial.println(bati);
  delay(100);
  Serial.print("guney=");
  Serial.println(guney);
  delay(100);
  Serial.print("dogu=");
  Serial.println(dogu);
  delay(100);
  Serial.print("kuzey=");
  Serial.println(kuzey);
  delay(300);
  Serial.print("dogubati=");
  Serial.println(dogubati);
  delay(100);
  Serial.print("kuzeyguney=");
  Serial.println(kuzeyguney);
  delay(3000);
}

```

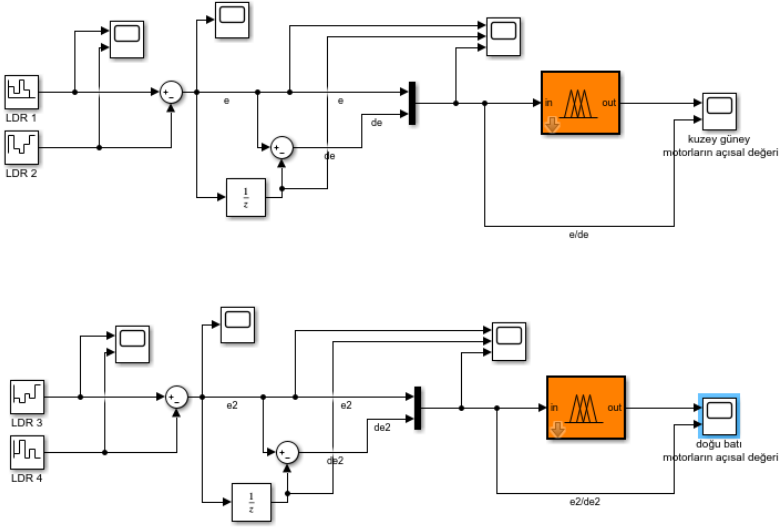
```

COM3
dogubati=1.27
kuzeyguney=0.34
olcay palta          bati=1.87
guney=2.20
dogu=3.14
kuzey=2.53
dogubati=1.27
kuzeyguney=0.34
olcay palta          bati=1.87
guney=2.19
dogu=3.13
kuzey=2.53
dogubati=1.27
kuzeyguney=0.35
olcay palta          bati=1.87
guney=2.19
dogu=3.14
kuzey=2.53
dogubati=1.27
kuzeyguney=0.34
 Otomatik Kaydırma  Zaman damgasını göster

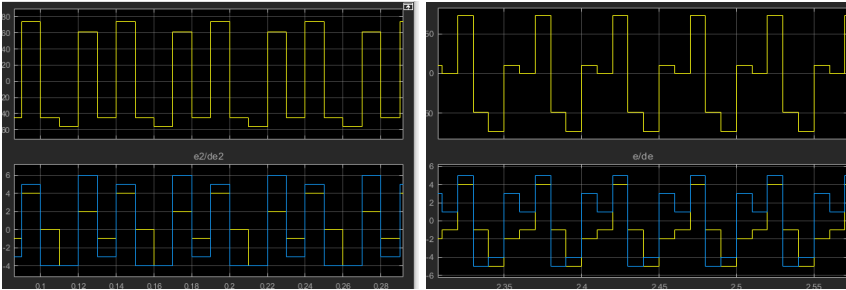
```

**Şekil 3.** Mikrodenetleyici programında LDR lerin sayısal olarak değerinin okunması

Bu oluşturulan sayısal çıktılar MATLAB Fuzzy Logic Toolbox ına aktarılmış ve Toolbox da önceden oluşturulan kural tablosu işletilmiştir. Bu işlenen kural taplosundan çıkan veriler (Şekil 4)' deki MATLAB Simulink de tasarlanan devre bloğunda okunarak, 4 köşe bölgesi ışık seviyesi değerini birbirine eşit olacak şekilde, güneş sistemi platformunu doğu-batı güney-kuzey yönlerine çevirir. 2 Eksen için iki adet PWM çıkışı sağlanmıştır.



Şekil 4. MATLAB Simulink de tasarlanan devre bloğu



Şekil 5. İki eksen motorunun sürülmesi için gerekli sinyal

#### 4. SONUÇLAR

Literatürde, güneş takip kontrol sistemleri kontrolü, birçok farklı uygulamalar ile yapılmıştır. Literatürdeki diğer uygulamalardan farklı olarak, prototipimiz hem mikrodenetleyici kontrollü hem de bulanık mantık kontrollü olarak çalıştırılmaktadır.

Çalışmada, güneş paneli köşelerine monte edilen ışık sensörlerinden gelen bilgi mikrodenetleyiciler yardımı ile sayısal veriye dönüştürülmüş, bu veriler bilgisayarda MATLAB Fuzzy Logic kural tablosu işletilerek MATLAB Simulink de tasarlanan devre bloğundan 2-eksenli panel kontrol motorlarına aktarılacak çıkış sinyalleri üretilmiştir. Böylece, bulanık mantık tabanlı mikrodenetleyici denetimli kontrol ünitesi prototipi oluşturulmuştur. Enerji üretim performansı bakımından sabit eksenli sistemlere göre bulanık mantık kural tablosu iyileştirilmesine bağlı olarak %25-%34 oranları arasında verimlilikte çalıştığı görülmüştür. Sistem prototip olarak kurulmuş olup sahada kurulmasının kar-zarar maliyeti hesaplanmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Oral, G., Uçan, O. N., 2012, “Güneş takip sistemleri ve prototip gerçekleştirme”, İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi (İaüd), 4(3), 1 – 14.
- [2] Karimov Kh. S., Saqib M.A., Akhter P., Ahmed M.M., Chatta J. A., Yousafzai S.A. “A Simple Photo-Voltaic Tracking System”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2005, 87, pp. 49-59.
- [3] Polatçı, H., Yıldız, AK. 2016. “Güneş Takip Sistemli Bir Güneş Enerjili Pişirici Geliştirilmesi ve Performansının Belirlenmesi”, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 33 (Ek sayı),137-142
- [4] Kacira M., Simsek M., Babur Y., Demirkol S. “Determining Optimum Tilt Angles and Orientations of Photovoltaic Panels in Sanliurfa, Turkey”, Renewable Energy, 2004, 28, pp. 1265-1275.
- [5] Toylan, H. ve Hüner, E. (2017). Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım (ANFIS) Tabanlı Güneş Takip Sistemi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(2), 546-554.
- [6] Efe S. B., UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2018. V116, #3, pp. 391–406