



Haziran 2023

# Mühendislik Bilimleri Alanında Akademik Çalışmalar

EDİTÖRLER

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP  
Doç. Dr. Savaş BAYRAM  
Doç. Dr. Mahmut KAYAR

**gece**  
kitaplığı

**İmtiyaz Sahibi / Publisher • Yaşar Hız**  
**Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • Eda Altunel**  
**Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Gece Kitaplığı**  
**Editörler / Editors • Prof. Dr. Coşkun ÖZALP**  
Doç. Dr. Savaş BAYRAM  
Doç. Dr. Mahmut KAYAR  
**Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2023**  
**ISBN • 978-625-430-854-3**

**© 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 Bilimleri Alanında Akademik Çalışmalar

Haziran 2023

## Editörler

Prof. Dr. Coşkun ÖZALP  
Doç. Dr. Savaş BAYRAM  
Doç. Dr. Mahmut KAYAR



# İÇİNDEKİLER

## BÖLÜM 1

### BİYODİZEL TEKNOLOJİLERİ

*Canan CİMŞİT, Arzu KEVEN* .....1

## BÖLÜM 2

### ARDUINO GELİŞTİRME ORTAMINDA KESME İŞLEMLERİ

*Ali KAVURUR*.....15

## BÖLÜM 3

### MANYETİK REZONANS GÖRÜNTÜLERİNDEN BEYİN TÜMÖRÜNÜN TESPİTİNDE DERİN EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI HİPERPARAMETRELERİNİN ETKİSİ

*Ceren KAYA, Rukiye UZUN ARSLAN, Irem SENYER YAPICI*.....39

## BÖLÜM 4

### GIDALARDAKİ FİTALAT ESTERLERİNİN VARLIĞI VE GIDA GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Gürsel İŞÇİ* .....59

## BÖLÜM 4

### BATI KARADENİZ HAVZASI'NDA YER ALAN İLLERİN KÖPPEN- TREWARTHA YÖNTEMİNE DAYALI İKLİM SINIF TÜRÜNÜN TESPİTİ

*Berna AKSOY, Rukiye UZUN ARSLAN*.....73

## BÖLÜM 5

### TERMİK SANTRALLERDE AKIŞKAN YATAK PROSESİ VE TÜRKİYE'DEKİ DURUMU

*Zehra ÇETINKAYA* ..... 87

## BÖLÜM 6

### ATIK YAĞLARIN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

*Belit KERMAN, Ali Osman ATAHAN, Murat KARACASU* ..... 105

## BÖLÜM 7

### DERİN ÇEKME İŞLEMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

*Vedat TAŞDEMİR, Cebeli ÖZEK* ..... 121



# BÖLÜM 1

## BİYODİZEL TEKNOLOJİLERİ

*Canan CİMŞİT<sup>1</sup>, Arzu KEVEN<sup>2</sup>*

---

1 Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu, Gölcük-Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-3222-1735) ccimsit@kocaeli.edu.tr

2 Kocaeli Üniversitesi Gölcük Meslek Yüksekokulu, Gölcük-Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0040-9167) arzu.keven@kocaeli.edu.tr

## GİRİŞ

Dünya nüfusunun artışı ve yeni teknolojilerin gelişmesiyle birlikte günümüzde enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün daha fazla artmaktadır. Enerjiye olan yoğun talebe rağmen, fosil kaynaklar hızla tükenmektedir. Bu nedenle alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi artmakta olup, bu kaynakların kullanımlarının yaygınlaştırılması amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Alternatif enerji kaynakları arasında başta güneş enerjisi, jeotermal enerji ve atık ısı enerjisi gelmektedir.

Doğada kolay bozulabilmesi, çevre dostu olması, herhangi bir modifikasyon gerekmeden dizel motorda kullanılabilmesi, yenilenebilmesi gibi özellikleriyle biyodizel, alternatif olarak görülen kaynaklardan biridir [1].

Fosil yakıtların büyük ölçekli yanması hava kirliliğine neden olur. Geleneksel petrol dizelinin ikame yakıtı, teknik olarak mümkün, ekonomik olarak rekabetçi, çevreye zararsız ve makul bir maliyetle yeterince temin edilebilir olmalıdır. Bu kapsamda bitkisel yağlar, bio-alkoller, biogaz ve biodizel alternatif seçenekler olarak değerlendirilmektedir. Bu alternatif yakıtlar arasında biyodizel, dizel motorlara ek yakıt olarak tanıtılmaktadır. Biyodizel, bitkisel yağlardan elde edilen uzun zincirli yağ asitlerinin mono-alkil esterlerinden oluşur. Yenilenebilir, toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostudur ve ayarlanabilir fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle çok az değişiklikle veya hiç değişiklik yapılmadan sıkıştırma ateşlemeli (dizel) motorlarda kullanılabilir. Aynı zamanda, çok daha az karbon monoksit üreten uygun yanma emisyon profiline sahiptir [2].

Dizel yakıtı, yüksek verimliliği nedeniyle sanayi, elektrik ve ulaşım alanlarında yaygın olarak kullanılan bir yakıttır. Dizel yakıtın yanmasından kaynaklanan karbon monoksit, duman ve hidrokarbonlar gibi kirleticiler, insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Bu emisyonları düşürmeyi kolaylaştırmak için, yenilenebilir bir kaynaktan elde edilen yakıt oldukça umut vericidir. Biyodizel ve biyoalkoller, mevcut motorlarda çok fazla değişikliğe uğramadan kullanılacak potansiyel yakıtlardır. Bu yakıtlar dizele benzer yakıt özelliklerine sahiptir [3].

Bu çalışmada biyodizel teknolojileri ele alınmıştır. Çalışmada biyodizel hammaddeleri, biyodizelin özellikleri, biyodizel üretim teknolojileri ve biyodizelin avantajları ve dezavantajları incelenmiştir.

### 1. BİYODİZEL HAMMADDELERİ

Biyometanol, biyodizel ve biyogaz, farklı biyokimyasal yollardan üretilen çeşitli tarımsal biyokütle ana biyoyakıt bileşenleridir [4].

Dünya çapındaki büyük miktarda dizel yakıt talebi ve doğrudan yan-



masının olumsuz çevre ve sağlık etkileri nedeniyle, biyodizel üretimi ve tüketimi, mineral dizelin kısa vadeli en iyi ikamesi olarak küresel olarak artmaktadır. Bununla birlikte, biyodizel üretimi için yenilebilir ve yenilebilir olmayan yağ hammaddelerinin kullanılması, hammadde mevcudiyeti ve maliyeti, sera gazı emisyonu, arazi kullanım değişiklikleri ve yakıt ile gıda/yem rekabeti gibi çeşitli tartışmalı konulara yol açmıştır. Neyse ki, bu sorunlar ekin dışı hammaddeler kullanılarak etkili bir şekilde aşılabılır. Bu bağlamda, atık odaklı yağlar/yağlar, önemsiz toplama/geri dönüşüm maliyetlerini göz ardı ederek biyodizel üretmek için mükemmel seçenekler olarak önerilmiştir [5].

Biyodizel için hammadde seçimi genellikle yerli kaynağa bağlıdır. Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir yakıt kaynağı olan biyodizel, yakın gelecekte ulaşım sektöründe de belirleyici bir rol oynayacaktır. Biyodizelin özellikleri, ana sıvı yağın veya katı yağın, besleme stoğunun doğasından büyük ölçüde etkilenen yağ asidi bileşimlerine bağlıdır. Biyodizelin özellikleri dizele benzer. Bununla birlikte, biyodizelin özelliklerindeki değişiklik, dizel motorun performansının ve emisyonunun doğasında da değişikliğe neden olur [6].

Biyodizel, bitkisel yağlardan, hayvansal yağlardan, atık yemeklik yağlardan ve yosundan üretilir [7]. Bitkisel yağlar, bazı tarım ürünlerinin meyve, çekirdek ve tohumlarının işlenmesi sonucu elde edilmektedir [8].

En umut verici alternatif olarak biyodizel şu anda kolza tohumu, soya fasulyesi, ayçiçeği ve hurma gibi geleneksel olarak yetiştirilen yenilebilir bitki yağlarından üretilmektedir [9].

### **1.1. Birinci nesil biyodizel**

Birinci nesil biyodizeller yenilebilir hammaddelerden üretilir, yenilebilir hammadde örnekleri kolza tohumu yağı, soya fasulyesi yağı, Hindistan cevizi yağı, mısır yağı, hurma yağı, hardal yağı, zeytinyağı, pirinç yağıdır. Biyodizel üretimi için yenilebilir hammadde kullanımı biyodizel çağının başında oldukça popülerdir. Ekinlerin mevcudiyeti ve nispeten kolay dönüştürme prosedürü, birinci nesil hammaddelerin ana faydalarıdır. Gıda ürünlerinin maliyetini artıran bu hammaddelerin kullanımındaki en büyük dezavantaj gıda arzında kısıtlılık riskidir. Çevre koşullarına uyum, yüksek maliyet ve sınırlı ekim alanı da yenilebilir hammaddelerden biyodizel üretiminin önündeki engellerdir. Bu dezavantajlar, kullanıcıları biyodizel üretimi için başka alternatif kaynaklara geçmeye zorlamıştır [10].

### **1.2. İkinci nesil biyodizel**

Birinci nesil biyoyakıtların aksine, ikinci nesil biyoyakıtlar, gıda dışı biyokütle ve tarımsal kalıntıları hedef alındı. Biyodizel, tarımdan işlendiği için birinci ve ikinci nesil biyoyakıtlardan kaynaklanmaktadır [4].

İkinci nesil biyodizeller yenilebilir olmayan ham maddelerden üretilir, yenilebilir olmayan ham maddelere örnek olarak Neem yağı, Jatropha yağı, Nagchampa yağı, Karanja yağı, Calophyllum inophyllum yağı, Kaçuk tohumu yağı, Mahua indica yağı verilebilir. Birinci nesil hammaddelerin dezavantajları, araştırmacıları yenilebilir olmayan hammaddeler üzerinde çalışmaya çeker. Çevre dostu, daha düşük üretim maliyeti, gıda eşitsizliğini ortadan kaldıran, tarım için daha az arazi gereksinimi, ikinci nesil biyodizelin başlıca faydalarıdır. Bu yağlar, ikinci nesil biyodizel kullanmanın ana faydalarını içerir, sadece gıda bitkilerini aktarmaya gerek yoktur ve sadece tarım arazisine ihtiyaç duymaz. İkinci nesil yakıtların dezavantajları, Jatropha yağı, Jojoba yağı ve Karanja yağı gibi yenilebilir olmayan ana bitkilerde verimin düştüğü bitki verimidir. Bu hammaddeler önemsiz topraklarda ekim yapılabilir. Bu nedenle tarım arazilerinde yenilebilir olmayan ürünler yetiştirmek zorunda kalıyor; toplum ekonomisini ve gıda üretimini doğrudan etkiler. Yenilebilir olmayan yağın sosyoekonomik sorunlarının üstesinden gelmek için araştırmacılar, ekonomik olarak uygulanabilir ve daha büyük ölçüde kolayca erişilebilir olan yeni alternatif çözümlere dikkat ediyor. İlave alkol miktarının gerekli olması da ikinci nesil biyodizel için dezavantajdır [10].

### 1.3. Üçüncü nesil biyodizel

Mikroalglerden ve atık yağlardan üretilen biyodizel üçüncü nesil biyodizel olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü nesil biyodizelin başlıca faydaları, daha az sera etkisi, daha yüksek büyüme hızı ve üretkenlik, tarım arazisi için daha az mücadele, daha yüksek yağ yüzdesi ve gıda arzı üzerinde daha az etkidir. Başlıca dezavantajları, büyük miktarda yatırım gerektirmesi, güneş ışığına ihtiyaç duyması, daha büyük ölçekte üretim sorunu ve petrol çıkarmanın zorluğudur. Şu anda alg biyokütlesinden biyodizel üretimi, biyodizel üretim hızını ve ayrıca ekstraksiyon sürecini geliştirmek için araştırma aşamasındadır. Üçüncü nesil biyodizelin ana kaynakları balık yağı, hayvansal yağ, mikro algler, atık yemeklik yağları verilebilir. Tüm bu uygulanabilir üçüncü nesil biyodizel kaynakları, önceki nesil hammaddelerin karşılaştığı, gıda zincirini, mevcudiyeti, çevresel parametrelerle esnekliği, ekonomik fizibiliteyi etkileyen sorunları yener. Zor koşullarda bazı alg türleri hayatta kalma kabiliyetine ve yüksek lipid içeriğine sahiptir, bu nedenle mikroalgler üçüncü nesil biyodizel için gelecekteki olası bir kaynak olabilir. Atık yağlar durumunda, kullanılmış yemeklik yağ, atık balık yağı, atık hayvansal donyağı da üçüncü nesil biyodizel kaynaklarıdır. Ayrıca atık işleme tesisi yükünü ve su kirliliğini azaltır. Şu anda domuz eti, sığır eti, keçi ve kümes hayvanları gibi hayvansal yağlar biyodizel üretimi için olası ve güvenilir bir kaynak olarak yükseliyor [10].

Bitkisel yağlar dizel motorlarında kullanılamayacak kadar pahalıdır. Daha çok acil ihtiyaç duyulan durumlarda, petrolün bulunmadığı ya da

yeterli olmadığı zamanlarda kullanılmaktadır. Bu durumda atık yağların kullanılması maliyet bakımından daha avantajlı olacaktır. Diğer yandan, atık yağlar ciddi çevre problemlerine neden olmaktadır. Lokantalar, hazır yemek sanayi, restoranlar, oteller, aş evleri, balık kızartma yerleri ve hastanelerin mutfaklarından çıkan bitkisel yağların lavaboya dökülmesi ile, dren sistemine sıvanır, kanalizasyon borusu içindeki atıkların yapışmasına ve zamanla borunun daralmasına neden olur. Kanalizasyona dökülen atık yağlar mıknaş gibi diğer atıkları tutarlar. Kanalizasyon sistemi zamanla kullanılmaz hale gelir. Bu yüzden atık yağların biyodizel üretiminde kullanılması maliyeti düşürmekle kalmaz, bunun yanında çevreye olan olumsuz etkisini de azaltmış olur [11].

Hayvan atıklarından biyogaz üretimi, atıkların çevreye olan olumsuz etkilerinin azaltılmasının yanı sıra enerji üretiminde de kaynak olarak kullanılabilmesi ve proses sonucu yan ürün olan fermente gübrenin tarımda kullanılarak tarımsal verimliliğin artışına katkıda bulunabilmesi açısından önem arz etmektedir [12]. Ancak, hayvansal yağlar çevre sıcaklığında katı ve çok viskoz olmalarından dolayı dizel motorlarında kullanılmadan önce yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Hayvansal yağların viskoziteleri transesterifikasyon, emülsiyon ve proliz gibi yöntemler kullanılarak düşürülebilmekte ve dizel motorlarında kullanılmaları uygun bir hale getirilmektedir. Bu yöntemler arasında en çok transesterifikasyon reaksiyonu tercih edilmektedir [13].

Mikrobiyal biyokütle yapısına katılan yağlar önemli biyoyakıt hammaddesi olarak kabul edilmektedir. Yağların temel yapısı yağ asitleri ve gliserolden oluşmaktadır. Biyokütlesinde %20'den fazla miktarda yağ içeren mikroorganizmalar yağ üreten mikroorganizmalardır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda biyodizel üretimi için hammadde olarak mikrobiyal yağların kullanılması önerilmektedir [14].

AR-GE çalışmalarının sonuçlarına göre deniz yosunu olarak bilinen algler de iyi bir biyodizel hammaddesidir. Algler suda fotosentez yapabilen ve boyları 60 cm'yi bulan deniz bitkileri olup üç tarafı denizlerle çevrili ülkemiz için değerlendirilmesi gereken biyodizel hammaddeleridir. Ayrıca algler CO ile beslendiklerinden iklim değişikliğinin ana nedeni olarak bilinen CO emisyonlarının bertaraf edilmesi için de bir fırsat yaratılmış olacaktır. Sanayi tesislerinden kaynaklanan CO emisyonlarının alg havuzlarında toplanmasıyla, alglerin beslenmesi sağlanacak, aynı zamanda iklim değişikliğinin ana nedenlerinden biri bertaraf edilmiş olacaktır [15].

Alternatif enerji kaynaklarının hammadde sağlayıcısı olarak görülen alglerin yetiştirilmesi için gerekli olan iklim şartları ve besin kaynağı olarak kullanılan başta CO<sub>2</sub> olmak üzere besin elemanları ülkemizde bol miktarda mevcuttur. Bu açıdan ülkemizin ekonomik alg üretimine uygun

olduğu görülmektedir. Biyoyakıtlar, tarımda yeni bir bakışın adı olmakla kalmayıp, enerjiye tarımdan hammadde alan (enerji tarımı), esas itibarıyla Türk tarımında yeni bir atılımın gerçekleştirildiği ve entegre yatırımlara giden bir felsefeyi temsil etmelidir. Alg- biyoyakıt üretimi için birinci olarak alg biyokütlesinin işlenmesi iken, ikincisi, oksijenli fotosentetik mikroorganizmalardan biyoyakıt üretmek için alglerin metabolik mühendisliği ile ilgilidir [16].

#### **1.4.Dördüncü nesil biyodizel**

Dördüncü nesil biyodizelerde fotobiyolojik güneş yakıtları ve elektro yakıtlar ele alınmaktadır. Güneş biyoyakıtları, güneş enerjisinin hammadde kullanılarak biyodizele dönüştürülmesiyle üretilir, bu dönüştürme yöntemi yeni bir araştırma alanıdır. Hammaddeler yaygın olarak bulunur, tükenmez ve ucuzdur. Sentetik biyoloji, böyle bir dönüşüm için olanak sağlayan bir teknolojidir. Sürdürülebilir kalkınma için, güneş enerjisinin verimli ve doğrudan yakıtla dönüştürülmesi için sentetik canlı firmalar ve şık mikroorganizmalar yapan doğaya yeni çözümler bulunmalıdır. Benzer şekilde, fotovoltaiik veya inorganik su ayırıcı katalizörlerin metabolik olarak tasarlanmış mikrobiyal yakıt geliştirme ile bir karışımı, verimli geliştirme ve sıvı yakıt depolama için yükselen bir metodolojidir [10].

### **2.BİYODİZELİN ÖZELLİKLERİ**

Farklı hammaddelerden üretilen biyodizellerin temel özellikleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmaktadır [17].

#### **2.1. Asit Sayısı (AN)**

Yakıt örneğinde bulunan serbest yağ asitlerinin miktarı, asit sayısını (AN) tanımlar. Yüksek asit sayısı motorun yakıt dağıtım kanalında korozyon sorunu oluşturur ve bu yüksek asit değeri serbest yağ asidi içeriğinin yüksek olmasından kaynaklanır.

#### **2.2. Kaynama noktası (BP)**

Normal BP, elementin toplam uçuculuğunun bir ölçümü olarak da davranabilir. Herhangi bir maddenin daha yüksek bir BP'ye sahip olması, o elementin daha düşük uçuculuğunun göstergesidir ve düşük bir BP, o elementin daha yüksek uçuculuğu anlamına gelir. BP, elementin molekülleri arasında bulunan bağ tipine bağlıdır. ASTM-D7398 standardı yardımıyla BP aralığını bulmak için gaz kromatografisi kullanılır. ASTM-D7398 standartlarına göre BP noktası aralığı 100–615°C'dir.

#### **2.3. Kalori değeri (CV)**

Yakıtın ısıtma değeri veya kalorifik değeri (CV), birim yakıt miktarı yandığında açığa çıkan enerji miktarını gösterir. İçten yanmalı bir motor için, daha yüksek bir CV'ye sahip yakıt avantajlıdır. Dizel yakıtı, biyodi-

zel yakıtına kıyasla daha yüksek bir CV'ye sahiptir. Biyodizel yakıtı yüksek oksijen içeriğine sahiptir ve bu nedenle petrol dizeline kıyasla daha az (yaklaşık %10) enerji miktarına sahiptir.

#### 2.4. Setan sayısı (CN)

Yüksek setan sayısı (CN) değeri, yakıtın yanma odasına verildikten sonra hızla kendi kendine tutuşma kapasitesini gösterir. Düşük CN değeri, motor egzozundan daha yüksek emisyonları, eksik yanma nedeniyle daha fazla birikintiyi ve vuruntudaki artışı gösterir. Biyodizel için CN, doyumluk derecesi ve yağ asitlerinin zincir uzunluğu ile artar. Biyodizel, daha fazla oksijen içerdiğinden daha yüksek CN'ye sahiptir ve bu nedenle daha iyi yanma verimliliğine sahiptir.

#### 2.5. Bulut noktası (CP)

Yakıtın birincil maddesinde bulunan mumun kristalleşmeye başladığı ve bulutlu bir görünüm kazandığı minimum uygun sıcaklıktır. Düşük sıcaklıktaki yakıt üzerindeki kontrolü sabitlemek için genellikle CP kullanılır. Biyodizel üretimi için farklı hammaddeler kullanılmaktadır ve farklı hammaddeler farklı yağ asidi bileşimlerine sahiptir, bu nedenle üretilen biyodizelin CP'si hammaddedeki değişikliklerle değişir. CP'yi (biyodizel için) belirlemeye yönelik standart yöntem,  $-3^{\circ}\text{C}$  ila  $12^{\circ}\text{C}$  sınırı dahilinde ASTM D2500'de belirtilmiştir.

#### 2.6. Yoğunluk

Yakıtın tam olarak yanması için enjeksiyon sistemleri tarafından verilen yaklaşık yakıt miktarını bulmak için kullanılan önemli yakıt özelliklerinden biridir. Yüksek yoğunluklu yakıt, düşük yoğunluklu yakıtla karşılaştırıldığında daha fazla kütle içerir. Bu nedenle yanma odasındaki enerji miktarı ve hava yakıt oranı (A/F) yakıtın yoğunluğundan etkilenir. Biyodizel yakıt yoğunluğu, örneğin metil ester profili, hammadde tipi ve biyodizel üretim süreci gibi çok sayıda elementten etkilenir. Enjektör memesi yakıt yoğunluğunun tasarlanması çok önemli bir rol oynar çünkü motorun çalışmasını ve yakıt atomizasyonunu doğrudan etkiler, bu da nihai olarak motorun termal verimini etkiler. Biyodizel yakıtın yoğunluğu, geniş uygulamalar için kullanımını sınırlar.

#### 2.7. Parlama noktası (FP)

Bazı yangın kaynaklarıyla temas ettiğinde yakıt buharlarının alev aldığı en düşük sıcaklıktır. Biyodizel yakıtların parlama noktası (FP)  $150^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindedir ve geleneksel dizel yaklaşık  $55-65^{\circ}\text{C}$ 'ye sahiptir. Biyodizel yakıtları, petrodizel ile karşılaştırıldığında taşıma ve depolamada üstün güvenlik özelliklerine sahiptir. Metil ester düz bitkisel yağlar, düşük uçuculuğu nedeniyle petrodizelden daha yüksek FP'ye sahiptir.

## 2.8. İyot sayısı (IN)

100 g yakıt miktarında FAME moleküllerinin çift bağları tarafından emilen iyot miktarının bir göstergesidir. Yakıtın hava ile temas ettiğinde doymamışlık derecesini ve oksidasyon eğilimini değerlendirmek için kullanılır.

Yüksek konsantrasyonlarda doymamış yağ asidi zincirlerine ve dolayısıyla yüksek iyot sayılarına sahip biyodizel, oksidatif bozunmaya karşı daha hassastır. Yüksek sıcaklıklara, ışığa, havaya ve neme maruz kalma ve bazı kirleticilerin varlığı biyodizel bozunmasını artırır. Yüksek sıcaklıklarda oldukça doymamış bileşikler polimerizasyona uğrayarak zatk oluşumuna ve enjeksiyon memesinde ve yanma silindirinde yağlamanın bozulmasına neden olabileceğinden, biyodizelin doymamışlık derecesine dikkat etmek önemlidir [18].

## 2.9. Kinematik viskozite

Yakıtın akış kapasitesini tanımlamak için viskozite önemli bir parametredir. Viskozite, yakıt spreyinin atomizasyonunda önemli bir rol oynar. Biyodizel yakıtı daha yüksek moleküler kütle ve kimyasal yapıya sahiptir, bu nedenle biyodizel yakıtının viskozitesi geleneksel fosil yakıtlara göre daha fazladır. Daha yüksek bir viskozite değeri, kir birikmesine neden olan ve termal verimi azaltan yakıtın yetersiz atomizasyonuna neden olur. Daha düşük viskozite değeri, yakıtın yanma odasına kolay bir şekilde iletilmesini sağlayan daha küçük bir damlacık boyutu üretir.

## 2.10. Kayganlık

Çeşitli hammaddelerden elde edilen biyodizel yakıtları çok iyi kayganlık özelliğine sahiptir. Ultra düşük kükürtlü dizelin (ULSD) yağlayıcılığını harmanlayarak artırmak için de kullanılabilir. Daha az karışım yüzdesi (yaklaşık %1-2) genellikle ULSD'ye yeterli kayganlık sağlar. Biyodizel (B100) iyi bir kayganlığa sahiptir,

## 2.11. Oksidasyon Kararlılığı

Biyodizelin hava ile reaksiyon seviyesini ve oksidasyon seviyesini ölçmek için, oksidasyon stabilitesi olarak bilinen önemli bir parametre kullanılır. Ketencik bitkisinden üretilen biyodizelin oksidasyon kararlılığı, %35 tri-doymamış FAME'lerin varlığından dolayı düşüktür. Hindistan cevizi yağından üretilen biyodizel, yaklaşık %2 çoklu doymamış FAME'ye sahiptir, bu nedenle iyi oksidasyon kararlılığına sahiptir. Alg türleri de biyodizel üretimi için hammadde olarak kullanılır, ancak bu türler, biyodizelin oksidasyon stabilitesini doğrudan etkileyen önemli miktarda çoklu doymamış elementlere sahiptir. Ayçiçeği, mısır, soya ve aspirden üretilen biyodizel, yaklaşık %50 çoklu doymamış FAME'ye sahiptir, bu onların daha az oksidatif stabilitesine neden olur.

## 2.12. Akma noktası (PP)

Akma noktası (PP), bir sıvı yakıtın akış özelliklerini kaybettiği en düşük sıcaklıktır. PP, soğuk akış prosesi için kritik bir özelliktir. Yakıt PP değerinin biraz üzerinde proses için uygundur. Dizel yakıt genellikle biyodizel yakıtlardan daha düşük PP ve CP'ye sahiptir.

## 3. BİYODİZEL ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Biyodizel üretimi için en uygun olan piroliz, mikro emülsiyon, seyreltme ve transesterifikasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

### 3.1.Piroliz

Piroliz, hava veya oksijen yokluğunda termal enerjinin uygulanmasının veya bir katalizör varlığında ısı uygulanmasının neden olduğu, bağların bölünmesine ve çeşitli küçük moleküllerin oluşumuna neden olan kimyasal bir değişimi ifade eder. Piroliz, 400–600°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Proses, piroliz hızına bağlı olarak gazlar, biyo-yağ ve kömür üretir [19].

Piroliz, biyodizel üretimi için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, malzemenin termal ayrışması, havanın yokluğunda veya inert atmosferde yüksek sıcaklıkta gerçekleşir. Bu süreç, malzemenin kimyasal bileşimindeki değişimden etkilenir. Yağ, ısıtma sırasında hammadde olarak kullanıldığında kırılr ve sıvı kısmının özellikleri mazot gibidir. Piroliz işleminden elde edilen yakıtın özellikleri dizel yakıtına benzer kalorifik değere sahiptir; akma noktası, viskozite ve parlama noktası dizelden daha düşüktür. Piroliz işlemi ile üretilen biyodizelin setan sayısı motorine göre daha düşüktür. Bu işlemle üretilen biyodizel yeterli miktarda su ve kükürt içerir, ancak yeterli miktarda kalıntı karbon ve kül içeriğine sahiptir. Yüksek kurulum maliyeti bu işlemin en büyük dezavantajıdır [10].

### 3.2.Mikro-emülsifikasyon

Bitkisel ham yağın doğrudan yakıt olarak kullanılmamasını sağlayan fiziksel özelliklerinden biri de viskozitesidir. Mikro emülsiyon oluşumu, bitkisel yağ viskozite problemini çözmek için potansiyel çözümlerden biridir. Mikro emülsiyon, biyodizelde viskozitede azalma, setan sayısında artış ve iyi sprey karakterleri sağlar [19].

### 3.3 Seyreltme

Bitkisel yağların doğrudan kullanımının hem doğrudan hem de dolaylı dizel motorlar için genellikle tatmin edici olmadığı ve pratik olmadığı düşünülmüştür. Yüksek viskozite, asit bileşimi, serbest yağ asidi içeriğinin yanı sıra depolama ve yanma sırasında oksidasyon ve polimerizasyon nedeniyle sakız oluşumu, karbon birikintileri ve yağlama yağı kalınlaşması bariz problemlerdir. Bu gibi durumlarda bitkisel yağların mazot, solvent

veya etanol gibi maddelerle seyreltilmesinde fayda vardır. Seyreltme, bitkisel yağların viskozitesini ve yoğunluğunu azaltır. Dizel yakıtta %4 etanol eklenmesi, frenin özgül yakıt tüketimini azaltırken, fren termal verimini, fren torkunu ve fren gücünü artırır. Ayrıca, etanolün kaynama noktası dizel yakıttan daha düşük olduğu için, yanmamış bir harman spreyi yoluyla yanma sürecinin geliştirilmesine yardımcı olabileceğini savunulmuştur [19].

### 3.4. Transesterifikasyon

Transesterifikasyon, kimyasal olarak petrol dizeline benzeyen sıvı ve katı yağ hammadde türlerinden biyodizel üretmek için ana uygun yöntemdir. Bu yöntemle sıvı ve katı yağlar (trigliseritler), viskozitesi dizel yakıt seviyelerine yakın olacak şekilde alkil esterlerine dönüştürülür. Dolayısıyla bu ürün, petrol bazlı dizel yakıtına benzer özelliklere sahip bir yakıt olup, mevcut petrol dizel motorlarında herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılmasını sağlar [19].

Transesterifikasyon prosesi ile üretilen biyodizel motorin ile kıyaslanabilir özelliklere sahiptir ve bu proses ekonomik açıdan ticari üretime elverişlidir. Transesterifikasyon işleminde, trigliserid alkol ile reaksiyona girdiğinde gliserol ve esterler oluşur [10].

## 4. BİYODİZEL EMİSYONLARI

Biyodizelde oksijenin varlığı daha eksiksiz yanma proseslerine yol açarak daha düşük CO emisyonları, partiküller ve görünür duman sağlar. Ancak, daha yüksek sıcaklıklar nedeniyle NO<sub>x</sub> emisyonlarında bir artış ölçülmüştür. Kükürt emisyonları esas olarak saf biyodizel ile ortadan kaldırılır. Biyodizelden kaynaklanan kükürt oksitler ve sülfatların egzoz emisyonları, dizele kıyasla esasen ortadan kaldırılmıştır [20].

Toplam hidrokarbonların (yerel duman ve ozon oluşumuna katkıda bulunan bir faktör) egzoz emisyonları, biyodizel için dizel yakıttan ortalama %67 daha düşüktür. Dizel motorlarda yakıt olarak biyodizel kullanıldığında;

1. Karbondioksit salınımını azaltır,
2. Karbon monoksit emisyonlarını azaltır,
3. Ozon oluşturan hidrokarbon emisyonlarını azaltır,
4. Tehlikeli partikül madde (pm) emisyonlarını azaltır,
5. Asit yağmurlarına neden olan kükürt dioksit emisyonlarını azaltır ve
6. Normal petrol dizeline kıyasla nitrojen oksit emisyonlarını artırır.



## 5. BİYODİZELİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

### Avantajları

Biyodizel, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak sürekli bir tedarik zincirini destekleyebilir. Biyodizel, dizele göre daha az sera gazı salan çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Biyodizel üretim yöntemi, petro-dizel üretiminden daha basittir. Biyodizel, etkili motor performansı ve daha az bakımla daha uzun motor ömrü vaat eden yüksek bir setan sayısına sahiptir. Biyodizel ile ek yağlayıcıya gerek yoktur. Biyodizel yakıt, sürdürülebilir kırsal kalkınmayı teşvik etmek için büyük bir değere sahiptir. Ulaştırma enerji güvenliği sorunları biyodizel yakıtı kullanılarak çözülebilir. Biyodizel yakıtı yerel olarak üretilebilir, bu da onu uygun maliyetli bir enerji kaynağı yapar. Kükürt içeriği, parlama noktası, aromatik içerik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi biyodizel özellikleri, petro-dizelinkinden üstündür. Biyodizel, minimum yanma toksisitesi ile yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilir bir moleküler yapıya sahiptir. Biyodizelin işlenmesi ve taşınması daha güvenlidir ve daha az toksiktir. Biyodizel, daha fazla kullanılabilir yanma verimliliği ile daha taşınabilir, yenilenebilir bir yakıttır. Biyodizel aşındırıcı değildir ve düşük basınç ve sıcaklık koşullarında üretilir. Biyodizel ne yanıcı ne de zehirlidir ve egzoz emisyonlarını, görünür dumanı, zararlı dumanları ve kokuları azaltır. Biyodizel, kazanlarda veya içten yanmalı motorlarda dizel için potansiyel bir alternatiftir ve büyük değişiklikler gerektirmez. Biyodizel oksijen içeriği daha yüksektir, bu da yakıtın tamamen yanmasına yardımcı olur ve emisyonları azaltır. Biyodizel malzemelerinin kırsal alanlarda ve çok sayıda ülkede kullanılmayan arazilerde yetiştirilmesi, ulusal ekonomik potansiyeli önemli ölçüde artırabilir ve ham petrol ithalatına bağımlılığı azaltabilir [21].

Biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki avantajları, motorda yanma verimini artırır ve CO parçacık ve SO<sub>x</sub> emisyonlarında azalmalar sağlar. Biyodizel-dizel karışımı ile karşılaştırıldığında biyodizelin kullanılması ile CO, PM, HF, SO<sub>x</sub> ve CH<sub>4</sub> emisyonlarında azalma, NO<sub>x</sub>, HCl ve HC emisyonlarında ise artma görülmektedir. Biyodizel, değişiklik yapılmamış herhangi bir dizel motorunda dizel yakıtı ile değişik oranlarda karıştırılarak kullanıldığı gibi, % 100 oranında da kullanılabilir. Biyodizelin, petrol kökenli dizel yakıtına göre daha yüksek tutuşma derecesine (>110 °C) sahiptir. Bu yanmaya doğrudan etki etmemesine rağmen, biyodizelin depolanması ve taşınabilirliği açısından daha güvenli hale getirmektedir [22].

### Dezavantajları

Biyodizel, dizel yakıtı umut verici bir alternatif olarak görülse de, dizel yakıtla rekabet edebilmek için şu sınırlamaların aşılması gerekir: Biyodizel, dizel yakıttan daha yüksek NO<sub>x</sub> emisyonları üretir. Biyodizel, dizel

yakıtta karşı ayarlandığında daha yüksek akma ve bulutlanma noktalarına sahiptir, bu da soğuk havalarda yakıtın donmasına neden olur. Biyodizelin viskozitesi kimyasal yapısından dolayı motorine göre daha yüksektir. Yenilebilir olmayan yağların büyük moleküler kütlesi, dizel motor enjektör sisteminde pompalama, atomizasyon ve yanma sorunlarına neden olabilir. Biyodizel, dizel yakıtta göre %5 daha az motor gücü ve devir sağlar. Biyodizel, uzun süre depolandığında parçalanabilir. Uzun süreli işlemlerde yüksek viskozite, enjektör birikintilerinin birikmesine, halka yapışmasına ve filtrelerin, hatların ve enjektörlerin tıkanmasına neden olur [21].

Biyodizelin başlıca dezavantajları, daha yüksek viskozite, daha düşük enerji içeriği, daha yüksek bulutlanma noktası ve akma noktası, daha yüksek nitrojen oksit (NOx) emisyonları, daha düşük motor hızı ve gücü, enjektör koklaşması, motor uyumluluğu, yüksek fiyat ve daha yüksek motor aşınmasıdır [23].

Biyodizel soğuk hava şartlarından dizele göre daha çabuk etkilenir. Soğuk havalarda dizelden daha yüksek bulutlanma noktasına sahiptir. Biyodizelin ısı değeri dizele göre düşüktür. Bu durum motordaki yanma sonucunda bir miktar güç düşmesine yol açar. Havayla temas eden biyodizel, özellikle yüksek sıcaklıklarda hızla oksitlenmeye başlar. Bununla birlikte biyodizelin, parlama noktası daha yüksektir. Bu yanmaya doğrudan etki etmemesine rağmen, biyodizelin depolanması ve taşınabilirliği açısından daha güvenli hale getirmektedir. Biyodizel, depolama, taşıma ve motor malzemelerinde doğal ve butil kauçukları parçalamaktadır ve uzun süre depolanamaz. Saf (B100) kullanım durumunda ise motor malzemelerinde özellikle yakıt donanımındaki hortum, bağlantı elemanı ve contaların uygun malzeme ile değiştirilmesi gerekir [22].

## 6. BİYODİZEL EKONOMİSİ

Biyodizelin ekonomik avantajları şu şekilde sıralanabilir: sera gazı emisyonlarını azaltır, bir ülkenin ham petrol ithalatına olan bağımlılığını azaltır ve yerli ürünler için yeni işgücü ve pazar olanakları sağlayarak tarımı destekler, yağlama özelliğini artırır ve araç üreticileri tarafından yaygın olarak kabul edilmektedir [23].

## 7. SEMBOLLER

ASTM American Society For Testing And Materials

EN European standard

FAME Fatty acid methyl ester

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Aksoy, L., Alternatif enerji kaynağı olarak biyodizel ve üretim prosesleri, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED), 2010, Cilt 2, No: 3, 45-52.
- [2] Thangaraj, B., Solomon, R. P., Muniyandi, B., Ranganathan, Lin, L., Catalysis in biodiesel production-a review, Clean Energy, 2019, Vol. 3, No. 1, 2–23.
- [3] Devarajan, Y., Munuswamy, D., Nagappan, M., Subbiah, G., Experimental assessment of performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine fuelled with Punnai biodiesel/ butanol fuel blends, Petroleum Science, 2019, 16:1471–1478.
- [4] Hamzah, N. H., Khairuddin, N., Siddique, B., M. and Hassan, M.A., Potential of *Jatropha curcas* L. as Biodiesel Feedstock in Malaysia: A Concise Review, Processes, 2020, 8, 786.
- [5] Hajjari, M., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72, 445–464.
- [6] Kumar, N., Sant, V., Chauhan, R., Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins: A review Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 21, May 2013, Pages 633-658.
- [7] Oğuz, H., Öğüt, H., Gökdoğan, O., Iğdır Üni. Fen Bilimleri Enst. Der. / Iğdır Univ. J. Inst. Sci. & Tech. 2(2, Ek:A): 77-84, 2012.
- [8] Acaroğlu, M., Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayınları, İstanbul, 2003.
- [9] Takase, M., Zhao, T., Zhang, M., Chen, Y., Liu, H., Yang, L., Wu, X., An expatiated review of neem, jatropha, rubber and karanja as multipurpose non-edible biodiesel resources and comparison of their fuel, engine and emission properties, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 43, 2015, 495-520.
- [10] Singh, D., Sharma, D., Soni, S.L., Sharma, S., Sharma, P. K., Jhalani, A., A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel, Fuel, 2020, Volume 262, 15, 116553.
- [11] Alptekin, E., Çanakçı, M., Biyodizel ve Türkiye'deki Durumu, 2006, Mühendis Makina Cilt: 47 Sayı: 561.
- [12] Kurnuç, A., Badem, S. A., Erzincan ilindeki hayvansal atıkların biyogaz potansiyelinin araştırılması, APJES 6-1, 2018, 25-35.
- [13] Altun Ş, Öner C, Hayvansal yağların dizel motor yakıtı olarak değerlendirilmesi, Electronic Journal of Vehicle Technologies (EJVT), 20120, Vol:2, No:3, (1-11).
- [14] Gül, Ü. D. & Bayazıt, Yenilenebilir enerji üretiminde mikrobiyal biyoproseslerin kullanımı, European Journal of Science and Technology, 2021.

- [15] Ar, F., Biyoyakıtlar Tehdit mi - Fırsat mı ?, Mühendis Makine, 2008, Cilt : 49 Sayı: 581.
- [16] S. Göçer, Z. Zaimoğlu, Üçüncü ve dördüncü nesil biyoyakıtların araştırılması Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi, 2018.
- [17] Singh, Digambar, Sharma, D., Soni, S.L., Sharma, S., Kumari, D., Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review, Fuel, 2019, Volume 253, Pages 60-71.
- [18] Tubino, M., Aricetti, J.A., A green potentiometric method for the determination of the iodine number of biodiesel, Fuel, 2013, 103, 1158–1163 1159.
- [19-29] Gebremariam, S. N., Marchetti, J. M., Biodiesel production technologies: review, AIMS Energy, 2017, 5(3): 425-457.
- [20] K. Dincer, Lower Emissions from Biodiesel Combustion, Energy Sources, Part A, 2008, 30:963–968.
- [21] Shaah, M. A., Allafı, F., Hossain, M. S., Alyaa, A., Ismail, N., Kadir, M. O., Ahmad, A., Candlenut oil: review on oil properties and future liquid bio-fuel prospects, 2021, 17057-17079, First Published..
- [22] Fidan, M.S., Alkan E.; Bitkisel hammaddelerden elde edilen biyodizelin alternatif enerji kaynağı olarak kullanılması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2014, Cilt:4, Sayı:2.
- [23] Demirbaş, A., Importance of biodiesel as transportation fuel, Energy Policy, 2007, 35, 4661–4670.



## BÖLÜM 2

### ARDUINO GELİŞTİRME ORTAMINDA KESME İŞLEMLERİ

*Ali KAVURUR<sup>1</sup>*

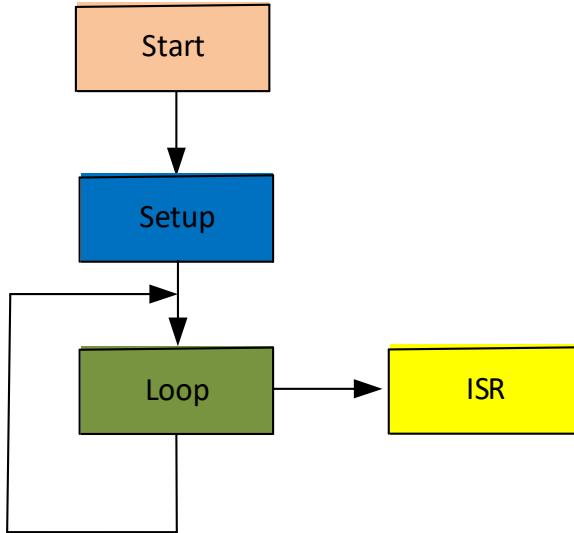
---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi., Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kontrol ve Otomasyon Bölümü, Burdur, Türkiye  
kavurur@mehmetakif.edu.tr

## 1. Giriş

Mikrodenetleyicilerde çalışmakta olan programın çalışmasını durdurup, belirli şartların oluşması halinde önceden tanımlanmış bir fonksiyonu icra edip tekrar ana programda kaldığı yerden devam etmesi işlemini kesme (interrupt) olarak tanımlayabiliriz. Tanımlanmış olan bu fonksiyona da kesme fonksiyonu denilmektedir. Arduino kesme (interrupt) özelliği, bir işlevi yürütürken, işlemci döngüsünün çalışmasını kesmek ve bir kesme kaynağından gelen bir sinyal tarafından tetiklenen bir işlevi hızla yürütmek için kullanılır. Programın çalışması esnasında çoğunlukla giriş çıkış uçları ve birtakım registerlar sürekli taranmaktadır. Bu tarama işlemi sadece program tarafından yapıldığında, programın önemli bir kısmını işgal eder. Programla yapılması gereken birtakım işleri kesme birimleri gerçekleştirirse, mikrodenetleyicinin iş yükü azalacağından aynı anda birden fazla işlem yapabilir. Bu da bize daha verimli ve esnek programların yazılmasına imkan verir [1].

Kesme (interrupt), belirli görevlerin programdan bağımsız şekilde arka planda kontrol edilip, şartlar sağlandığında programın durdurulup belirlenen kesme fonksiyonun çalışmasını sağlamaya yöneliktir. Kesme fonksiyonunun tamamlanmasının ardından, program kaldığı yerden çalışmaya devam eder. Kesme olayının gerçekleştiği alt programlar ISR (Interrupt Service Routine/ Kesme Servis Altprogramı) olarak adlandırılır (Şekil 1).



Şekil 1. Arduino Programında Kesme Oluşması

Bu bölümde ARDUINO UNO kartına ait kesmeler işlenecektir. ARDUINO UNO kartı Atmel firmasının ATMEGA 328P denetleyicisini

kullanılmaktadır. Bu denetleyicide toplam 26 Adet Kesme kaynağı bulunmaktadır. Tablo 1’de bu denetleyiciye ait kesme kaynaklarının tablosu verilmiştir [2].

**Tablo 1.** *Atmega328P denetleyicisi Kesme Kaynakları, Vektör Fonksiyonları*

Vektör	ISR (Interrupt Service Routin)	Vektör İsmi	Adres
1	Reset		0x0000
2	External Interrupt Request 0 (pin D2)	(INT0_vect)	0x0002
3	External Interrupt Request 1 (pin D3)	(INT1_vect)	0x0004
4	Pin Change Interrupt Request 0 (pins D8 to D13)	(PCINT0_vect)	0x0006
5	Pin Change Interrupt Request 1 (pins A0 to A5)	(PCINT1_vect)	0x0008
6	Pin Change Interrupt Request 2 (pins D0 to D7)	(PCINT2_vect)	0x000A
7	Watchdog Time-out Interrupt	(WDT_vect)	0x000C
8	Timer/Counter2 Compare Match A	(TIMER2_COMPA_vect)	0x000E
9	Timer/Counter2 Compare Match B	(TIMER2_COMPB_vect)	0x0010
10	Timer/Counter2 Overflow	(TIMER2_OVF_vect)	0x0012
11	Timer/Counter1 Capture Event	(TIMER1_CAPT_vect)	0x0014
12	Timer/Counter1 Compare Match A	(TIMER1_COMPA_vect)	0x0016
13	Timer/Counter1 Compare Match B	(TIMER1_COMPB_vect)	0x0018
14	Timer/Counter1 Overflow	(TIMER1_OVF_vect)	0x001A
15	Timer/Counter0 Compare Match A	(TIMER0_COMPA_vect)	0x001C
16	Timer/Counter0 Compare Match B	(TIMER0_COMPB_vect)	0x001E
17	Timer/Counter0 Overflow	(TIMER0_OVF_vect)	0x0020
18	SPI Serial Transfer Complete	(SPI_STC_vect)	0x0022
19	USART Rx Complete	(USART_RX_vect)	0x0024
20	USART, Data Register Empty	(USART_UDRE_vect)	0x0026
21	USART, Tx Complete	(USART_TX_vect)	0x0028
22	ADC Conversion Complete	(ADC_vect)	0x002A
23	EEPROM Ready	(EE_READY_vect)	0x002C
24	Analog Comparator	(ANALOG_COMP_vect)	0x002E
25	2-wire Serial Interface (I2C)	(TWI_vect)	0x0030
26	Store Program Memory Ready	(SPM_READY_vect)	0x0032

## 2. Arduino Uno Kartına Ait Kesmeler

### 2.1. Dış Kesmeler (External Interrupts)

Dış kesmeler Arduino UNO’nun 2 ve 3 nolu pinlerinde meydana gelen donanım kesmeleridir. Bu kesme sayesinde bu pinlere bağlanan bir giriş elemanını kontrol etmeye gerek kalmadan, pinlerdeki değişimle beraber kesme oluşur. Dış (Harici-External) kesmelere sahip pinler Arduino türüne göre değişiklik gösterir. Aşağıdaki Tablo 2’de bu pinler gösterilmiştir.





**Tablo 5.** ISC00,01 ve ISC10,11 bitleri

ISC11	ISC10		ISC01	ISC00	
0	0	Düşük seviye	0	0	Düşük seviye
0	1	Lojik değişim	0	1	Lojik değişim
1	0	Düşen Kenar	1	0	Düşen Kenar
1	1	Yükselen Kenar	1	1	Yükselen Kenar

### ***EIMSK – External Interrupt Mask Register***

Hangi dış kesmesinde hangi pinin kullanılacağı bu register vasıtasıyla belirlenir. INT0 biti etkinleştirildiğinde ARDUINO UNO'daki PD2 Pini, INT1 biti etkinleştirildiğinde ARDUINO UNO'daki PD3 Pini kesme olarak tanımlanmış olur.

**Tablo 6.** EIMSK Register bitleri

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	-	-	-	-	-	-	INT1	INT0
Read/write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tablo 7.** INT0,1 Register bitleri

INT1		INT0	
0	Kesme pasif	0	Kesme pasif
1	Kesme aktif	1	Kesme aktif

### ***EIFR – External Interrupt Flag Register***

INT1'de bir kesme olayı gerçekleştiğinde, INTF1 biti set olur. Aynı şekilde INT0'de bir kesme olayı gerçekleştiğinde, INTF0 biti set olur. Dolayısıyla kesmenin oluşup oluşmadığı bu bite bakılarak anlaşılabilir. Kesme rutini yürütüldüğünde ilgili bit sıfırlanmış olur.

**Tablo 8.** EIFR Register bitleri

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	-	-	-	-	-	-	INTF1	INTF0
Read/write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

#### **2.1.2. Dış kesme için örnek program**

Aşağıda verilen örnek programda, INT0 girişine buton ve 12,13 nolu Pin'lere Led bağlanmıştır. Butona basılınca dış kesme oluşmaktadır. Program çalışırken 300 milisaniye aralıklarla 13 nolu Pine bağlı olan ledi yakıp söndürmektedir. Programdaki  $SREG|=(1 \ll SREG\_I);$  komutuyla SREG

Registerinin I bitinin set edilmesi sağlanarak tüm kesmelerin aktif edilmesi sağlanmıştır. Bu komut yerine interrupts() komutu da kullanılabilir. Kesmeleri pasif yapmak için noInterrupts() komutu kullanılabilir.

$EIMSK|= (1 \ll INT0)$  ; komutuyla INT0 kesmesi aktif edilmiştir.  $EICRA|= (1 \ll ISC00) | (1 \ll ISC01)$ ; komutuyla yükselen kenar tetikleme seçilmiştir. Her kesme oluştuğunda, ISR(INT0\_vect) altprogramı çağrılarak ledin durumunun terslenmesi sağlanmıştır. Bu program Register değerlerine erişerek kesme oluşturmuştur. Fakat ARDUINO IDE ortamında aynı program fonksiyonlar kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Bunun için; attachInterrupt (); komutu kullanılabilir. Bu fonksiyonun dijitalPin, kesme fonksiyonu, kesme modu şeklinde 3 adet parametresi bulunmaktadır.

*dijitalPin*; kesme için kullandığımız pindir. PD2 için 0, PD3 için 1 yazılmalıdır.

*Kesme fonksiyonu*; kesme oluştuğunda gideceği program ismidir.

*Kesme modu* ise; LOW, CHANGE, RISING ve FALLING olabilir. LOW olması, pindeki gerilimin 0 olduğunda kesmeye gitmesi, CHANGE olması pindeki gerilimin 0'dan 5V'a veya 5Volt'dan 0'a düştüğünde kesmeye gitmesi demektir. RISING pindeki gerilimin 0'dan 5 Volta yükselmesi ve FALLING'de 5Volt'tan 0'a düşmesi halinde gerçekleşecek kesmeyi tanımlamaktadır.

### ***Program;***

```
byte led1=13,
byte led2=12;
void setup() {
pinMode(led1, OUTPUT);
pinMode(led2, OUTPUT);
SREG|= (1 << SREG_I);
EIMSK|= (1 << INT0);
EICRA|= (1 << ISC00) | (1 << ISC01);
}
void loop() {
digitalWrite(led1, !digitalRead(led1));
delay(300); }
ISR(INT0_vect) {
digitalWrite(led2, !digitalRead(led2));}
```





### 2.2.2. Pin değişim kesmesi için örnek program

Yazılan programda PORTD'nin ilk biti PCMSK2 |= 0b00000001; komutuyla giriş kesmesi olarak ayarlanmıştır. PCICR |= 0b00000100; komutuyla ISR(PCINT2\_vect) seçilerek kesme etkinleştirilmiştir. SREG|=(1<<SREG\_I); komutuyla da tüm kesmeler etkinleştirilmiştir. Program çalıştığında 13 nolu pine bağlı led 5 kez yanıp sönmektedir. Eğer kesme oluşursa (butona basılırsa) aynı led konum değiştirmektedir. Burada bu kesme türü toggle olduğu için butona basışta ve butonu bırakırken kesme oluştuğu dikkat edilmelidir.

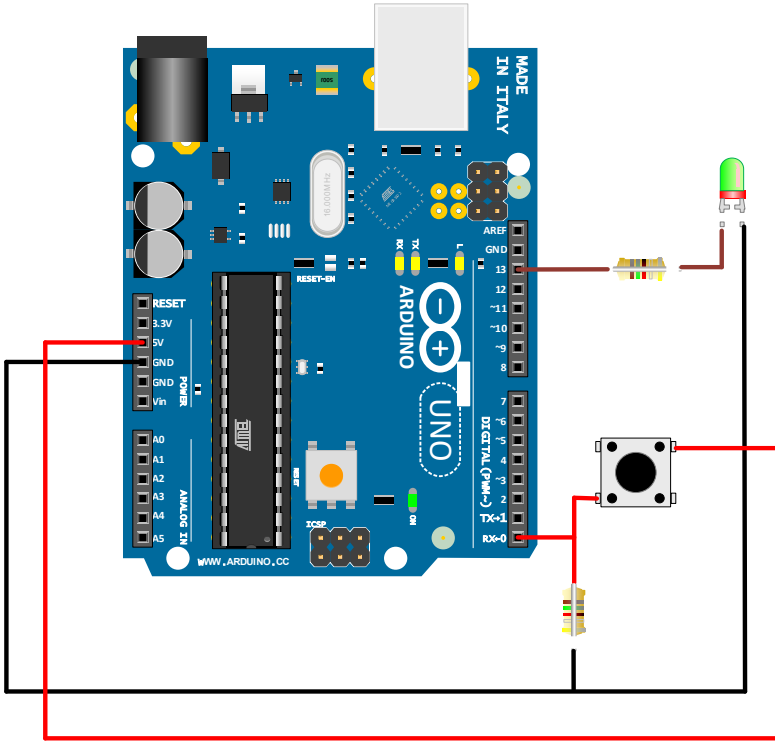
#### *Örnek program;*

```
#define led 13

void setup() {
  pinMode(led,OUTPUT);
  PCICR |= 0b00000100;
  PCMSK2 |= 0b00000001;
  SREG|=(1<<SREG_I);
}

void loop() {
  for(int i=0;i<5;i++){
    digitalWrite(led,HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(led,LOW);
    delay(500);
  }
  while(1);
}

ISR(PCINT2_vect)
{
  digitalWrite(led, !digitalRead(led));
}
```



Şekil 3. Pin Değişim Kesmesi Örneği için ARDUINO bağlantıları

### 2.3. ARDUINO Geliştirme Ortamında Zamanlayıcı/Sayıcı Kesmeleri

Timer Arduino denetleyicisinde gömülü olarak bulunan bir yapıdır. Zamanlayıcı veya sayıcı olarak kullanılabilir. Her Arduino'nun denetleyicisine bağlı olarak farklı timer tipleri bulunmaktadır. Arduino UNO'da 3 farklı tipte TIMER bulunmaktadır. Bunlar, TIMER0, TIMER1 ve TIMER 2 dir. TIMER 0 ve 2, 8 bitlik iken, TIMER1 16 bitlik bir zamanlayıcı ve sayıcıdır. 8 bit  $2^8=256$  anlamına gelir ve 0'dan 255'e kadar toplam 256 sayım yapabilir. 16 bit  $2^{16}$  anlamında ve 0'dan 65535'e kadar sayım yapabileceği anlamına gelir. Tablo 14'de ARDUINO UNO'da kullanılan TIMER'lar ve özellikleri verilmiştir.

**Tablo 14.** *Arduino’da kullanılan TIMER’lar ve fonksiyonları*

Timer Adı	Kaç Bit olduğu	Kesmeleri	Arduino Kullanımı
TIMER 0	8 bit (0-255)	Compare Match Overflow	delay(), millis(); micros() analogWrite() pin 5,6
TIMER 1	16 bit (0-65535)	Compare Match Overflow Input Capture	Servo fonksiyonları analogWrite() pin 9,10
TIMER 2	8 bit (0-255)	Compare Match Overflow	tone(), noTone() analogWrite() pin 3,11

Tablodan da görüldüğü üzere TIMER0 ve TIMER2 Compare Match ve Overflow Kesmelerini desteklerken, buna ek olarak TIMER1 Input Capture Kesmesini de desteklemektedir. Arduino millis, micros ve delay fonksiyonları için TIMER0 kullanırken, servo fonksiyonu için TIMER1’i, tone ve noTone fonksiyonu içinde TIMER2’yi kullanmaktadır[5].

### 2.3.1. Timer ‘da kullanılan registerlar

TIMER0 için TCCR0A, TCCR0B (Timer/Counter Control), TCNT0 (Timer/Counter, OCR0A, OCR0B (Output Compare), ICR0A (Input Capture), TIMSK (Timer/Counter Interrupt Mask) ve TIFR0 (Timer/Counter interrupt Flag) registerları kullanılmaktadır. Aynı tür registerlar TIMER1 ve 2 içinde bulunmaktadır.

#### ***TCCR0A– Timer/Counter Control Register A (Zamanlayıcı/Sayıcı Kontrol Registeri A)***

**Tablo 15.** *TCCR0A Registeri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	COM0A1	COM0A0	COM0B1	COM0B0	-	-	WGM01	WGM00
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

#### ***TCCR0B– Timer/Counter Control Register B(Zamanlayıcı/Sayıcı Kontrol Registeri B)***

**Tablo 16.** *TCCR0B Registeri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	FOC0A	FOC0B	-	-	WGM02	CS02	CS01	CS00
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

TCCR0 A-B Registeri, WGM0 2:0 bitlerini kullanarak dalga biçimi modunu oluşturmak için, COM0A1:0 ve COM0B1:0 bitleri zamanlayıcı

çalışmasını belirlemek için, CS2:0 bitleri de Clock seçiminde kullanılır. COM0A1:0: Çıkış A Modu bitleri karşılaştırma pin çıkışı olan OC0A bitini kontrol eder. COM0B1:0 Compare Match Output B modu bitleri ise; Çıkış karşılaştırma pini olan OC0B bitinin davranışlarını kontrol eder. Tablo 17’de COM0A1 ve COM0A0 bitlerinin durumu verilmiştir.

**Tablo 17.** *Karşılaştırma Çıkış Modu, PWM yok modunda COM0A1:COM0A0 fonksiyonları*

COM0A1	COM0A0	Açıklama
0	0	Normal Port İşlevinde, OC0A bağlı değil
0	1	Karşılaştırma moda set/clear (toggle) OC0A
1	0	Karşılaştırma modda OC0A clear
1	1	Karşılaştırma modda OC0A set

WGM01:0 bitlerinin Hızlı PWM Moduna kurulduğunda, COM0A1:0 bitlerinin fonksiyonları ise Tablo 18’de verilmiştir.

**Tablo 18.** *Karşılaştırma Çıkış Modu, Hızlı PWM Modu, COM0A1:COM0A0 fonksiyonları*

COM0A1	COM0A0	Açıklama
0	0	Normal Port İşlevinde, OC0A bağlı değil
0	1	WGM02=0 Normal Port işlevinde, OC0A bağlı değil WGM02=1 Karşılaştırma modda set/clear (toggle) OC0A
1	0	Karşılaştırma modda OC0A clear, TOP’da OC0A set
1	1	Karşılaştırma modda OC0A set, TOP’da OC0A clear

WGM02:0 bitlerinin faz düzeltme PWM Moduna kurulduğunda, COM0A1:0 bitlerinin fonksiyonları ise Tablo 19’de verilmiştir.

**Tablo 19.** *Karşılaştırma Çıkış Modu, faz düzeltme PWM Modu, COM0A1:COM0A0 fonksiyonları*

COM0A1	COM0A0	Açıklama
0	0	Normal Port İşlevinde, OC0A bağlı değil
0	1	WGM02=0 Normal Port işlevinde, OC0A bağlı değil WGM02=1 Karşılaştırma modda set/clear (toggle) OC0A
1	0	Karşılaştırma modda OC0A clear, TOP’da OC0A set
1	1	Karşılaştırma modda OC0A set, TOP’da OC0A clear

Timerler dalga şekli üretim şekline göre normal, CTC, PWM ve hızlı PWM gibi modlarda çalıştırılabilir. Bu modların çalıştırılması Tablo 20’de verilmiştir.

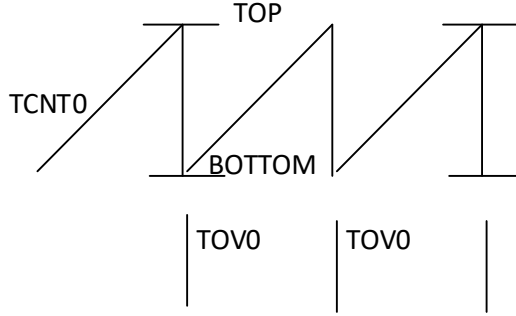


**Tablo 20.** Dalga Şekli Üretim Modu bit seçimi, MAX=0xFF BOTTOM=0x00

Mode	WGM02	WGM01	WGM00	Timer/Counter İşletim Modu	TOP	Güncelleme OCRx	TOV bayrağı Set
0	0	0	0	Normal	0xFF	İmmediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Faz Düzeltme	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCR0A	İmmediate	MAX
3	0	1	1	Hızlı PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	RESERVED	-	-	-
5	1	0	1	PWM, Faz Düzeltme	OCR0A	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	RESERVED	-	-	-
7	1	1	1	Hızlı PWM	OCR0A	BOTTOM	TOP

### 2.3.2. Normal mod

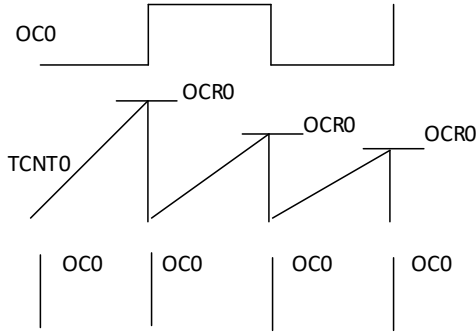
Normal modda WGM02:0 bitlerinin değeri 0' dır. Bu modda sayma yönü her zaman ileri yönlüdür. Normal olarak sayıcının 8 bit değerinin en üst değeri olan TOP=0xFF değerine ulaştığında 0x00 değerinden tekrar başlar ve saymaya devam ederek TOV0 taşma bayrağını set eder. Aynı saat pulsü ile de TCNT değeri 0 yapar. Kesme işlemi olduğunda ise TOV0 bayrağı yeniden 0 olur. Normal mod çalışması Şekil 4'te gösterilmiştir [2] [6].



Şekil 4. Normal Mod Çalışması

### 2.3.3. Zamanlayıcı silme ve karşılaştırma modu (CTC)

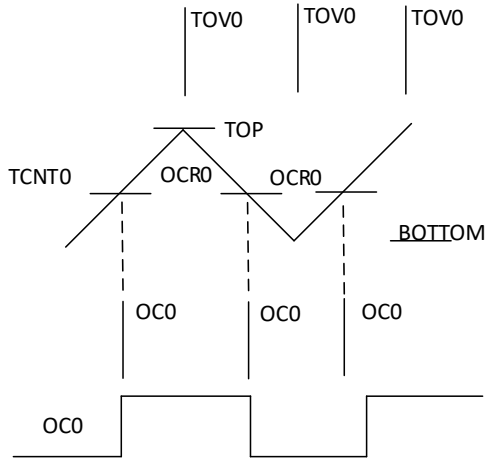
CTC modunda, TCNT0 sayacı Çıkış Karşılaştırma Kaydı OCR0A veya OCR0B'de ayarlanan değere ulaştığında TCNT0 zamanlayıcısı sıfırlanır. Bu olay meydana geldiğinde Çıkış Karşılaştırma Bayrağı OCF0A veya OCR0B ayarlanır. CTC modu, periyodik bir sinyal veya tek bir darbe gibi hassas bir sinyal oluşturmak için kullanılır. Zamanlayıcı silmeli karşılaştırma veya kısaca CTC modunda WGM2:0 =B010' dir. Yani WGM02 ve WGM00 bitleri 0 iken WGM01 biti 1 dir. CTC mod çalışması Şekil 5'te gösterilmiştir [7] .



Şekil 5. CTC Mod Çalışması

### 2.3.4. Faz düzeltme PWM modu

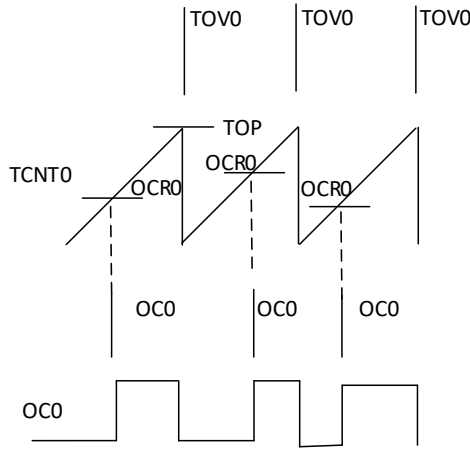
WGM02:0=B001 veya B101 iken PWM sinyali üretilir. Bu modun temel çalışması çift yönlü eğimde işlem yapmasıdır. Bunun anlamı sayıcının BOTTOM'dan TOP'a veya TOP'dan BOTTOM'a doğru sürekli saymasıdır. Bu durum aşağıdaki Şekil 6'da gösterilmiştir. Terslenmemiş çıkış modunda yukarı sayımda TCNT0 ve OCR0x arasında bir eşleşme olduğunda OCR0x 0 olur. Bunun tersine aşağıya sayımda TCNT0 ve OCR0x arasında bir eşleşme olduğunda OCR0x=1 olur. Faz düzeltme PWM modunda sayıcı TOP seviyeye kadar artarak sayar. TOP değere ulaştığında sayma yönü değişir. TCNT değeri bir zamanlayıcı periyodunda TOP değere eşit olacaktır. TCNT0 eğrisi üzerindeki yatay ve küçük çizgiler OCR0x ve TCNT0 arasındaki karşılaştırma eşleşmesini belirtir [2] [6].



Şekil 6. Faz Düzeltme PWM Modu

### 2.3.5. Hızlı PWM modu

Hızlı PWM modu, istenen frekans ve görev döngüsüne sahip hassas bir PWM sinyali üretmek için kullanılır. Maksimum frekansı Faz Düzeltmeli PWM modunun iki katı olduğundan Hızlı PWM olarak adlandırılır. TCNT0 kayıt değeri, OCR0A veya OCR0B kaydında ayarlanan değere ulaştığında, PWM çıkışında bir değişikliğe neden olur. Zamanlayıcı/Sayaç 0 Taşma Bayrağının ayarlandığı anda TOP değerine kadar saymaya devam eder. Hızlı PWM/Pals genlik modülasyonu Modu WGM02:0=B011 veya B111 düzenleme sonucunda yüksek frekanslı PWM sinyal üreten moddur. Tek yönü yükselme özelliği ile diğer PWM modundan farklıdır. Bu modda sayıcı BOTTOM'dan TOP'a kadar sayar. TOP değerinden sonra BOTTOM değerine iner ve yeniden başlar. WGM2:0=3 olduğunda TOP değeri 0xFF olarak WGM2:0=7 olduğunda TOP değeri OCR0A ile tanımlanır. Terslemeyen Modda OCR0x çıkışı sıfırlanır. Terslenmiş modda ise çıkış set edilir. Faz düzeltme PWM modunun çalışması Şekil 7'te gösterilmiştir [2] [6].



Şekil 7. Faz Düzeltme PWM Modu

TIMER/Counter Registeri 8 bit sayıcısına okuma ve yazma işlemi için doğrudan izin verir. TCNT0 registerine yazmak, bir sonraki zamanlama saatinde karşılaştırmayı kaldırır. Sayıcı normal sayma görevini yaptığı sırada sayıcıda değişiklik yapılırsa, TCNT0 ile OCR0x arasında karşılaştırma ile ilgili olarak istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir.

OCR0 registeri, 8 bitlik bir veriyi tutar ve sürekli TCNT0 sayıcısının verisi ile karşılaştırma yapar. Bu karşılaşmadan doğan sonuca göre OC0A pininden bir sinyal çıkışı alınabilir veya bir karşılaştırma kesmesi üretilebilir. TCNT0 register bitleri Tablo 21'de ve OCR0 register bitleri Tablo 22'de verilmiştir.

**Tablo 21.** *TCNT0 Register bitleri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	TCNT0[7:0]							
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tablo 22.** *OCR0 Register bitleri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	OCR0A[7:0]							
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	OCR0B[7:0]							
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

TIMSK0 registerinde, OCIE0B biti 1 yapılırsa ve SREG Registerinin I biti de set edilmişse TIMER0 karşılaştırma B kesmesi yetkilendirilmiş olur. Eğer bir karşılaştırma eşleşmesi yapılmışsa buna karşılık gelen TIFR Registerindeki OCF0B kesme biti aktif olur.

TOIE0 biti 1 yapılırsa ve SREG Registerinin de I biti set yapılırsa TIMER taşma kesmesi yetkilendirilmiş olur. Eğer Timer içerisinde bir taşma olursa buna karşılık gelen TIFR Registerindeki TOV0 kesme biti set olur.

OCIE0A biti 1 yapılırsa ve SREG Registerinin'de I biti set yapılmışsa TIMER karşılaştırma A kesmesi yetkilendirilmiş olur. Eğer TIMER'da bir karşılaştırma eşleşmesi yapılmışsa buna karşılık gelen OCF0A kesme biti set olur. TIMSK0 Register bitleri Tablo 23'te verilmiştir.

**Tablo 23.** *TIMSK0 Register bitleri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	TOIE1	OCIE1A	OCIE1B	-	ICIE1	OCIE0B	TOIE0	OCIE0A
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

TIFR0 registerinde OCF0B ile bir karşılaştırma eşleşmesi oluşursa bu bit set durumuna geçer. Çıkış karşılaştırma bayrağı olan bu bit uygun kesme vektörünün çalışmasından sonra donanımsal olarak silinir ve 0 olur. İstenirse yazılım olarak da bu bite 0 yazılarak da silinebilir. Özetle SREG registerinin genel kesme biti ve TIMER registeri taşma kesme biti TOIE0=1 ise TIMER kesmesi oluşacaktır. TIFR0 register bitleri Tablo 24'te verilmiştir.

OCF0A ile TIMER register arasında bir karşılaştırma eşleşmesi oluşursa bu bit set durumuna geçer. Çıkış karşılaştırma bayrağı olan bu bit

uygun kesme vektörünün çalışmasından sonra donanımsal olarak silinir ve 0 olur. İstenirse yazılım olarak bu bite 0 yazılarak da silinebilir. Özetle SREG Registerinin genel kesme biti I=1, TIMER karşılaştırma yetki biti OCIE0B=1 ise TIMER karşılaştırma kesmesi oluşacaktır.

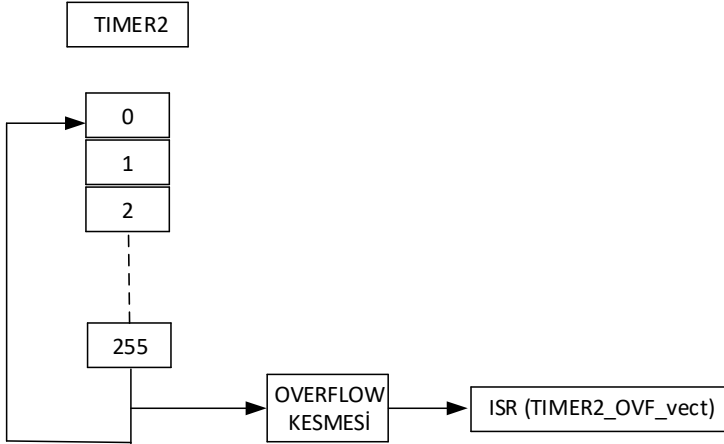
TOV0 Bir taşma olduğunda bu bit set 1 olur. Bu bit set olup buna karşılık gelen uygun kesme oluştuğundan sonra donanım tarafından silinir ve 0 olur. İstenirse yazılım olarak 0 yazılarak da silinebilir. Özetle SREG registerinin genel kesme biti IO1 TIMER kesme yetki biti TOIE0=1 ise TIMER taşma kesmesi oluşacaktır.

**Tablo 24.** *TIFR0 Register bitleri*

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	-	-	--	-	-	OCF0B	OCF0A	TOV0
Read/write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W
Başlangıç	0	0	0	0	0	0	0	0

### 2.3.6. Timer Overflow kesmesi için örnek program

Bu çalışma durumu, zamanlayıcının maksimum sınır değerine ulaştığı durumdur. Zamanlayıcıda her taşma oluştuğunda bir kesme tetiklenir, yani maksimum değerinden 0'a geri döner; bu, 8 bitlik bir zamanlayıcı olması durumunda 255'e her ulaştığında olacaktır. Kesme oluştuğunda ISR(TIMER0\_OVF\_vect) kesme altprogramı (Şekil 8) çağrılmaktadır.



**Şekil 8.** *Overflow Kesmesi Çalışması*

7	6	5	4	3	2	1	0
FOC0A	FOC0B	-	-	WGM02	CS12	CS11	CS10

CS12	CS11	CS10	Prescalar	
0	0	0	Saat Kaynağı yok	
0	0	1	1	
0	1	0	8	
0	1	1	64	
1	0	0	256	
TCCR2B=0b00000101	1	0	1	1024
	1	1	0	TO Düşen Kenar
	1	1	1	TO Yükselen Kenar

Şekil 9. Overflow Kesmesi TCCR2B Registeri değerleri

7	6	5	4	3	2	1	0
-	-	-	-	-	OCIE2B	TOIE2A	TOIE2

TIMSK2=0b00000101
-------------------

OVERFLOW INTERRUPT ENABLE
---------------------------------

Şekil 10. Overflow Kesmesi TIMSK2 Registeri değerleri

Örnek program;

```
#define PIN 13
int i=0;
void setup()
{
  pinMode(PIN, OUTPUT);
  cli(); // tüm kesmeler devre dışı
  TCCR2A = 0; // tüm TCCR1A yazmacını sıfırlar
```

```

TCCR2B = 0; // tüm TCCR1B yazmacını sıfırlar
TCCR2B |= ((1 << CS12) | (1 << CS10)); // Prescaler 8 olarak ayarlandı.
TIMSK2 |= (1 << TOIE0); // Overflow kesmesi aktif.
sei(); //Tüm kesmeleri çalıştır.
}
void loop()
{ }
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
  i++;
  if(i==1000)
  {
    digitalWrite(PIN, !digitalRead(PIN));
    i=0;
  }
}
}

```

Programda TIMSK2 |= (1 << TOIE0); komutuyla overflow kesmesi aktif edilmiştir. TCCR2B |= ((1 << CS12) | (1 << CS10)); komutuyla prescaler değeri 8 olarak ayarlanmıştır. Burada zaman hesabı şu şekildedir:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{16 \text{ Mhz}} = \frac{1}{16 \times 10^6} = 62,5 \text{ ns}$$

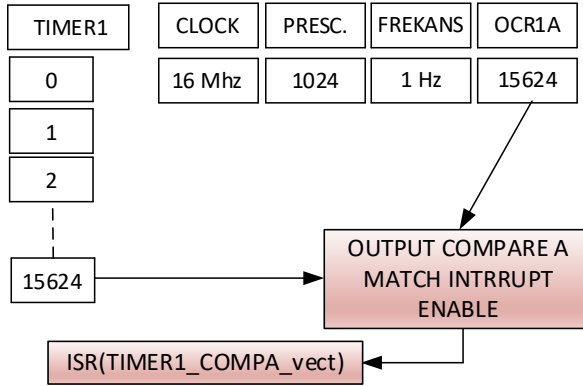
(Eğer 32 MHz'lik bir Clock sinyali kullanılsaydı bu değer 31,25 ns olacaktı.) Prescaler değeri 8 olarak yazıldığında;  $62,5 \times 8 = 500 \text{ ns}$ . Yani her 500 ns.de bir counter değeri artacaktır. Örnekte TIMER2 8 bit olduğu için;  $256 \times 500 = 3 \text{ milisaniye}$  olur. ISR(-TIMER2\_OVF\_vect) kesme altprogramında karşılaştırma i değeri 1000 olduğu için;  $3 \text{ milisaniye} \times 1000 = 3000 \text{ milisaniye} = 3 \text{ saniye}$ . Program her 3 saniyede bir led'in durumunu değiştirilmektedir.

### 2.3.7. Timer compare match (CTC) kesmesi örneği

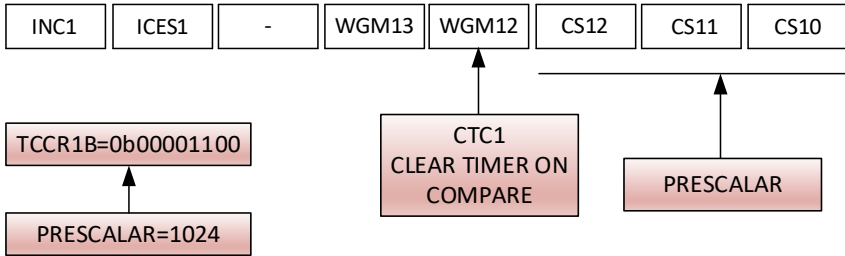
Programda, OCR1A registerinin değeri şu şekilde hesaplanmıştır.

$$\text{Compare Match Registeri değeri} = \frac{16 \text{ Mhz}}{\text{Prescalar} \times \text{istenen frekans}} - 1 = \frac{16\,000\,000}{1024 \times 1} - 1 = 15624$$

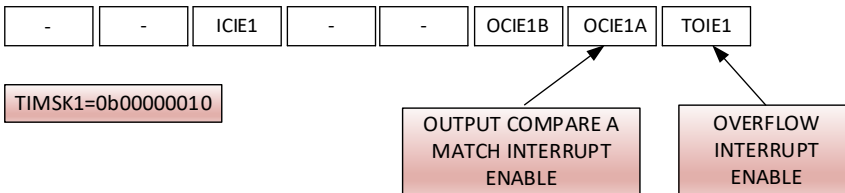
OCR1A registeri 15624 değerine ulaştığında karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Bu değer 1 sn karşılık geldiğinden her 1 saniyede bir kez ISR(TIMER1\_COMPA\_vect) kesme altprogramı çağrılacaktır ve led konumunu değiştirecektir.



Şekil 11. CTC Kesmesi Çalışması



Şekil 12. CTC Kesmesi TCCR1B Registeri değerleri



Şekil 13. CTC Kesmesi TCCR1B Registeri değerleri



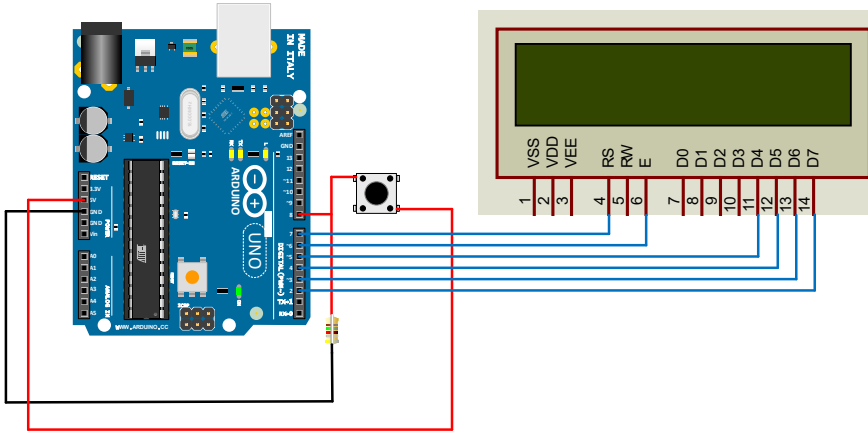
Örnek program;

```
#define led 13
void setup() {
  pinMode(led1 , OUTPUT);
  noInterrupts(); // Kesmeler pasif
  TCCR1A = 0;      //TIMER1 hazırlanıyor
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;
  OCR1A = 15624;   // Karşılaştırma değeri 15625
  TCCR1B |= 0b00001100; // CTC Mod ve Prescalar 256
  TIMSK1 |= 0b00000010; // Compare Mod aktif
  interrupts(); // Kesmeler pasif
}
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
  digitalWrite(led, !digitalRead(led));
}
void loop()
{ }
```

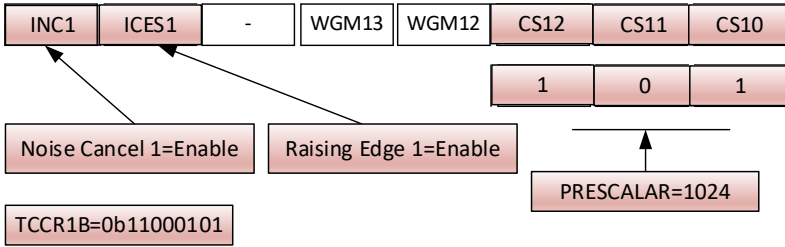
### 2.3.8. Input capture kesmesi örneği

Arduino UNO için Timer1’de uygulanabilen girdi yakalama kesmesidir. Bu durumda zamanlayıcı, arduino pinlerinden birinde harici bir olay her gerçekleştiğinde değerini farklı bir kayıta saklayabilir. Bir sinyalin periyodunun ölçümünde kullanılabilir. [8]

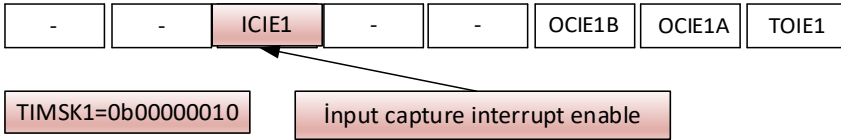
Programda her butona basıldığında ICR1 registerinin içeriğinin LCD display’de gösterilmesi sağlanmıştır. Dolayısıyla buton yerine sensör, sinyal kaynağı vs. bağlanıp iki sinyal arasında geçen süre ve periyot hesaplanabilir. Prescalar değeri 1024, Yükselen kenar ve noise cancel seçilmiştir.



Şekil 14. *Input Capture Kesmesi Örneği için ARDUINO bağlantıları*



Şekil 15. *TCCR1B Registeri değerleri*



Şekil 16. *TIMSK1 Registeri değerleri*

Örnek program;

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
int current_capture = 0;
void setup() {
  lcd.begin(16, 2); lcd.print("ALI KAVURUR");
  delay(200); lcd.clear();
```

```
noInterrupts();
TCCR1A = 0;          //TIMER1 hazırlanıyor
TCCR1B = 0;
TCCR1B |= 0b11000101; //Prescalar değeri 1024 , Yükselen kenar
ve , noise cancel seçildi
TIMSK1 |= 0b00100000; // input capture kesmesi aktif edildi
TCNT1 = 0x00;       //Timer1 Rregisteri hazırlandı
interrupts();
}
ISR(TIMER1_CAPT_vect)
{
    current_capture = ICR1;
}
void loop() {
    lcd.clear();
    lcd.print(current_capture);
}
```

## KAYNAKLAR

- [1] Çiçek, S. (2021), Mikrodenetleyici: CCS C İle PIC Programlama, Altaş Yayıncılık, ISBN-10: 9758834207, ISBN-13 : 978-9758834204
- [2] Barrett, S. F. (2013), Arduino Microcontroller Processing for Everyone!: Third Edition, Morgan & Claypool Publishers; 3rd edition (August 1, 2013), ISBN-10: 1627052534, ISBN-13: 978-1627052535
- [3] <https://dronebotworkshop.com/interrupts/> Erişim tarihi:07-05-2023
- [4] Atmega 328 Data Sheet, [https://ww1.microchip.com/downloads/en/Device-Doc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/Device-Doc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf) (son Erişim Tarihi: 30.03.2023)
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=2kr5A350H7E> Erişim tarihi:07-05-2023
- [6] Taşbaşı, A. (2008), Atmel AVR (Atiny 2313) Programlama, Altaş Yayıncılık, ISBN: 9789758834242
- [7] Naimi, S., Naimi, S., Mazidi, M.A. (2012), The AVR Microcontroller and Embedded Systems Using Assembly and C: Using Arduino Uno and Atmel Studio 1st Edition, Pearson India Education, ISBN 10: 8131791386 ISBN 13: 9788131791387
- [8] <https://akuzechie.blogspot.com/2020/11/input-capture-interrupt-in-arduino.html> Erişim tarihi:07-05-2023



## BÖLÜM 3

### MANYETİK REZONANS GÖRÜNTÜLERİNDEN BEYİN TÜMÖRÜNÜN TESPİTİNDE DERİN EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI HİPERPARAMETRELERİNİN ETKİSİ

*Ceren KAYA<sup>1</sup>, Rukiye UZUN ARSLAN<sup>2</sup>,  
Irem SENYER YAPICI<sup>3</sup>*

---

1 Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: [ceren.kaya@beun.edu.tr](mailto:ceren.kaya@beun.edu.tr), ORCID ID: 0000-0002-1970-2833

2 Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: [rukiyeuzun67@gmail.com](mailto:rukiyeuzun67@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2082-8695

3 Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: [senyerirem@gmail.com](mailto:senyerirem@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0655-340X

Beyin, birbirine bağı çok sayıda nöron aracılığıyla insanların tüm yaşamsal fonksiyonlarını (düşünme, hareket etme, konuşma, duylar, yazma, öğrenme, bilgi toplama gibi) kontrol eden merkezi sinir sisteminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır (Dandıl, 2015; Dearmond, Fusco ve Dewey, 1989). Günümüzde en yaygın görülen hastalıklardan olan kanserin henüz tedavisi tam olarak bulunamadığından insan sağlığını tehdit etmeye devam etmektedir (Kaya, Senyer Yapıcı ve Uzun Arslan 2022). İnsan vücudunu hemen hemen her yaş ve cinsiyette etkileyen beyin ve diğer sinir sistemi kanserleri, dünya genelinde ölüm nedenleri açısından 10. sırada yer almaktadır (“Brain Tumor:Statistics”, 2023).

Beyin tümörü, beyinde veya merkezi omurga kanalında meydana gelen ani ve kontrolsüz anormal hücre büyümesi olarak tanımlanmaktadır. Beyin tümörleri birincil (temel) ve ikincil (metastatik) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Ancak tıp alanında ise uzman doktorlar beyin tümörlerin iyi huylu (benign) ve kötü huylu (malign) şeklinde sınıflandırmaktadırlar (“American Brain Tumor Association”, 2023). İyi huylu beyin tümörleri yavaş büyüme eğilimine ve belirgin sınırlara sahip olup, nadiren vücudun diğer bölgelerine yayılırlar. Buna karşılık genellikle hızlı büyüme eğilimi gösteren kötü huylu beyin tümörleri ise vücuttaki uzak ve farklı organlara metastaz (sıçrama) yapabilmekte, bundan dolayı da istilacı ve yaşamı tehdit edici nitelik sergilerler.

Beyin tümörleri çoğunlukla konumlarına, içerdiği hücrelerin yapısına ve tümörün tipine (iyi veya kötü huylu) göre farklı isimlerle anılmaktadırlar. Şimdiye kadar 120’den fazla farklı beyin tümör tipi tespit edilmiş ve tanımlanmıştır. Bunların arasında en yaygın görülenleri meninjiyom (beyin zarı), gliom ve pitüiter (hipofiz bezi) tümörleridir (Khan ve diğerleri, 2022; Kaplan, 2020). Gliom, beyinde destekleyici dokuyu oluşturmakla görevli olan glial hücrelerinde görülen bir grup tümöre verilen genel bir tıbbi terimdir. Bu tümör çeşidi genellikle kötü huylu olup, beyin ve merkezi sinir sistemi tümörlerinin büyük bir kısmını kapsar. Meninjiyom, beyin veya omuriliği saran zarlarda meydana gelen, çoğunlukla iyi huylu ve yavaş yavaş büyüyen tümör çeşididir. Pitüiter tümörü ise beynin alt kısmında bulunan hipofiz bezindeki kontrolsüz hücre büyümesinden dolayı oluşur. Bu tip tümörler çoğunlukla iyi huylu olmakla birlikte, meninjiyom ve gliom tümörlerinden sonra en sık rastlanılan birincil beyin tümör çeşididir (Gab Allah, Sarhan ve Elshennawy, 2023; Kesav ve Jibukumar, 2022, “Brain Tumor Types”, 2023).

Kliniksel ortamda tüm beyin tümörleri arasında gliom, meninjiyom ve pitüiter tümörlerinin insidans oranları sırasıyla yaklaşık %45, %15 ve %15 olarak hesaplanmıştır (Swati ve diğerleri, 2019). Beyin tümör tedavisi ve uygulama şekli; tümörün tipi, çapı, oluşum yeri ve hastanın durumu gibi birçok faktöre bağı olarak değişmektedir (Ismael, Mohammed ve Hefny,

2020). Tümör tedavisinde cerrahi, kemoterapi ve radyoterapi en çok kullanılan tedavi yöntemleri arasında yer almaktadır (Öksüz, Urhan ve Güllü, 2022). Tümörün erken teşhisi hastanın tedaviye olumlu yönde cevap vermesine bağlı olarak belirlenen sağkalım oranının artırılmasında önemli rol oynamaktadır. Beyin tümörünün teşhisi ve analizi, tedavi sürecinin tanı aşamasında gerçekleşmektedir.

Uzman doktorlar ve radyologlar, olası herhangi bir tümörün özelliklerini bulmak ve analiz etmek için pozitron emisyon tomografisi (PET), bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) gibi çeşitli tıbbi görüntüleme tekniklerinden yararlanmaktadırlar (Öksüz ve diğerleri, 2022; Sahayam, Nenavath, Jayaraman ve Prakash, 2017). MRG; yumuşak dokuları göstermedeki keskinliği, zararlı X ışını içermemesi, invaziv olmaması ve ilaçsız olarak da çekilebilmesi gibi özellikleri nedeniyle günümüzde beyin tümörü tespitinde en yaygın kullanılan görüntüleme tekniği olmuştur (Ismael ve diğerleri 2020; Sahayam ve diğerleri, 2017; Kumar, Dabas ve Godara, 2017). Bununla birlikte, MR görüntülerinin analizi çok fazla uzmanlık deneyimi gerektiren, hataya açık ve daha da önemlisi zaman alıcı bir süreçtir. Bu nedenle beyin tümörü tespitinde uzman doktorlara ve radyologlara yardımcı olabilecek otomatik bilgisayar destekli tespit (BDT) sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle verimlilik artırılabilmekte, hatalar minimize edilmekte ve doğru bilgiye daha kısa zamanda erişilebilmektedir.

Literatürdeki beyin tümörü teşhisine yönelik geliştirilen BDT sistemleri incelendiğinde klasik makine öğrenmesi algoritmalarına ve derin öğrenme modellerine dayalı çok sayıda çalışmayla karşılaşmaktadır (Aslan, 2022; Polat, 2022; Vani, Sowmya ve Jayamma, 2017; Citak-Er, Firat, Kovanlıkaya, Ture ve Ozturk-Isik, 2018; Shahin, Aly, W. ve Aly, 2023; Aurna, Yousuf, Taher, Azad ve Moni, 2022; Gaikwad, Patel ve Shetty, 2021, Ucar ve Ozan, 2022). Klasik makine öğrenmesi algoritmalarının başarımı, özellik çıkarma ve sınıflandırma modellerinin sınıf içi varyasyonları absorbe etme yeteneğine bağlıdır. Buna karşın derin öğrenme algoritmaları mevcut veri kümelerinden ayırt edici özellikleri otomatik olarak öğrenmekte ve makine öğrenme algoritmalarına kıyasla daha yüksek performans sağlamaktadır (Ayadi, Elhamzi, Charfi ve Atri, 2021; Ge, Gu, Jakola, ve Yang, 2020; Hemanth ve diğerleri, 2018; Huang, Zhu, Ding ve Zhang, 2020; R. Jain, Jain, Aggarwal ve Hemanth, 2019; Kumar, Kakarla, Isunuri ve Singh, 2021; Sajjad ve diğerleri, 2019; Shao, Zhu ve Li, 2014; Sultan, Salem ve Al-Atabany, 2019). Bu bağlamda son zamanlarda MR görüntülerini kullanarak beyin tümörlerinin teşhisinde, derin öğrenme teknikleri klasik makine öğrenme algoritmalarının eksikliklerini giderdikleri ve daha iyi performans sergiledikleri için tercih edilmektedir (Anaraki, Ayati ve Kazemi, 2019; Mohsen, El-Dahshan, El-Horbaty ve Salem, 2018; Singh,

Sharma, Goel, Lamba ve Garg, 2021; Kumar ve Mankame, 2020; Deepak ve Ameer, 2019; Ismael ve diğerleri, 2020; Irmak, 2021; Ayadi ve diğerleri, 2021; Kesav ve Jibukumar, 2021; Deepak ve Ameer, 2021; Aurna ve diğerleri, 2022; Vankdothu, Hameed ve Fatima, 2022; Aamir ve diğerleri, 2022; Salama ve Shokry, 2022, Ucar ve Ozan, 2022). Örneğin; Anakari ve diğerleri (2019) MR görüntülerini kullanarak farklı gliom derecelerini invaziv olmayan bir şekilde sınıflandırmak için evrişimli sinir ağları (ESA) ve genetik algoritmaya (GA) dayalı bir model önermiş, %90,9'luk bir sınıflandırma başarımı elde etmişlerdir. Yapılan çalışmada önerilen modellerle beyin tümör çeşitlerinin (meninjiyom, gliom ve pitüiter tümörlerinin) de %94,2 doğrulukla tahmin edilebildiğini belirtmişlerdir. Mohsen ve diğerleri (2018) ayrık dalgacık dönüşümü ve derin öğrenme yöntemlerinden ESA'yı birleştirerek yeni bir beyin tümörü sınıflandırma yöntemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntemde temel bileşen analiziyle boyutu azaltılan özellikler ESA'nın eğitiminde kullanılmış ve %96,97'lik bir doğruluk oranına ulaşılmıştır. Singh ve diğerleri (2021) tümürlü ve tümörsüz beyin MR görüntülerinin ikili sınıflandırmasında önceden eğitilmiş bir VGG-16 ESA modeli kullanmışlardır. Kullanılan modelde test ve doğrulama veri setleri için sırasıyla %90 ve %86'lık başarımlar elde edilmiştir. Kumar ve Mankame (2020) beyin tümörlerinin ikili sınıflandırılması (tümürlü, tümörsüz) için optimize edilmiş bir derin öğrenme tekniği sunmuş ve iki farklı veri seti için sırasıyla %95,3 ve %96,3 sınıflandırma başarımına ulaşmışlardır. Deepak ve Ameer (2019), üç tip beyin tümörünün (meninjiyom, gliom ve pitüiter tümörleri) sınıflandırılması için derin transfer öğrenmesine dayalı önceden eğitilmiş GoogleNet modelinin kullanıldığı bir yaklaşım önermiş ve %98'lik bir ortalama sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. Ismael ve diğerleri (2021), üç sınıf beyin tümörünü sınıflandırmak için rezidüel ağ (ResNet) modelini kullanarak, %99'luk bir doğruluk oranına ulaşmışlardır. Irmak (2021) farklı tipte beyin tümörü içeren üç veri seti için üç farklı ESA modeli önermişlerdir. Üç veri seti için ayrı ayrı önerilen modellerden elde edilen doğruluk oranları sırasıyla %99,33, %92,66 ve %98,14'tür. Ayadi ve diğerleri (2021) beyin tümörlerinin çoklu sınıflandırması için yeni bir ESA modeli önermiş ve ortalama %94,74 doğruluk elde etmişlerdir. Deepak ve Ameer (2021), üç tip beyin tümörü için destek vektör makineleri ve ESA tabanlı bir sınıflandırma modeli sunmuş ve %95,82'lik başarıma ulaşmışlardır. Aurna ve diğerleri (2022) üç farklı tümör tipini ve normal beyin hücrelerini kategorize etmek için iki aşamalı bir derin ESA modeli önermişlerdir. Önerilen modellerle genel doğruluk oranının %4,31 artırılabilirliğini göstermişlerdir. Kesav ve Jibukumar (2021) mevcut derin öğrenme mimarilere kıyasla daha az karmaşıklığa sahip, verimli bir şekilde eğitilebilen ve test edilebilen iki kanallı bir ESA modeli önermişlerdir. Vankdothu ve diğerleri (2022) beyin tümörlerini tanımlamak ve sınıflandırmak için ESA ve yinelemeli yapay sinir ağı mimarisine sahip uzun kısa süreli



bellek (UKSB) katmanlarını birleştirerek, yeni bir derin öğrenme modeli geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada meninjiyom, gliom ve pitüiter tümörleri ile normal beyin hücresi MR görüntülerini içeren veri seti kullanarak yapılan sınıflandırmada %92'lik bir doğruluk oranına ulaşmışlardır. Amir ve diğerleri (2022) meninjiyom, gliom ve pitüiter dahil olmak üzere üç tip beyin tümörünün doğru ve basit bir şekilde sınıflandırmasında Efficient-Net-B0 derin öğrenme ağı mimarisiyle ortalama %95,98'lik bir başarımla elde etmişlerdir.

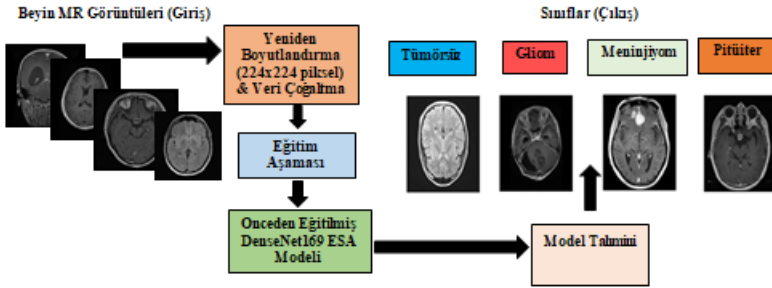
Bu çalışmada, üç patolojik beyin tümörü tipi (gliom, meninjiyom ve pitüiter tümörü) ve normal (tümörsüz) beyin hücresi MR görüntülerinin sınıflandırılmasında bilgisayar destekli otomatik bir tanı sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemde, beyin MR görüntülerinin sınıflandırılması derin transfer öğrenimli önceden eğitilmiş DenseNet169 ESA modeliyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada farklı boyutlardaki 7022 tane beyin MR görüntüsü içeren, kamuya açık erişilebilen “Brain Tumor MRI Dataset” isimli veri seti kullanılmıştır (Nickparvar, 2021). Literatüre katkı sağlamak amacıyla; veri setindeki MR görüntüleri 256x256 piksel olacak şekilde yeniden boyutlandırılmış, farklı küme boyutu (batch size) ve hiperparametre (kesme, yakınlaştırma ve parlaklık) değerleri değiştirilerek önerilen modelin sınıflandırma performansı kıyaslanmıştır. Makalede, Bölüm 2’de veri seti ve önerilen derin öğrenme modelinin detayları sunulmuş, Bölüm 3’te deneysel analizler ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bölüm 4’te ise sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmış ve makale sonlandırılmıştır.

## 2. Materyal ve metod

Çalışmada, MR görüntülerinden beyin tümörünü saptamak için DenseNet169 tabanlı derin evrişimli sinir ağı (ESA) modeli kullanılmıştır. Bu doğrultuda öncelikle veri setindeki görüntüler yeniden boyutlandırılmış ve ağı daha fazla örnek sunabilmek adına veri çoğaltma (data augmentation) işlemi uygulanarak veri seti genişletilmiştir. Literatürde veri çoğaltma tekniği olarak “görüntü döndürme, görüntü paylaşımı, görüntü ölçekleme ve görüntü yansıma” gibi teknikler kullanılmaktadır (Ali ve diğerleri, 2022). Bu çalışma kapsamında görüntü döndürme yöntemiyle çoğaltılan veriler eğitilmek üzere ağı girdi olarak verilmiştir. Girdi katmanına gelen çoğaltılmış verilerin öz niteliklerinin çıkarılması için ESA katmanında Doğrultulmuş Doğrusal Birim (ReLU) aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Sonrasında ağdaki bölünmeyi ve boyutu azaltmak için katmanlar arasında havuzlama işlemi uygulanmıştır. Böylece daha küçük boyutlu bir matris elde edilmiştir.

Bu işlem birbirini izleyen aşamalarda gerçekleştirildikten sonra tam bağlı katmana iletilmekte ve bu katmandan sonra sınıflandırmanın yapılacağı çıkış katmanında Softmax aktivasyon fonksiyonu ile 4 farklı sınıfa

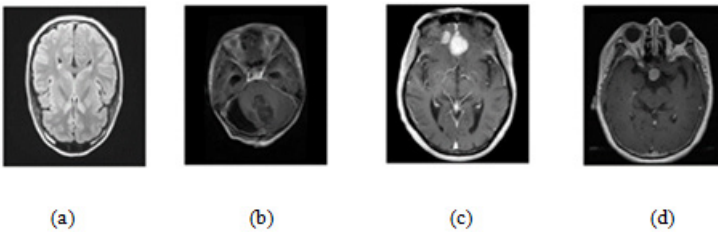
ait çıkışlar elde edilmektedir. Öğrenme algoritması olarak da optimum çözüme ulaşmada en iyi performansa sahip olduğu bilinen Adaptif Moment Tahmini (Adam) algoritması tercih edilmiştir (Uckuner ve Erol, 2021). Yanı sıra, önerilen modelin verilere bağımlılığını azaltmak için küme (batch) normalizasyonu yapılmıştır. Şekil 1’de MR görüntülerinden beyin tümörünün sınıflandırılması için önerilen derin ESA tabanlı modelin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. Derin ESA tabanlı modelle beyin tümörü tespitinin şematik gösterimi.

## 2.1. Veri seti

Çalışmada farklı boyutlardaki beyin MR görüntülerini içeren, “Brain Tumor MRI Dataset” isimli veri seti kullanılmıştır. Veri seti üç farklı veri setinin (FigShare, SARTAJ ve Br35H) bir kombinasyonu olup, açık kaynak erişimine sahip Kaggle veri platformundan alınmıştır (Nickparvar, 2021). Söz konusu veri seti içerisinde; gliom (810), meninjiyom (822), pitüiter (879) tümörleri ile normal (tümörsüz, 1000) olmak üzere dört farklı sınıfa ait beyin MR görüntüleri (3511) seçilmiştir. Şekil 2’de sınıfların her birine ait örnek görüntüler verilmiştir (Nickparvar, 2021).



Şekil 2. Dört farklı sınıfa ait beyin MR görüntüleri (a) Normal (b) Gliom, (c) Meninjiyom ve (d) Pitüiter (Nickparvar, 2021).

MR görüntüleri farklı yükseklik ve genişlik değerlerine sahiptir, bu nedenle optimum performans elde etmek için tüm MR görüntülerini aynı boyutta yeniden boyutlandırılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan veri setinde farklı boyutlarda olan orijinal görüntüler, önerilen modele girdi olarak verilmek üzere 256x 256 piksel olarak yeniden boyutlandırılmıştır. Eğitim veri kümesine uygulanan veri çoğaltma yöntemi için ölçekleme (1/255), kesme (0,1 ve 0,2), yakınlaştırma (0,1 ve 0,2), parlaklık aralığı (0,1-1,5) ve yatay yer değiştirme hiperparametreleri tercih edilmiştir.

## 2.2. Evrişimli sinir ağları (ESA)

Yapay zekanın bir alt dalı olan derin öğrenme, büyük ve kompleks verilerden anlamlı bilgiler elde etmek için kullanılan makine öğrenmesinin bir alt dalıdır. Derin öğrenme mimarilerinin oluşturulmasında kullanılan algoritmaların seçimi önem arz etmektedir. Kullanılan verinin türü, boyutu, hacmi, yapısı ve kullanılan parametrelere göre algoritmalar dolayısıyla da derin öğrenme mimarisi değişmektedir. Bu bağlamda en bilinen derin öğrenme mimarisi Evrişimsel Sinir Ağları (ESA)'dır.

ESA, evrişim filtrelerinin sayesinde kompleks işlemleri gerçekleştirebilen bir mimariye sahiptir. Günümüzde görüntü ve ses işleme alanı başta olmak üzere doğal dil işleme, biyomedikal gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Şeker, Diri ve Balık, 2017). Klasik bir ESA mimarisi; evrişim, havuzlama ve tam bağlantılı katman olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır (Afshar, Mohammadi, Plataniotis, Oikonomou ve Benali, 2019; Yamashita, Nishio, Do ve Togashi, 2018).

Kullanılan katmanların sayısı, derinliği ve türüne göre farklı ESA mimarileri elde edilmektedir. Evrişim katmanı, giriş verileri üzerinde konvolüsyon işlemi yaparak bir özellik haritası oluşturur. Daha sonra verimliliği artırmak ve karmaşıklığı azaltmak adına havuzlama katmanında parametre sayısı azaltılarak özellik haritasının boyutu azaltılır ("Convolutional neural networks", 2023). Böylelikle yüksek boyutlu bilgiler, bu iki katmanın tekrar tekrar uygulanmasıyla görüntüden etkili bir şekilde çıkartılabilmektedir. Son olarak havuzlama katmanından gelen çıktı bir sütun vektöründe düzleştirilir ve tam bağlantılı katmanda sınıflandırma için ileri beslemeli sinir ağına girdi olarak verilir. Tam bağlantılı katman, geleneksel yapay sinir ağları ile benzer işlevleri yerine getirmektedir (Uzen, Yeroglu ve Hanbay, 2019).

Çalışmada beyin MR görüntülerinin sınıflandırılmasında DenseNet169 ESA modeli kullanılmıştır. 169 katmanlı bir ESA mimarisine sahip olan bu model görüntü sınıflandırması yapmak için tasarlanmış DenseNet grup modellerinden birisidir.

### 2.3. Performans metrikleri

Beyin MR görüntülerinin sınıflandırmak için önerilen derin öğrenme modelinin performansı, karmaşıklık matrisi kullanılarak hesaplanan kriterlere göre değerlendirilmiştir. Bu bağlamda doğruluk, özgüllük, duyarlılık, kesinlik ve F1-skoru ölçütleri kullanılmıştır. Bu ölçütlere ait matematiksel eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP+YP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP+YN} \quad (3)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{DN}{DN+YP} \quad (4)$$

$$\text{F1 - Skor} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (5)$$

Burada doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP) ve yanlış negatif (YN) değerleri sırasıyla; beklenen cevap doğruyken doğru olarak etiketlenenlerin sayısını, beklenen cevap yanlışken yanlış olarak etiketlenenlerin sayısını, beklenen cevap yanlışken doğru olarak etiketlenenlerin sayısını, beklenen cevap doğruyken yanlış olarak etiketlenenlerin sayısını göstermektedir (Narin, Kaya ve Pamuk, 2021).

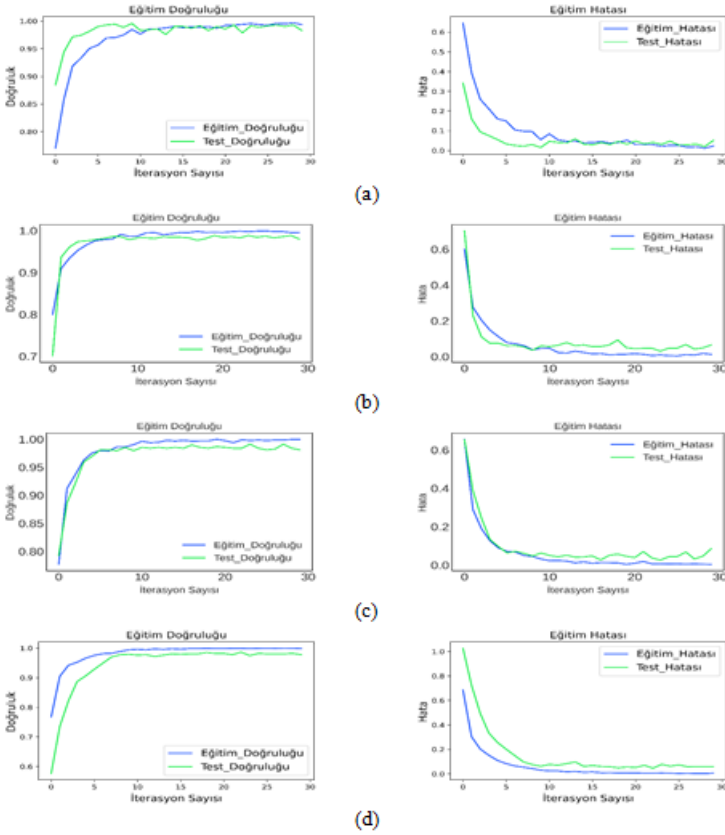
### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada, Tesla K80 Grafik İşlem Birimi (GPU)'ni içeren Google Colab ortamında Keras ve Tensorflow kütüphanelerine sahip Python programlama dilinde önceden eğitilmiş derin DenseNet169 ESA modeli kullanılarak MR görüntülerinden beyin tümörü sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Kullanılan veri seti %80-%20 oranında eğitim / test (2809/702) olmak üzere rasgele ayrılmıştır. Modelin rastgele başlatma ağırlıklarıyla önceden eğitmesinde Adam optimize edici ( $\beta_1 = 0,9$  ve  $\beta_2 = 0,999$ ) ile kategorik çapraz entropi fonksiyonu tercih edilmiştir.

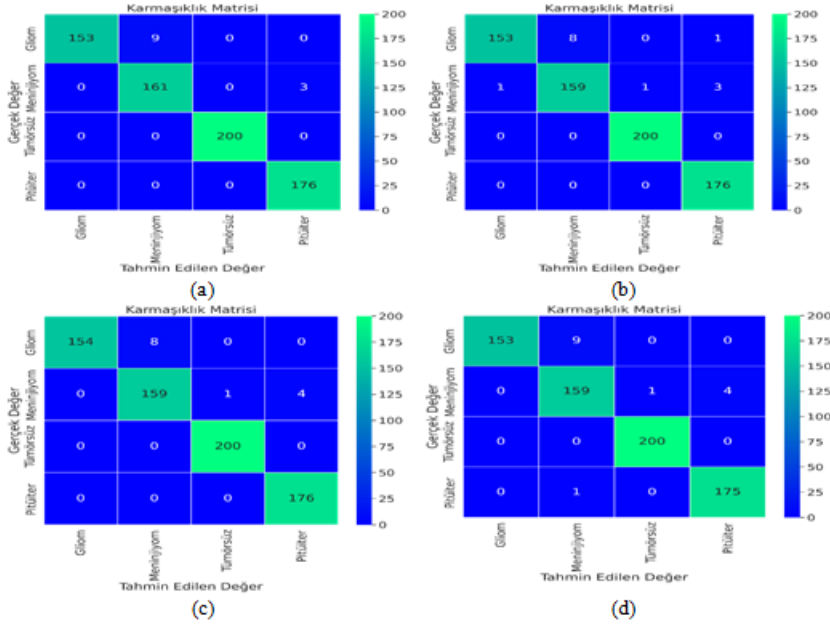
Yapılan simülasyonlarda iterasyon sayısı (30) ve öğrenme oranı (0,00001) sabit tutularak, farklı küme boyutları (4, 8, 16 ve 32) için önerilen derin öğrenme mimarisinin sınıflandırma performans metrikleri farklı kesme (0,1-0,2) ve (0,1-0,2) yakınlaştırma parametrelerine göre elde edilmiştir. Önceden eğitilmiş DenseNet169 modelinin farklı küme boyutu (4, 8, 16 ve 32), kesme (0,1) ve yakınlaştırma (0,1) parametreleri için eğitim / test doğruluğu ile hata (kayıp) değerleri grafikleri ve karmaşıklık matrisleri

sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde, küme boyutu = 4 iken 13 iterasyon sonunda kayıp grafiğinde daha az salınım meydana geldiğinden, önerilen modelin diğer küme boyutlarına göre daha kararlı bir sonuç ürettiği görülmüştür. Eğitim ve test doğruluğu, yeterli iterasyon sayısına ulaştığında yakınsamaya başlamaktadır. Şekil 4'teki karmaşıklık matrislerinin analizinden, küme boyutu = 4 iken 4 sınıf için ortalama sınıflandırma doğruluğunun (%99,15) ile diğer küme boyutu değerlerinde (küme boyutu = 8 (%99,01), küme boyutu = 16 (%99,08) ve küme boyutu = 32 (%98,93)) elde edilen sonuçlardan daha yüksek oranda başarımlar sergilemiştir.



**Şekil 3.** 30 iterasyonda kesme (0,1) ve yakınlştırma (0,1) parametreleri için DenseNet169 modelinin eğitim/test doğruluğu ve hata değerleri (a) küme boyutu = 4 (b) küme boyutu = 8 (c) küme boyutu = 16 (d) küme boyutu = 32.

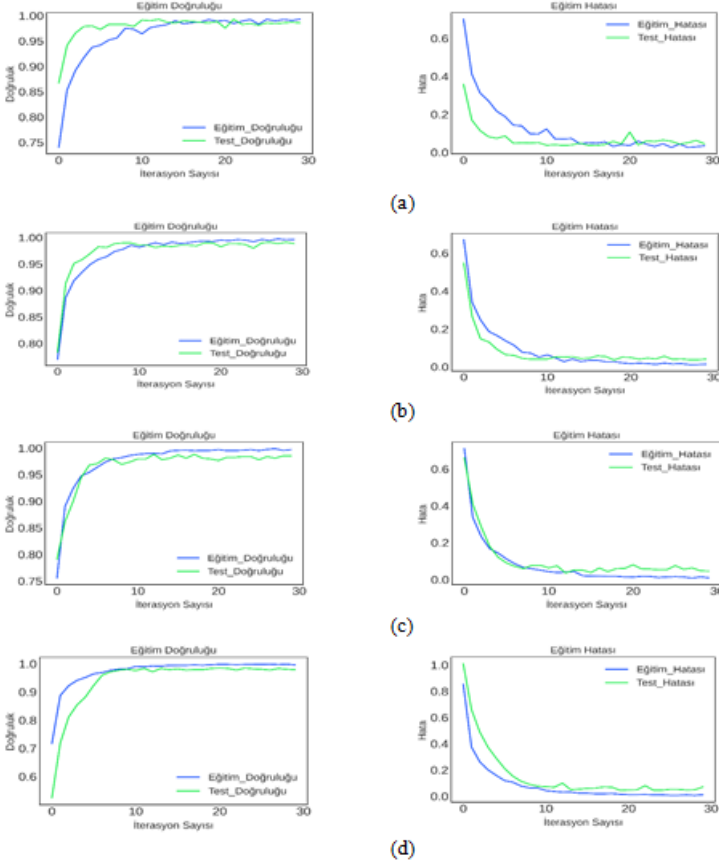


**Şekil 4.** 30 iterasyonda kesme (0,1) ve yakınlaştırma (0,1) parametreleriyle elde edilen DenseNet169 modelinin karmaşıklık matrisi (a) küme boyutu = 4 (b) küme boyutu = 8 (c) küme boyutu = 16 (d) küme boyutu = 32.

Şekil 5 ve Şekil 6’da ise sırasıyla önerilen modelin farklı küme boyutu (4, 8, 16 ve 32), kesme (0,2) ve yakınlaştırma (0,2) parametreleri için eğitim / test doğruluğu ile hata (kayıp) değerleri grafikleri ve karmaşıklık matrisleri verilmiştir.

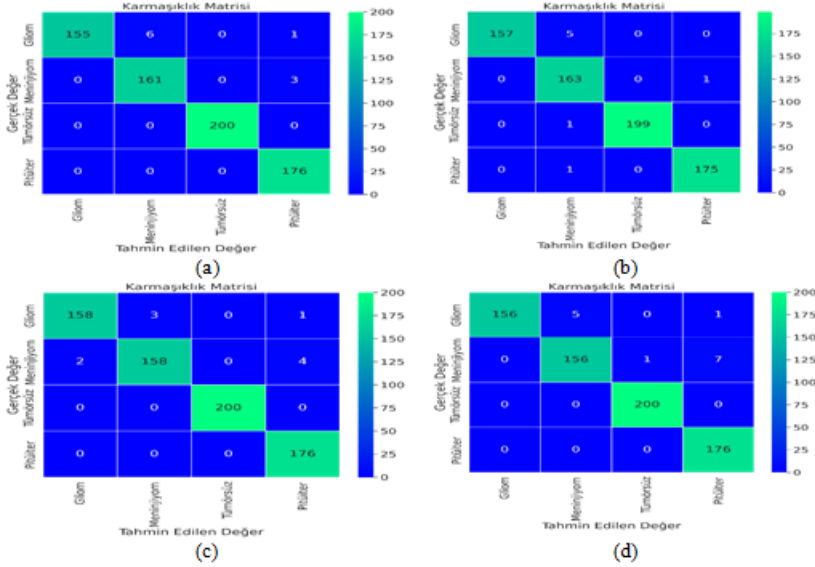
Şekil 5 incelendiğinde, küme boyutu = 8 iken 11 iterasyon sonunda kayıp grafiğinde daha az salınım meydana geldiğinden, önerilen modelin diğer küme boyutlarına göre daha kararlı bir sonuç ürettiği görülmüştür. Eğitim ve test doğruluğu, yeterli iterasyon sayısına ulaştığında yakınsamaya başlamaktadır.

Şekil 6’da sunulan karmaşıklık matrislerinin hesabından, küme boyutu = 8 iken 4 sınıf için ortalama sınıflandırma doğruluğunun (%99,43) ile diğer küme boyutu değerlerinde (küme boyutu = 4 (%99,29), küme boyutu = 16 (%99,29) ve küme boyutu = 32 (%99,01)) elde edilen ortalama sınıflandırma doğruluklarından daha yüksek oranda olduğu görülmektedir. Şekil 4 ve Şekil 6’da belirtilen karmaşıklık matrislerinden, Şekil 3 ve Şekil 5’teki grafiklerden elde edilen simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.** 30 iterasyonda kesme  $(0,2)$  ve yakınlaştırma  $(0,2)$  parametreleri için DenseNet169 modelinin eğitim/test doğruluğu ve hata değerleri (a) küme boyutu = 4 (b) küme boyutu = 8 (c) küme boyutu = 16 (d) küme boyutu = 32.

Bunun yanı sıra Şekil 4 ve Şekil 6’da verilen karmaşıklık matrislerinden önerilen DenseNet169 modeli için beş adet sınıflandırma performans metriği (doğruluk, özgüllük, duyarlılık, kesinlik ve F1-skor) de hesaplanmıştır. İlgili modelden 4 sınıf için elde edilen sınıflandırma performans sonuçları ayrıntılı olarak sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de sunulmuştur.



**Şekil 6.** 30 iterasyonda kesme (0,2) ve yakınlaştırma (0,2) parametreleri için DenseNet169 modelinin karmaşıklık matrisi (a) küme boyutu = 4 (b) küme boyutu = 8 (c) küme boyutu = 16 (d) küme boyutu=32.

**Tablo 1.** 30 iterasyonda küme boyutu (4, 8, 16 ve 32), kesme (0,1) ve yakınlaştırma (0,1) parametreleri için önceden eğitilmiş DenseNet169 modelinin performans metrikleri

K ü m e Boyutu	Sınıflar	Doğruluk (%)	Özgüllük (%)	Duyarlılık (%)	Kesinlik (%)	F1-Skoru (%)
4	Gliom	98,72	100	94,44	100	97,14
	Meninjiyom	98,29	98,33	98,17	94,71	96,41
	Tümörsüz	100	100	100	100	100
	Pitüiter	99,57	99,43	100	98,32	99,15
	<b>Ortalama</b>	<b>99,15</b>	<b>99,44</b>	<b>98,15</b>	<b>98,26</b>	<b>98,18</b>
8	Gliom	98,58	99,81	94,44	99,35	96,84
	Meninjiyom	98,15	98,51	96,95	95,21	96,07
	Tümörsüz	99,86	99,80	100	99,50	99,75
	Pitüiter	99,43	99,24	100	97,78	98,88
	<b>Ortalama</b>	<b>99,01</b>	<b>99,34</b>	<b>97,85</b>	<b>97,96</b>	<b>97,89</b>
16	Gliom	98,86	100	95,06	100	97,47
	Meninjiyom	98,15	98,51	96,95	95,21	96,07
	Tümörsüz	99,86	99,80	100	99,50	99,75
	Pitüiter	99,43	99,24	100	97,78	98,88
	<b>Ortalama</b>	<b>99,08</b>	<b>99,39</b>	<b>98</b>	<b>98,12</b>	<b>98,04</b>



32	Gliom	98,72	100	94,44	100	97,14
	Meninjiyom	97,86	98,14	96,95	94,08	95,50
	Tümörsüz	99,86	99,80	100	99,50	99,75
	Pitüiter	99,29	99,24	99,43	97,77	98,59
	<b>Ortalama</b>	98,93	99,30	97,71	97,84	97,75

**Tablo 2.** 30 iterasyonda küme boyutu (4, 8, 16 ve 32), kesme (0,2) ve yakınlaştırma (0,2) parametreleri için önceden eğitilmiş DenseNet169 modelinin performans metrikleri

Küme Boyutu	Sınıflar	Doğruluk (%)	Özgüllük (%)	Duyarlılık (%)	Kesinlik (%)	F1-Skoru (%)
4	Gliom	99	100	95,68	100	97,79
	Meninjiyom	98,72	98,88	98,17	96,41	97,28
	Tümörsüz	100	100	100	100	100
	Pitüiter	99,43	99,24	100	97,78	98,88
	<b>Ortalama</b>	99,29	99,53	98,46	98,55	98,49
8	Gliom	99,29	100	96,91	100	98,43
	Meninjiyom	98,86	98,70	99,39	95,88	97,60
	Tümörsüz	99,86	100	99,50	100	99,75
	Pitüiter	99,72	99,81	99,43	99,43	99,43
	<b>Ortalama</b>	99,43	99,63	98,81	98,83	98,80
16	Gliom	99,15	99,63	97,53	98,75	98,14
	Meninjiyom	98,72	99,44	96,34	98,14	97,23
	Tümörsüz	100	100	100	100	100
	Pitüiter	99,29	99,05	100	97,24	98,60
	<b>Ortalama</b>	99,29	99,53	98,47	98,53	98,49
32	Gliom	99,15	100	96,30	100	98,11
	Meninjiyom	98,15	99,07	95,12	96,89	96
	Tümörsüz	99,86	99,80	100	99,50	99,75
	Pitüiter	98,86	98,48	100	95,65	97,78
	<b>Ortalama</b>	99,01	99,34	97,86	98,01	97,91

Tablo 1 incelendiğinde; DenseNet169 modelinin kesme (0,1) ve yakınlaştırma (0,1) parametrelerinde küme boyutu = 4 olarak seçildiğinde, ortalama sınıflandırma doğruluğunun (%99,15), özgüllük değerinin (%99,44), duyarlılık değerinin (%98,15), kesinlik değerinin (%98,26) ve F1-skorunun (%98,18) olarak diğer küme boyutu değerlerinden daha yüksek başarımlar gösterdiği açıkça görülmektedir.

Tablo 2'ye bakıldığında; DenseNet169 modelinin kesme (0,2) ve yakınlaştırma (0,2) parametrelerinde küme boyutu = 8 olarak seçildiğinde, ortalama sınıflandırma doğruluğunun (%99,43), özgüllük değerinin

(%99,63), duyarlılık değerinin (%98,81), kesinlik değerinin (%98,83) ve F1-skorunun (%98,80) olarak diğer küme boyutu değerlerinden daha yüksek başarımla doğru tahmin yaptığı görülmektedir.

#### 4. Sonuç

Dünyadaki yaygın kanser türlerinden birisi olan beyin tümörünün erken teşhis edilmesi, uzmanların doğru müdahale yaparak hastaların hayatta kalma oranını arttırmasında kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, gliom, meninjiyom, pitüiter ve normal (tümörsüz) sınıflarına ait MR görüntülerinden beyin tümörünü otomatik olarak tahmin edebilmek için önceden eğitilmiş DenseNet169 modeli kullanılmıştır. Veri seti, ilişkili modeli eğitmek için 2809 adet beyin MR görüntüsünü ve test etmek için kullanılan 702 adet görüntüyü içermektedir. Elde edilen bulgular ışığında; önceden eğitilmiş DenseNet169 modelinin 30 iterasyonda kesme (0,2) ve yakınlaştırma (0,2) olarak alındığında, kesme (0,1) ve yakınlaştırma (0,1) değerlerine göre tüm küme boyutlarında ortalama sınıflandırma başarımlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamı itibariyle beyin tümörünün erken teşhis edilmesinde derin transfer öğrenme modelinin kullanımı, uzman doktorların ve radyologların iş yoğunluklarından kaynaklanan hatalı tanı koymasını en düşük seviyeye indirmeye yardımcı olma potansiyeline sahiptir. Gelecekteki çalışmalarda, farklı ESA modellerinin sınıflandırma performansı değiştirilecek hiperparametrelere göre daha ayrıntılı olarak incelenecektir. Ayrıca, beyin tümörü tanısında diğer güncel derin öğrenme temelli yaklaşımların araştırılması ve daha çok sayıda beyin MR görüntüleri üzerinde çalışılması planlanmaktadır.

## Kaynakça

- Aamir, M., Rahman, Z., Dayo, Z. A., Abro, W. A., Uddin, M.I., Khan, I. ... Hu, Z. (2022). A deep learning approach for brain tumor classification using MRI images. *Computers and Electrical Engineering*, 101, 108105.
- Afshar, P., Mohammadi, A., Plataniotis, K. N., Oikonomou, A. & Benali, H. (2019). From handcrafted to deep-learning-based cancer radiomics: challenges and opportunities. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(4), 132-160. doi: 10.1109/MSP.2019.2900993
- Ali, R., Al-jumaili, S., Duru, A. D., Uçan, O. N., Boyaci, A. & Duru, D. G. (2022, October). *Classification of brain tumors using MRI images based on convolutional neural network and supervised machine learning algorithms*. 2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey. doi:10.1109/ISM-SIT56059.2022.9932690
- American Brain Tumor Association (ABTA), About Brain Tumors (A Primer for Patients and Caregivers). (2023, May 12). Retrieved from <http://www.abta.org/secure/about-brain-tumors-a-primer.pdf>
- Anaraki, A. K., Ayati, M. & Kazemi, F. (2019). Magnetic resonance imaging based brain tumor grades classification and grading via convolutional neural networks and genetic algorithms. *Biocybernetics Biomed. Eng.*, 39(1), 63-74. doi:10.1016/j.bbe.2018.10.004
- Aslan, M. (2022). Derin öğrenme tabanlı otomatik beyin tümör tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34, 1, 399-407. doi:10.35234/fumbd.1039825
- Aurna, N. F., Yousuf, M. A., Taher, K. A., Azad, A. K. M. & Moni, M. A. (2022). A classification of MRI brain tumor based on two stage feature level ensemble of deep CNN models. *Computers in Biology and Medicine*, 146, 105539. doi: 10.1016/j.combiomed.2022.105539
- Ayadi, W., Elhamzi, W., Charfi, I. & Atri, M. (2021). Deep CNN for brain tumor classification. *Neural Processing Letters*, 53(1), 671-700. doi: 10.1007/s11063-020-10398-2
- Brain Tumor: Statistics. (2023, May 12). Retrieved from <https://www.cancer.net/cancer-types/brain-tumor/statistics>
- Citak-Er, F., Firat, Z. Kovanlikaya, I., Ture, U. & Ozturk-Isik, E. (2018). Machine-learning in grading of gliomas based on multiparametric magnetic resonance imaging at 3T. *Computers in Biology and Medicine*, 99, 154-160. doi: 10.1016/j.combiomed.2018.06.009
- Convolutional neural networks, (2023, May 12). Retrieved from <https://www.ibm.com/cloud/learn/convolutional-neural-networks>.
- Dandıl, E. (2015). *MR Görüntüleri ve MR Spektroskopi verileri ile yapay öğrenme tabanlı beyin tümörü tespit yöntemi ve uygulaması*. (Doktora Tezi). Sakar-

ya Üniversitesi, Sakarya. Yükseköğretim Kurumu Başkanlığı Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 382339)

- Dearmond, S.J., Fusco, M. M. & Dewey, M. M. (1989). *Structure of the human brain: A photographic atlas*. Oxford University Press.
- Deepak, S. & Ameer, P.M. (2021). Automated categorization of brain tumor from MRI using CNN features and SVM. *J. Ambient Intell. Hum. Comput.*, 12(8), 8357–8369. doi: 10.1007/s12652-020-02568-w
- Deepak, S. & Ameer, P.M. (2019). Brain tumor classification using deep CNN features via transfer learning. *Comput. Biol. Med.*, 111, 103345. Doi: 10.1016/j.compbiomed.2019.103345
- Gab Allah, A. M., Sarhan, A. M. & Elshennawy, N.M. (2023). Edge U-Net: Brain tumor segmentation using MRI based on deep U-Net model with boundary information. *Expert Systems with Applications*, 213, 118833. doi:10.1016/j.eswa.2022.118833
- Gaikwad, S. Patel, S. & Shetty, A. (2021, May). *Brain tumor detection: an application based on machine learning*. 2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belagavi, India. doi:10.1109/INCET51464.2021.9456347
- Ge, C., Gu, I. Y. H., Jakola, A. S. & Yang, J. (2020). Enlarged training dataset by pairwise gans for molecular-based brain tumor classification. *IEEE Access*, 8, 2560–22570. doi:10.1109/ACCESS.2020.2969805
- Hemanth, D. J., Anitha, J., Naaji, A., Geman, O., Popescu, D. E. & Son, L. H. (2018). A modified deep convolutional neural network for abnormal brain image classification. *IEEE Access*, 7, 4275–4283. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885639
- Huang, Z., Zhu, X., Ding, M. & Zhang, X. (2020). Medical image classification using a light-weighted hybrid neural network based on PCANet and DenseNet. *IEEE Access*, 8, 24697–24712. doi:10.1109/ACCESS.2020.2971225
- Irmak, E. (2021). Multi-classification of brain tumor mri images using deep convolutional neural network with fully optimized framework. *Iran. J. Sci. Technol., Transac. Electr. Eng.*, 45(3), 1015-1036. doi: 10.1007/s40998-021-00426-9
- Ismael, S. A. A., Mohammed, A. & Hefny, H. (2020). An enhanced deep learning approach for brain cancer MRI images classification using residual networks. *Artificial Intelligence in Medicine*, 102, 101779. Doi: 10.1016/j.artmed.2019.101779
- Jain, R., Jain, N., Aggarwal, A. & Hemanth, D. J. (2019). Convolutional neural network based Alzheimer's disease classification from magnetic resonance brain images. *Cognitive Systems Research*, 57, 147–159. doi:10.1016/j.cogsys.2018.12.015
- Kaplan, K. (2020). *Beyin tümör tiplerinin makine öğrenmesi ve derin öğrenme*

*tabanlı teknikler ile sınıflandırılması.* (Doktora Tezi), Kocaeli Üniversitesi, İzmit. Yükseköğretim Kurumu Başkanlığı Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 667599)

- Kaya, C., Senyer Yapıcı, I. & Uzun Arslan, R. (2022, March). *Colon cancer outcome prediction from histopathological images using deep convolutional neural network.* 4th International Engineering Research Symposium (INERS'22), Duzce, Turkey, 2022. Erişim adresi: [https://umas.duzce.edu.tr/yuklemeler/abstract\\_book\\_iners\\_\(10.03.2022\)%20\(1\).pdf](https://umas.duzce.edu.tr/yuklemeler/abstract_book_iners_(10.03.2022)%20(1).pdf)
- Kesav, N. & Jibukumar, M. G. (2022). Efficient and low complex architecture for detection and classification of Brain Tumor using RCNN with Two Channel CNN. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(8), 6229-6242. doi:10.1016/j.jksuci.2021.05.008
- Kesav, N., & Jibukumar, M. G. (2021). Complexity reduced Bi-channel CNN for image classification. In *Machine Learning for Predictive Analysis: Proceedings of ICTIS 2020* (pp. 119-131). Springer Singapore.
- Khan, Md. S. I., Rahman, A., Debnath, T., Karim, Md. R., Nasir, M. K. ... Dehzangi, I. (2022). Accurate brain tumor detection using deep convolutional neural network. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 20, 4733-4745. doi:10.1016/j.csbj.2022.08.039.
- Kumar, S., Dabas, C. ve Godara, S. (2017). Classification of brain MRI tumor images: a hybrid approach. *Procedia Computer Science*, 122, 510-517. doi:10.1016/j.procs.2017.11.400.
- Kumar, R. L., Kakarla, J., Isunuri, B. V. & Singh, V. (2021). Multi-class brain tumor classification using residual network and global average pooling. *Multimedia Tools and Applications*, 80(9), 13429–13438. doi:10.1007/s11042-020-10335-4
- Kumar, S. & Mankame, D. P. (2020). Optimization driven deep convolution neural network for brain tumor classification. *Biocybern. Biomed. Eng.*, 40(3), 1190–1204. doi:10.1016/j.bbe.2020.05.009
- Mohsen, H., El-Dahshan, E. S. A., El-Horbaty, E. S. M. & Salem, A. B. M. (2018). Classification using deep learning neural networks for brain tumors. *Future Computing and Informatics Journal*, 3(1), 68-71. doi:10.1016/j.fcij.2017.12.001
- Narin, A., Kaya, C. & Pamuk, Z. (2021). Automatic detection of coronavirus disease (covid-19) using X-ray images and deep convolutional neural networks, *Pattern Analysis and Applications*, 24, 1207-1220. doi:10.1007/s10044-021-00984-y
- National Brain Tumor Society, Brain Tumor Types. (2023, May 12). Retrieved from <https://braintumor.org/brain-tumors/about-brain-tumors/brain-tumor-types/>
- Nickparvar, M. (2021). *Brain Tumor MRI Dataset* [Data set]. Kaggle. <https://doi.org/10.34740/KAGGLE/DSV/2645886>

- Öksüz, C., Urhan, O. & Güllü, M. K. (2022). Brain tumor classification using the fused features extracted from expanded tumor region. *Biomedical Signal Processing and Control*, 72, 103356. doi: 10.1016/j.bspc.2021.103356
- Polat, Ö. (2022). Sadeleştirilmiş U-Net mimarisi ile beyin tümörü segmentasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(4), 856-861. doi:10.28948/ngmuh.1111082
- Sahayam, S., Nenavath, R., Jayaraman, U. & Prakash, S. (2022). Brain tumor segmentation using a hybrid multi resolution U-Net with residual dual attention and deep supervision on MR images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 78, 103939. doi:10.1016/j.bspc.2022.103939
- Sajjad, M., Khan, S., Muhammad, K., Wu, W., Ullah, A. & Baik, S. W. (2019). Multigrade brain tumor classification using deep CNN with extensive data augmentation. *Journal of Computer Science*, 30, 174–182. doi:10.1016/j.jocs.2018.12.003
- Salama, W. M. & Shokry, A. (2022). A novel framework for brain tumor detection based on convolutional variational generative models. *Multimedia Tools and Applications*, 81(12), 16441-16454. doi:10.1007/s11042-022-12362-9
- Shahin, A. I., Aly, W. & Aly, S. (2023). MBTFCN: A novel modular fully convolutional network for MRI brain tumor multi-classification. *Expert Systems with Applications*, 212, 118776. doi: 10.1016/j.eswa.2022.118776
- Shao, L., Zhu, F. & Li, X. (2014). Transfer learning for visual categorization: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 26(5), 1019–1034. doi:10.1109/TNNLS.2014.2330900
- Singh, V., Sharma, S., Goel, S., Lamba, S. & Garg, N. (2021). Brain tumor prediction by binary classification using VGG-16. *Smart and Sustainable Intelligent Systems*, 127-138. doi:10.1002/9781119752134.ch9 (KİTAP BÖLÜMÜ)
- Sultan, H. H., Salem, N. M. & Al-Atabany, W. (2019). Multi-classification of brain tumor images using deep neural network. *IEEE Access*, 7, 69215–69225. doi:10.1109/ACCESS.2019.2919122
- Swati, Z. N. K., Zhao, Q., Kabir, M., Ali, F., Ali, Z., Ahmed, S. & Lu, J. (2019). Content-based brain tumor retrieval for MR images using transfer learning. *IEEE Access*, 7, 17809-17822. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2892455
- Şeker, A., Diri, B. & Balık, H.H. (2017). Derin öğrenme yöntemleri ve uygulamaları hakkında bir inceleme. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(3), 47-64. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/394923>
- Ucar, M. & Incetas, M. O. (2022). Classification of brain MRI using EfficientNet CNN model and feature selection method. M. Şaşma (Ed.), *Engineering from machine learning to virtual reality*, (s. 19-36) içinde. Yer: İKSAD Publishing House.
- Uckuner, M. & Erol, H. (2021, September). *A new deep learning model for*

*skin cancer classification*. 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Ankara, Turkey. doi:10.1109/UBMK52708.2021.9558936

- Uzen, H., Yeroglu, C. & Hanbay, D. (2019, September). *Development of CNN architecture for honeybees disease condition*. 2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), Malatya, Turkey. doi:10.1109/IDAP.2019.8875886
- Vani, N., Sowmya, A. & Jayamma, N. (2017). Brain tumor classification using support vector machine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7), 792–796. Erişim adresi: <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7367.pdf>
- Vankdothu, R., Hameed, M. A. & Fatima, H. (2022). A brain tumor identification and classification using deep learning based on CNN-LSTM method. *Computers and Electrical Engineering*, 101, 107960. doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.107960
- Yamashita, R., Nishio, M., Do, R. K. G. & Togashi, K. (2018). Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging*, 9, 611–629, 2018. doi:10.1007/s13244-018-0639-9







## BÖLÜM 4

### **GIDALARDAKİ FİTALAT ESTERLERİNİN VARLIĞI VE GIDA GÜVENLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

*Gürsel İŞÇİ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi,04100,  
Ağrı Türkiye E-mail:gisci@agri.edu.tr ORCID ID: Gürsel İşçi: 0000-0002-  
3863-8291

## 1. Giriş

Plastikler, kimyasal anlamda saf polimerler olmayıp ambalajın kalite ve özelliklerini geliştirmek/iyileştirmek amacıyla plastik malzemelerin üretiminde plastikleştiriciler, stabilizatörler, UV emiciler, antioksidanlar, antistatik ajanlar, renklendiriciler, optik parlaticılar gibi katkı maddeleri olarak kullanılabilirler (García Ibarra et al., 2019). Plastiklerin doğal yapısı gereği sert ve kırılğan olduklarından dolayı özellikle polivinil klorür (PVC) gibi plastikler başta olmak üzere yapılarına esnekliğini ve dayanıklılığını arttırmak amacıyla plastikleştirici maddeler katılabilirler (Guo and Kannan, 2012). Fitalat esterlerin 1920'lerde bilimsel olarak keşfinden (Biscardi et al., 2003) beri en çok kullanılan plastikleştirici kimyasallardır. Stabilite, akışkanlıkları düşük uçuculuk ve yüksek molekül ağırlığına sahip olmaları gibi eşsiz özellikleri sebebiyle fitalat esterleri plastikleştirici olarak son derece uygun bileşikler olarak kabul edilmektedirler (Herrero et al., 2021). Keşfinden bu güne gıdaların ambalajlanmasında plastiklerin kullanımının giderek artmasıyla birlikte Dünya çapında yaklaşık olarak 8 milyon tondan fazla fitalat esteri üretildiği belirtilmektedir (Li et al., 2021). Ayrıca fitalat esterleri, kişisel kozmetikler (Notardonato et al., 2019), farmasötikler, besin takviyeleri (Wu et al., 2012), çözücüler, yapıştırıcılar, boyalar, vernikler, böcek öldürücüler, temizlik malzemeleri, medikal araçlar (SCENIHR, 2016), çocuk oyuncakları (Bošnjir et al., 2003) ve gıda ambalajı (Arfaeina et al., 2020; Jeddı et al., 2015; Li et al., 2004; Pourzamani et al., 2020) gibi ürünlerin kalitesini veya performansını artırmak için birçok kimyasal bileşik için de yaygın olarak kullanılmaktadır (Gao and Wen, 2016). Fitalatların plastik malzemelerin kullanımını kolaylaştırıcı birçok avantajı olmasına rağmen ambalaj maddesine kimyasal olarak bağlı olmadığından dolayı ısı, sıcaklık, pH, gıda maddesinin bileşimi gibi şartlara bağlı olarak gıdalara geçişi olabilmektedir. Gıdalara geçen fitalat esteri bazen toksik metabolitlere dönüşebilmekte, çocuklar ve bebekler başta olmak üzere insan sağlığını olumsuz etkilemekte, aynı zamanda gıdaların organoleptik özellikleri üzerinde de değişikliklere sebebiyet vermektedirler (Fasano et al., 2012). Ayrıca karaciğer, böbrek ve üreme sistemi üzerinde toksik etki oluşturduğu için endokrin bozucu olarak da bilinmektedir (Okpara et al., 2022). Bu kimyasal bileşiklerin gıdalardaki muhtemel varlığı ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle çeşitli yiyeceklerde fitalat seviyelerinin izlenmesi oldukça önem arz etmektedir (Montuori et al., 2008). Çin Ulusal Çevre İzleme Merkezi, Avrupa Birliği ve ABD Çevre Koruma Ajansı, Uluslararası Kanseri Araştırmaları Ajansının fitalat esterleri, İnsan ve çevre etkileşimini göz önünde bulundurularak yaptığı çalışmalar sonucunda, bu bileşiklerin mutajenlik, teratojenite ve kanserojenlik açısından fitalatları öncelikli kirletici maddeler olarak sınıflandırılmaktadır (Becerra-Herrera et al., 2022) Bu derlemenin amacı içeceklerde

bulunan fitalat esterlerinin varlığının literatür varlığında tartışılmasıdır.

## 2. Fitalat Esterleri

Fitalatlar, fitalik asitin farklı alkol türleriyle esterleştirilmesinden üretilen bileşiklerdir.ve genellikle suda az çözünür, yağlarda ve alkolde çözünür olduğu bilinmektedir (Di Bella et al., 2014). Fitalatlar veya fitalik asit (1,2-benzendi-karboksilik asit) esterleri, keşfinden sonra 1930'lerden bu yana plastik malzemelerin esneklik, şeffaflık, dayanıklılık ve uzun ömürlülüğü arttırmak için plastikleştiriciler olarak yaygın olarak kullanılmışlardır (Salazar-Beltrán et al., 2017). Fitalat esterleri karbon zincirlerinin uzunluğuna göre iki ayrı grupta sınıflandırılmaktadır. Yüksek molekül ağırlığına sahip olan fitalatlar yapılarında 7-13 karbon zincirine sahip olup di-2-etilheksil fitalat (DEHP), di isoundesil fitalat (DiUP), di isoonil fitalat (DiNP) ve di izodesil fitalat (DiDP) gibi fitalatlardan oluşup öncelikle, polivinil klorür (PVC) ürünlerini yumuşaklığını ve esnekliğini arttırmak amacıyla plastikleştirici olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle DEHP en yaygın olarak kullanılan plastiktikleştirici olup toplam fitalat tüketiminin %65,2'si olmakla birlikte tüketimi 1 yılda 325 milyon tona kadar çıkabilmektedir (Bang et al., 2012; Guo and Kannan, 2011; B. Li et al., 2019). Düşük molekül ağırlığına sahip olanlar ise 3-6 karbon zincirine sahiptir. Di-n-bütül fitalat (DBP), di isobütül fitalat (DiBP) ve butil benzil fitalat (BBZP) olup çeşitli tüketici ve kişisel bakım ürünlerinde renk ve koku tutmak için yaygın olarak çözücü madde olarak kullanılırlar. Bunların dışında di metil fitalat (DMP) ve di etil fitalat (DEP) yapısında 3 karbon atomu bulundurmasına rağmen bu fitalatlar plastikleştirici olarak kullanılmazlar (Li et al., 2016). Di (2-ethylhexyl) fitalat gibi daha fazla lipofilik olan bazı fitalatlar vücuda deri yolu ile girebildikleri veya inhalasyon yoluyla asimile edilse bile, ana maruz kalma yolu özellikle farklı plastik ambalajlarla paketlenmiş yiyecek ve içecek tüketimi olarak görülmektedir (Fierens et al., 2012a). İkincil kaynak olarak, plastik malzemelerin son yıllardaki kullanımındaki çarpıcı artış, fitalatların su rezervuarlarında, özellikle yüzey sularında dağılmasına neden olmuştur. Böylelikle fitalatlar, tarım topraklarında ve bunun sonucunda ekilebilir sebzelerde önemli konsantrasyonlarda bulunmaya başladığı saptanmıştır (Li et al., 2019). Fitalatlar üzerine yapılmış birçok çalışmada, vahşi yaşam üzerinde toksik ve östrojenik etkilere sahip olduğunu, üremeye zarar verdiğini ve genetik mutasyona neden olduğunu belirtilmiştir (Mei et al., 2023). Bu bileşikler hayatımızı kolaylaştırmak için üretilmiş olmasına rağmen, olumsuz etkilerinin göz ardı edilmesi mümkün olmamaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı polimer temelli ürünlerden gıdalara geçebilen kimyasal bileşiklerin gıda güvenliği açısından araştırılmasına ve değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur.

## 2.1. Gıdalardaki Fitalat Esterlerinin Varlığı

PET, tetrafitalik asit ve etilen glikolün reaksiyon ürünüdür. Sağlamlığı ve şeffaflığı gibi özelliklere bağlı olarak, bu polimer, şişelenmiş su, alkol-süz içecekler ve diğer gıda ürünleri için İzofitalik asit ve dimetil fitalat gibi monomerler de dahil edilerek büyük hacimli yeniden doldurulabilir özelliklere sahip su şişelerinin üretimine izin verecek ambalajları yapmak için kullanılmaktadır (Robertson, 2013). Son on yılda, gelişmiş ülkelerde musluk suyunun PET şişelenmiş su ile değiştirilmesine yönelik artan bir eğilimin sonucu olarak polietilen tetrafitalat (PET), polivinil klörür (PVC), şişelenmiş su tüketimi büyük ölçüde dünya çapında artış göstermiştir (Szendi et al., 2018). PET, yiyecek veya içecek ambalajları için en yaygın şekilde üretilen malzeme olmasıyla birlikte PET ve PVC tüm içecek şişelerinin %> 99'unu üretmek için kullanılmakta olduğu belirtilmektedir (Carneado et al., 2014). Fitalat esterlerini içeren PET ve PVC ambalajlar ile paketlenmiş gıda ürünlerinin hayatımızın her alanında bulunması ve bu kimyasal bileşiklerin sağlık üzerine toksik etkilerinin olduğu birçok çalışmada gösterilmesinden dolayı farklı içecek gruplarında migrasyon seviyelerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar kapsamında, Yunanistan'da bir araştırmada, organik bileşiklerin (fitalat esterleri, kloroform, trihalometanlar ve haloasetik asit) şişelenmiş suların pazarında varlığı araştırılmış ve düşük konsantrasyonlarda tespit edilen trihalometanlar ve haloasetik asitler gibi dezenfeksiyon yan ürünleri rapor edilmiştir (Leivadara et al. 2008). Cam ve PET şişelerdeki maden sularının genotoksisitesinin değerlendirilmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, 10 gün boyunca 25 °C ve 40 °C'de depolanan maden sularında DEHP veya DBP'ye rastlanmadığı bildirilmiştir (Ceretti et al. 2010). İspanya'da şişelenmiş suların plastik bileşenlerinin migrasyonu araştırılan başka bir çalışmada, 131 doğal maden suyu, 362 kaynak suyu, çeşitli ticari markaların 3 arıtılmış suyu analiz edilmiştir ve DEHP ve BPA'nın en yaygın kontaminantlar olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, şişelenmiş suların plastik bileşenlerinin konsantrasyonunun 0,002 ng/mL ile 24,2 ng/mL arasında değiştiği belirlenmiştir (Guart et al., 2014). İrlanda'da satılan üç farklı markaya ait içme sularının ve ambalajlarının bazı fitalat esterleri (DMP, DEP, DBP, DHP, BBP, DBEP, DEHP, DNOP, DINP) içerdiği analiz edilmiştir. Sadece DBP ve DEHP'in su örneklerinde ve ambalajlarında tespit edildiği rapor edilmiştir. Su ve ambalaj örneklerinde DBP konsantrasyonu sırasıyla 0,0629-0,0675 µg/L ile 20,927-71,668 ng/g ve DEHP konsantrasyonu ise 1,1962-1,6848 µg/L ile 0,393-1,499 µg/g arasında tespit edilmiştir (Otero et al., 2015). İran'da bir çalışmada, PET şişe sular ve musluk sularında fitalat düzeylerinin su kaynağına göre değiştiği ve tüm su kaynaklarında DMP ve DEHP'in baskın bileşenler olduğu belirlenmiştir (Abtahi et al., 2019). Yapılan bir piyasa araştırmasında Türkiye pazarla-

rında satılan içeceklerde (kola, soda, limonata ve maden suyu) ftalat migrasyonun seviyeleri araştırılmış sonuç olarak sodada 0.095-0.633 mg/L, limonatada 0.018-1.219 mg/L, kolada 0.019-1.123 mg/L, mineral sularda 0.085-0.312 mg/L arasında olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca DEHP'in içeceklere en yüksek derecede geçiş yaptığını belirtmişlerdir (Ustun et al., 2015). Perakende süt ürünleri ve bebek yiyeceklerinde, bebekler ve çocuklar için anne sütü dahil ftalat esterlerinin varlığı endişe vericidir. Di-n-bütül ftalat (DBP), butil benzoat ftalatu (BBP), di-2-(etilhekzil) ftalat (DEHP) ve di-2-(etilhekzil) adipat (DEHA) dahil plastikleştiricilerin türlerini araştırmak için yapılan bir çalışmada, 11 yeni doğan (0-28 gün) sütü ve 11 bebek yiyeceği örneği de dahil olmak üzere toplam 29 diyet örneğinde bir veya daha fazla ftalat esterinin tespit edildiği, bebek yiyeceklerinin yaklaşık %50'sinde ftalat esterlerinin tespit edildiği rapor edilmiştir (Petersen and Breindahl, 2000). Çin'in Shaanxi eyaletindeki 10 süt çiftliğinden 15 ticari markanın 90 keçi sütü bazlı bebek formülü örneğinde 15 farklı ftalat esterinin varlığını araştıran bir çalışmada, dibütül ftalatın (38,10 µg/kg) en yaygın olarak tespit edilen ftalat olduğu, bis(2-etilheksil) ftalatın (24,20 µg/kg), diizobütül ftalatın (16,60 µg/kg) ve dimetil ftalatın (8,70 µg/kg) bunu takip ettiği rapor edilmiştir. Örneklerde başka ftalatlar tespit edilmemiştir (Ge et al., 2016). Bradley et al., (2013) İngiltere de toplam 261 gıda maddesi satın alınmış ve ftalat seviyelerine göre test edilmiştir. Ftalat diesterlerin 77 örnekte bulunduğu doğrulanmıştır. Fierens et al.,(2012) Farklı pişirme yöntemlerinin ftalat seviyeleri üzerine etkisini araştırdıkları bir çalışmada salmon balıklarında 153.85 µg/kg DEHP, 8.08 µg/kg DnBP, 5.8 µg/kg DiBP, 1.36 µg/kg BBP ve farklı ftalat esterlerinin varlığını belirlemişlerdir. Ayrıca pişirmenin ftalat seviyelerine etkisi sadece uygulanan pişirme işlemine değil, aynı zamanda yemeğin çeşitine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Yukarıda bahsedilen ulusal ve uluslararası literatür ışığında ftalat esterlerinin gıda ürünlerinde bulunabildiği görülmektedir.

## 2.2. Ftalat Esterleri, Yasal Limitleri, Sağlık ve Toksikokinetik Özellikleri

PET malzemelerden geçebilecek önemli bir migrant ise başta PVC olmak üzere endüstriyel polimerlerin esnekliğini ve yumuşaklığını arttırmak amacıyla plastikleştirici olarak kullanılan ftalat esterleridir. 1,2- benzen dikarboksilik asidin dialkil veya alkil aril esterleri olarak bilinen bu bileşikler; dimetil ftalat (DMP), dietil ftalat (DEP), di n bütül ftalat (DBP), di iso bütül ftalat (DIBP), benzil bütül ftalat (BBP), bis (2-etilhekzil ftalat) (DEHP), di-n-hekzil ftalat (DNHP), disiklo hekzil ftalat (DCHP), di-isononil ftalat (DINP), di-isodesil ftalat (DIDP) ve di-n-oktil ftalat (DNOP) bileşiklerini içeren sentetik organik bileşiklerin bir grubu olarak tanımlanmakta, özellikle DEHP en yaygın olarak kullanılan plastikleştirici olarak

kabul edilmektedir (Becerra-Herrera et al., 2022; Guo and Kannan, 2012). Fitalat esterlerinin sert polimerleri esnek plastiklere dnstrmek için kullanılan katkı maddesi olduğu, buna karşılık PET ambalajlarda fitalat esterlerinin Şişe retimi sırasında kasıtlı olarak eklenmemiŐ maddeler olarak kabul edildiği bildirilmiştir (Luo et al., 2018). Fitalat esterlerinin kimyasal yapılarındaki karbon moleküllerinin sayısına göre düşük moleküler ağırlıklı fitalat esterleri ( $\leq 6$  karbon) ve yüksek molekül ağırlıklı fitalat esterleri ( $\geq 7$  ila 13 karbon) olarak sınıflandırıldığı, her iki grubunda yüksek oranda yağda zndğu, bununla birlikte düşük molekül ağırlıklı fitalat esterlerinin yüksek molekül ağırlıklı olanlarına göre suda daha fazla zndğu ve küresel olarak kullanılan plastikleştiricilerin % 80' inden fazlasını oluşturduğu bilinmektedir (Pang et al., 2021). DMP, DEP, BBP, DnBP, DIBP gibi kısa zincirli fitalatların genellikle kişisel bakım ürünlerinin, boyaların üretimi ilaç endüstrisinde tabletlerin enterik kaplamasında kullanıldığı, DEHP, DINP gibi uzun zincirli fitalatların ise gıda ile temas eden ambalaj materyallerinde oyuncaklar, tıbbi alanlar ile mobilya ve inşaat malzemeleri gibi çeşitli endüstri ve tüketicilerde yaygın bir Şekilde kullanıldığı bildirilmiştir (Dualde et al., 2020).

Fitalat esterlerinin plastiklere kimyasal bağlar ile bağlı olmadıkları ve bu nedenle plastik materyallere temas eden gıdalara, suya, ilaçlara ve havaya geçiş yapabildikleri bildirilmiştir (Pourzamani et al., 2020). Aynı zamanda Avrupa Birliği tarafından yapılan tanımlamaya göre DMP'nin uçucu organik bileşikler, diğer fitalat esterlerinin ise yarı uçucu organik bileşikler olarak sınıflandırıldığı, sonuç olarak bu bileşiklerin atmosfere parçacıklar ve buharlar olarak yayılabildiği belirtilmiştir (Chen et al., 2014; Pang et al., 2021). Bu durumun fitalat esterlerinin en yaygın olarak bulunan kimyasal kontaminantlar arasında yer almasına neden olduğu ifade edilmiştir (Adenuga et al., 2020). Söz konusu bileşiklerin vücuda ağızdan alınma, soluma ve deriyle temas gibi farklı kaynaklardan ve yollardan girebildiği, bu yollardan en yaygın olanının plastik ambalajlarla ilgili paketlenen gıdaların tüketilmesinin olduğu bildirilmiştir (Cheshmazar et al., 2021). Özellikle fitalat esterlerinin lipofilik karakterde olduğu, bu nedenle yağ ve yağ içeren gıdalarda birikebileceği ifade edilmiştir (Keresztes et al., 2013). Fitalat esterlerinin insan sağlığı üzerindeki etkileri temel olarak canlıların endokrin sistemlerine müdahale ile ilgili olduğu, endojen hormonların sentezini taklit edebilmeleri, rekabet edebilmeleri veya yapılarını bozabilmeleri nedeniyle endokrin bozucu olarak kabul edildikleri bildirilmiştir (Pang et al., 2021). Endokrin bozucu olarak fitalat esterlerinin hormon reseptörlerine bağlanarak anti-androjenik aktivite, testisteki sertoli hücrelerinin yapısı ve fonksiyonunda değişiklik, spermin hareketliliği ve sayısında azalma, kadınlarda steroid hormonlarının deėiŐimini, erken olgunlaŐma, erken doğum ve fetal ölüm gibi bir takım olumsuzluklara neden olduğu bildirilmiştir

(Abtahi et al., 2019; Arfaenia et al., 2020). Giderek artış gösteren epidemiyolojik çalışmalar fetalatalara maruz kalmanın birçok olumsuz etkiye neden olabileceğini göstermiş, bu etkilerin bebeklerde nörogelişimi geciktirme (Jones et al., 2018; Jurewicz and Hanke, 2011), çocuklarda artan solunum yolu hastalıkları ile alerjik reaksiyonlar (Buckley et al., 2018), yaşlılarda akciğer fonksiyonlarında azalma ve depresyon (Kim et al., 2018) olduğu ifade edilmiştir. İlave olarak düşük doğum ağırlığı, otizm, dikkat eksikliği, hiperaktivite gibi sağlık sorunları ile de ilişkili olduğu bildirilmiştir (Otero et al., 2015). Aynı zamanda kronik olarak fetalatalara maruz kalmanın erkeklerde prostat kadınlarda göğüs kanserine, tiroit bezlerinde anormalliklere, obezite ve karaciğer hasarına neden olabileceği belirtilmiştir (Cheshmazar et al., 2021). Gıdalar ile vücuda alınmasına izin verilebilecek fetalat miktarı ülkelere göre değişiklik göstermekle birlikte Birleşik Krallık için kabul edilebilir miktarlar DEHP için 0.05 mg/kg vücut ağırlığı/gün; BBP için 0.1 mg/kg vücut ağırlığı/gün; DBP için 0.05 mg/kg vücut ağırlığı/gün; DEP için ise 0.2 mg/kg vücut ağırlığı/gün olarak belirtilmiştir. Avrupa Birliği ülkelerinde günlük tolere edilebilir toplam fetalik ester dozu 0.3 mg/kg vücut ağırlığı/gün olarak belirtilmiştir (Petersen and Breindahl, 2000).

Sağlık üzerindeki olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğu zaman, plastik maddelerde sıklıkla kullanılmaları ve çevre açısından sağlık riskleri nedeniyle belirli fetalat esterlerinin Avrupa Birliği (AB), Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve diğer uluslararası kuruluşlar tarafından da öncelikli kirlenici maddeler olarak tanımlanmıştır. Bu sağlık endişeleri nedeniyle hem Avrupa ülkelerinde hem de ülkemizde fetalat esterleri ile ilgili olarak bazı yasal sınırlamalar getirilmiştir. Fitalat esterlerine maruz kalma seviyesinin ölçülmesinin kontrol önlemlerinin benimsenmesini garanti etmek ve Avrupa Birliği Çevre Koruma Ajansı (USEPA) ve Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA) tarafından belirlenen oral referans dozları ve tolere edilebilir günlük alımlar gibi belirlenmiş güvenlik sınırlarına dayalı risk değerlendirilmelerinin yapılması açısından oldukça önemi olduğu bildirilmiştir (González-Mariño et al., 2021). Çevre açısından riskleri ve sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle, belirli fetalatlar Avrupa Birliği (AB), Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA) ve diğer uluslararası kuruluşlar tarafından “öncelikli tehlikeli maddeler” olarak tanımlanmaktadır. EC 1907/2006 Yönetmeliği’nde, fetalat esterlerinin moleküler ağırlıkları ve toksisitelerine göre iki grupta sınıflandırıldığı belirtilmektedir. Birinci grupta yüksek moleküler ağırlıklı DIDP ve DINP fetalatları yer alırken, ikinci grupta düşük moleküler ağırlıklı ve daha zararlı etkilere sahip DBP, BBP ve DEHP fetalatları bulunmaktadır. Avrupa Kimyasal Ajansı (ECHA) tarafından DEHP, DBP, BBP, DIBP, DINP, DIDP ve DNOP fetalatları kanserojenik, mutajenik veya üreme için toksik kategori 1B olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma,

1 ile 4 arasında yapılmaktadır ve 1, en tehlikeli grup olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, fitalatların kullanımını konusunda dikkatli olunması gerekmektedir.

### 3.Sonuç

Gıda güvenliği, gıdaların üretim aŐamasından tüketicie kadar olan süreçteki fiziksel, kimyasal, biyolojik, mikrobiyolojik ve diğer tüm zararların öngörülmesi ve önlenmesi tedbirlerini kapsamaktadır. Mikrobiyal açıdan güvenilir olmaları gıda güvenliği açısından en önemli hususlardan biridir. Ancak son yıllarda insan sağlığı üzerindeki kanserojenik ve toksikolojik etkileri nedeniyle pestisitler, ambalaj malzemeleri, ağır metaller, deterjan ve dezenfektan kalıntıları gibi kimyasal kontaminasyon kaynakları da dikkat çekmektedir. Özellikle ambalaj malzemelerinden gıdalara geebilecekle olan maddelerin miktarları ve insan sağlığı üzerindeki etkileri büyük önem arz etmektedir. Plastik ambalajlar, yaygın kullanımları ve kimyasal açıdan saf olmamaları nedeniyle özellikle kimyasal kontaminasyon açısından özel bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, ambalaj malzemelerinden kaynaklanabilecek sağlık risklerinin belirlenmesi, tüketicie sağlığı açısından zorunlu bir gerekliliktir. Ayrıca, ambalaj ile gıda etkileŐimleri ve farklı koŐullar altında söz konusu maddelerin belirlenmesi, gıda kalitesi ve raf ömrünün korunması açısından da büyük önem taşımaktadır. Fitalat esterleri insan sağlığı üzerine yaygın sağlık etkilerinden dolayı tüketiciler arasında endişe kaynağı oluŐurmaktadır. Bu kimyasal moleküller gıdalara üretim prosesinde kullanılan polimer bazlı ekipmalar ve gıda ambalajlarından geçebilmektedir. Her ne kadar yapılan araştırmalar fitalat esterlerinin düşük seviyelerde geçiş yaptığı göstersede vücuttaki biyobirikimleri risk teŐkil edebilir. Bu nedenlerden dolayı plastik bazlı ambalaj materyalleri ile ambalajlanan gıdaların spesifik migrasyon limitleri açısından düzenli kontrol edilmesi gerektiği tavsiye edilmektedir.



#### 4. Kaynaklar

- Abtahi, M., Dobaradaran, S., Torabbeigi, M., Jorfi, S., Gholamnia, R., Koolivand, A., Darabi, H., Kavousi, A., Saeedi, R., 2019. Health risk of phthalates in water environment: Occurrence in water resources, bottled water, and tap water, and burden of disease from exposure through drinking water in tehran, Iran. *Environ. Res.* 173, 469–479. <https://doi.org/10.1016/J.ENV-RES.2019.03.071>
- Adenuga, A.A., Ayinuola, O., Adejuyigbe, E.A., Ogunfowokan, A.O., 2020. Bio-monitoring of phthalate esters in breast-milk and urine samples as biomarkers for neonates' exposure, using modified quechers method with agricultural biochar as dispersive solid-phase extraction absorbent. *Microchem. J.* 152, 104277. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2019.104277>
- Arfaeinia, L., Dobaradaran, S., Nasrzadeh, F., Shamsi, S., Poureshgh, Y., Arfaeinia, H., 2020. Phthalate acid esters (PAEs) in highly acidic juice packaged in polyethylene terephthalate (PET) container: Occurrence, migration and estrogenic activity-associated risk assessment. *Microchem. J.* 155, 104719. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2020.104719>
- Bang, D.Y., Kyung, M., Kim, M.J., Jung, B.Y., Cho, M.C., Choi, S.M., Kim, Y.W., Lim, S.K., Lim, D.S., Won, A.J., Kwack, S.J., Lee, Y., Kim, H.S., Lee, B.M., 2012. Human Risk Assessment of Endocrine-Disrupting Chemicals Derived from Plastic Food Containers. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 11, 453–470. <https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2012.00197.X>
- Becerra-Herrera, M., Arismendi, D., Molina-Balmaceda, A., Uslar, J., Manzo, V., Richter, P., Caraballo, M.A., 2022. Initial phthalates fingerprint and hydrochemical signature as key factors controlling phthalates concentration trends in PET-bottled waters during long storage times. *Food Chem.* 372, 131248. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131248>
- Biscardi, D., Monarca, S., De Fusco, R., Senatore, F., Poli, P., Buschini, A., Rossi, C., Zani, C., 2003. Evaluation of the migration of mutagens/carcinogens from PET bottles into mineral water by Tradescantia/micronuclei test, Comet assay on leukocytes and GC/MS. *Sci. Total Environ.* 302, 101–108. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00349-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00349-2)
- Bošnić, J., Puntarić, D., Škes, I., Klarić, M., Šimić, S., Zorić, I., 2003. Migration of Phthalates from Plastic Products to Model Solutions. *Coll. Antropol.* 27, 23–30.
- Bradley, E.L., Burden, R.A., Leon, I., Mortimer, D.N., Speck, D.R., Castle, L., 2013. Determination of phthalate diesters in foods. *Food Addit. Contam. - Part A* 30, 722–734. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.781683>
- Buckley, J.P., Quirós-Alcalá, L., Teitelbaum, S.L., Calafat, A.M., Wolff, M.S., Engel, S.M., 2018. Associations of prenatal environmental phenol and phthalate biomarkers with respiratory and allergic diseases among children aged 6 and 7 years. *Environ. Int.* 115, 79–88. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.03.016>

- Carneado, S., Hernández-Nataren, E., López-Sánchez, J.F., Sahuquillo, A., 2014. Migration of antimony from polyethylene terephthalate used in mineral water bottles. *Food Chem.* 166, 544–550. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.041>
- Chen, X., Xu, S., Tan, T., Lee, S.T., Cheng, S.H., Lee, F.W.F., Xu, S.J.L., Ho, K.C., 2014. Toxicity and Estrogenic Endocrine Disrupting Activity of Phthalates and Their Mixtures. *Int. J. Environ. Res. Public Heal.* 2014, Vol. 11, Pages 3156–3168. <https://doi.org/10.3390/IJERPH110303156>
- Cheshmazar, E., Arfaeina, L., Vasseghian, Y., Ramavandi, B., Moradi, M., Hashemi, S.E., Asgari, E., Arfaeina, H., Dragoi, E.N., Mousavi Khaneghah, A., 2021. Phthalate acid esters in pickled vegetables packaged in polyethylene terephthalate container: Occurrence, migration, and estrogenic activity-associated risk assessment. *J. Food Compos. Anal.* 99, 103880. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103880>
- Di Bella, G., Potorti, A.G., Lo Turco, V., Saitta, M., Dugo, G., 2014. Plasticizer residues by HRGC-MS in espresso coffees from capsules, pods and moka pots. *Food Control* 41, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.01.026>
- Dualde, P., Leon, N., Pardo, O., Coscollà, C., Vento, M., Pastor, A., Yusà, V., 2020. Risk assessment of exposure to phthalates in breastfeeding women using human biomonitoring. *Chemosphere* 255, 127003. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127003>
- Fasano, E., Bono-Blay, F., Cirillo, T., Montuori, P., Lacorte, S., 2012. Migration of phthalates, alkylphenols, bisphenol A and di(2-ethylhexyl)adipate from food packaging. *Food Control* 27, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.03.005>
- Fierens, T., Servaes, K., Van Holderbeke, M., Geerts, L., De Henauw, S., Sioen, I., Vanermen, G., 2012a. Analysis of phthalates in food products and packaging materials sold on the Belgian market. *Food Chem. Toxicol.* 50, 2575–2583. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2012.04.029>
- Fierens, T., Vanermen, G., Van Holderbeke, M., De Henauw, S., Sioen, I., 2012b. Effect of cooking at home on the levels of eight phthalates in foods. *Food Chem. Toxicol.* 50, 4428–4435. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.09.004>
- Gao, D.W., Wen, Z.D., 2016. Phthalate esters in the environment: A critical review of their occurrence, biodegradation, and removal during wastewater treatment processes. *Sci. Total Environ.* 541, 986–1001. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.09.148>
- García Ibarra, V., Sendón, R., García-Fonte, X.X., Paseiro Losada, P., Rodríguez Bernaldo de Quirós, A., 2019. Migration studies of butylated hydroxytoluene, tributyl acetylcitrate and dibutyl phthalate into food simulants. *J. Sci. Food Agric.* 99, 1586–1595. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9337>
- Ge, W.P., Yang, X.J., Wu, X.Y., Wang, Z., Geng, W., Guo, C.F., 2016. Phthalate

residue in goat milk-based infant formulas manufactured in China. *J. Dairy Sci.* 99, 7776–7781. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11061>

- González-Mariño, I., Ares, L., Montes, R., Rodil, R., Cela, R., López-García, E., Postigo, C., López de Alda, M., Pocurull, E., Marcé, R.M., Bijlsma, L., Hernández, F., Picó, Y., Andreu, V., Rico, A., Valcárcel, Y., Miró, M., Etxebarria, N., Quintana, J.B., 2021. Assessing population exposure to phthalate plasticizers in thirteen Spanish cities through the analysis of wastewater. *J. Hazard. Mater.* 401, 123272. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123272>
- Guart, A., Bono-Blay, F., Borrell, A., Lacorte, S., 2014. Effect of bottling and storage on the migration of plastic constituents in Spanish bottled waters. *Food Chem.* 156, 73–80. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.01.075>
- Guo, Y., Kannan, K., 2012. Challenges encountered in the analysis of phthalate esters in foodstuffs and other biological matrices. *Anal. Bioanal. Chem.* 404, 2539–2554. <https://doi.org/10.1007/S00216-012-5999-2>
- Guo, Y., Kannan, K., 2011. Comparative assessment of human exposure to phthalate esters from house dust in China and the United States. *Environ. Sci. Technol.* 45, 3788–3794. <https://doi.org/10.1021/ES2002106>
- Herrero, L., Quintanilla-López, J.E., Fernández, M.A., Gómara, B., 2021. Plasticizers and preservatives in commercial milk products: A comprehensive study on packages used in the Spanish market. *Food Chem.* 338, 128031. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.128031>
- Jeddi, M.Z., Rastkari, N., Ahmadkhaniha, R., Yunesian, M., 2015. Concentrations of phthalates in bottled water under common storage conditions: Do they pose a health risk to children? *Food Res. Int.* 69, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.057>
- Jones, B., Han, T.L., Delplancke, T., McKenzie, E.J., De Seymour, J. V., Chua, M.C., Tan, K.H., Baker, P.N., 2018. Association between maternal exposure to phthalates and lower language ability in offspring derived from hair metabolome analysis. *Sci. Rep.* 8. <https://doi.org/10.1038/S41598-018-24936-5>
- Jurewicz, J., Hanke, W., 2011. Exposure to phthalates: reproductive outcome and children health. A review of epidemiological studies. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 24, 115–141. <https://doi.org/10.2478/S13382-011-0022-2>
- Keresztes, S., Tatár, E., Czégény, Z., Zárny, G., Mihucz, V.G., 2013. Study on the leaching of phthalates from polyethylene terephthalate bottles into mineral water. *Sci. Total Environ.* 458–460, 451–458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.056>
- Kim, K.N., Lee, M.R., Choi, Y.H., Lee, B.E., Hong, Y.C., 2018. Association between phthalate exposure and lower lung function in an urban elderly population: A repeated-measures longitudinal study. *Environ. Int.* 113, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.004>

- Li, B., Wang, Z.W., Bai, Y.H., 2019. Determination of the partition and diffusion coefficients of five chemical additives from polyethylene terephthalate material in contact with food simulants. *Food Packag. Shelf Life* 21, 100332. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100332>
- Li, C., Xu, J., Chen, D., Xiao, Y., 2016. Detection of phthalates migration from disposable tablewares to drinking water using hexafluoroisopropanol-induced cationic surfactant cocervate extraction. *J. Pharm. Anal.* 6, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2016.04.002>
- Li, H., Li, C., An, L., Deng, C., Su, H., Wang, L., Jiang, Z., Zhou, J., Wang, J., Zhang, C., Jin, F., 2019. Phthalate esters in bottled drinking water and their human exposure in Beijing, China. *Food Addit. Contam. Part B Surveill.* 12, 1–9. <https://doi.org/10.1080/19393210.2018.1495272>
- Li, X., Zeng, Z., Chen, Y., Xu, Y., 2004. Determination of phthalate acid esters plasticizers in plastic by ultrasonic solvent extraction combined with solid-phase microextraction using calix[4]arene fiber. *Talanta* 63, 1013–1019. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.01.006>
- Li, X., Zhang, W., Lv, J., Liu, W., Sun, S., Guo, C., Xu, J., 2021. Distribution, source apportionment, and health risk assessment of phthalate esters in indoor dust samples across China. *Environ. Sci. Eur.* 33, 1–14. <https://doi.org/10.1186/S12302-021-00457-3/FIGURES/8>
- Luo, Q., Liu, Z. hua, Yin, H., Dang, Z., Wu, P. xiao, Zhu, N. wu, Lin, Z., Liu, Y., 2018. Migration and potential risk of trace phthalates in bottled water: A global situation. *Water Res.* <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>
- Mei, H., Deng, L., Xie, J., Li, X., Wu, N., Hu, L., Huang, G., Mo, F., Chen, D., Xiao, H., Yang, P., 2023. Co-exposure to phenols and phthalates during pregnancy with the difference of body size in twins at one month old. *Chemosphere* 311, 136991. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136991>
- Montuori, P., Jover, E., Morgantini, M., Bayona, J.M., Triassi, M., 2008. Assessing human exposure to phthalic acid and phthalate esters from mineral water stored in polyethylene terephthalate and glass bottles. *Food Addit. Contam. Part A. Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.* 25, 511–8. <https://doi.org/10.1080/02652030701551800>
- Notardonato, I., Protano, C., Vitali, M., Bhattacharya, B., Avino, P., 2019. A method validation for simultaneous determination of phthalates and bisphenol a released from plastic water containers. *Appl. Sci.* 9, 1–15. <https://doi.org/10.3390/app9142945>
- Okpara, K.E., Phoungthong, K., Agbozu, I., Edwin-Isotu, E., Techato, K., 2022. Phthalate esters in tap water, southern Thailand: daily exposure and cumulative health risk in infants, lactating mothers, pregnant and nonpregnant women. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19, 2187. <https://doi.org/10.3390/IJERPH19042187>
- Otero, P., Saha, S.K., Moane, S., Barron, J., Clancy, G., Murray, P., 2015. Impro-

- ved method for rapid detection of phthalates in bottled water by gas chromatography–mass spectrometry. *J. Chromatogr. B* 997, 229–235. <https://doi.org/10.1016/J.JCHROMB.2015.05.036>
- Pang, X., Skillen, N., Gunaratne, N., Rooney, D.W., Robertson, P.K.J., 2021. Removal of phthalates from aqueous solution by semiconductor photocatalysis: A review. *J. Hazard. Mater.* 402, 123461. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.123461>
- Petersen, J.H., Breindahl, T., 2000. Plasticizers in total diet samples, baby food and infant formulae. *Food Addit. Contam.* 17, 133–141. <https://doi.org/10.1080/026520300283487>
- Pourzamani, H., Keshavarz, M., Moazeni, M., Heidari, Z., Zarean, M., 2020. Effect of common storage condition on the release of phthalate contaminants of bottled water in polyethylene terephthalate: A chemical analysis and human health risk assessment. *Int. J. Environ. Health Eng.* 9, 1–9. [https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe\\_8\\_20](https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_8_20)
- Robertson, G.L., 2013. *Food Packaging: Principles and Practice*, 3rd editio. ed. CRC Press, England.
- Salazar-Beltrán, D., Hinojosa-Reyes, L., Ruiz-Ruiz, E., Hernández-Ramírez, A., Luis Guzmán-Mar, J., 2017. Determination of phthalates in bottled water by automated on-line solid phase extraction coupled to liquid chromatography with uv detection. *Talanta* 168, 291–297. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2017.03.060>
- SCENIHR, 2016. The safety of medical devices containing DEHP plasticized PVC or other plasticizers on neonates and other groups possibly at risk. <https://doi.org/10.2772/45179>
- Szendi, K., Gyöngyi, Z., Kontár, Z., Gerencsér, G., Berényi, K., Hanzel, A., Fekete, J., Kovács, A., Varga, C., 2018. Mutagenicity and phthalate level of bottled water under different storage conditions. *Expo. Heal.* 10, 51–60. <https://doi.org/10.1007/s12403-017-0246-x>
- Ustun, I., Sungur, S., Okur, R., Sumbul, A.T., Oktar, S., Yilmaz, N., Gokce, C., 2015. Determination of Phthalates Migrating from Plastic Containers into Beverages. *Food Anal. Methods* 8, 222–228. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9896-5>
- Wu, M.T., Wu, C.F., Wu, J.R., Chen, B.H., Chen, E.K., Chao, M.C., Liu, C.K., Ho, C.K., 2012. The public health threat of phthalate-tainted foodstuffs in Taiwan: The policies the government implemented and the lessons we learned. *Environ. Int.* 44, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.01.014>





## BÖLÜM 4

### BATI KARADENİZ HAVZASI'NDA YER ALAN İLLERİN KÖPPEN-TREWARTHA YÖNTEMİNE DAYALI İKLİM SINIF TÜRÜNÜN TESPİTİ

*Berna AKSOY<sup>1</sup>, Rukiye UZUN ARSLAN<sup>2</sup>*

---

1 Dr. Öğr. Üyesi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: berna.oaksoy@beun.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-6925-1594

2 Doç. Dr., Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, e-mail: rukiyeuzun67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2082-8695

Canlıların yaşam sürekliliğini dolaylı veya dolaysız (doğrudan) yoldan etkileyen iklim, yeryüzünde belirli bir bölgenin meteorolojik hava şartlarının (sıcaklık, nem, hava basıncı, rüzgâr, yağış gibi) uzun bir süre boyunca gözlemlenmesi olarak tanımlanmaktadır (Türkeş 2010). Bu gözlemler istasyon ölçümleri, uydu ölçümleri ve model çıktısı veri kümeleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Dursun ve Yazıcı, 2022).

Dünya genelinde görülen iklim tiplerinin sayısının fazla olması nedeniyle, farklı bilim insanları farklı iklim sınıflandırmaları yapmıştır. Yapılan sınıflandırmalar neticesinde iklim tipleri belirlenebilmekte, benzer ve farklı olanların sınırları açıkça ortaya konulabilmektedir (Yeşilnacar, Yazgan ve Gerger, 1998; Öztürk, Çetinkaya ve Aydın, 2017). Bu nedenle iklim sınıflandırması, klimatoloji biliminde en çok araştırılan konulardan biri olmuştur. Yeryüzünde herhangi bir coğrafi bölgeden fayda sağlanabilmesi hususu, büyük ölçüde o bölgenin iklimsel özellikleriyle ilişkilendirilmektedir (Erinç 1984). Bu nedenle iklim sınıflandırılması çalışmaları hem bilimsel hem de uygulama açısından büyük önem arz etmektedir.

Dünya genelinde iklim, 1900'li yılların başlarında Alman klimatolog Wladimir Köppen tarafından kantitatif olarak ilk kez sınıflandırılmıştır (Kotteck, Grieser, Beck, Rudolf ve Rubel, 2006). Köppen yönteminde aylık, yıllık sıcaklık ve yağış verileri göz önünde tutularak, iklim tipleri ekvatorдан bölgesinden kutup bölgesine doğru A (tropikal), B (kuru), C (ılıman), D (kıtasa) ve E (kutupsal) olmak üzere beş ana gruba ayrılmıştır. Köppen yöntemi, zaman içerisinde modifikasyona uğrayarak birçok farklı sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir (Belda, Holtanová, Halenka, ve Kalvová, 2014; Köppen, 1918).

Köppen-Trewartha yöntemi bunlardan biri olup, çalışma kapsamında da bu yöntemden yararlanılmıştır. Köppen-Trewartha yönteminde A (Tropikal İklim), B (Kurak İklim), C (Subtropikal İklim), D (İlman İklim), E (Kuzey İklimi) ve F (Kutup İklimi) olmak üzere 6 farklı ana iklim grubu tanımlanmaktadır. Trewartha (1968) A, C, D, E ve F iklim gruplarını temel termal bölgeler olmak üzere, B iklim grubunu ise kutup iklimi hariç diğer tüm iklim gruplarıyla kesişen kuru iklim kuşağı olarak tanımlamıştır (Tablo 1). Böylelikle kurak ve nemli iklim bölgelerinin sınıflandırılması daha ayrıntılı yapılabilmektedir. Bu yöntem B grubunu kuraklık açısından alt sınıflara ayırması nedeniyle Köppen yönteminden ayrılmaktadır ("Köppen-Trewartha İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi", 2023).

Köppen-Trewartha yönteminde ana iklim türleri belirli bir bölgede uzun bir süre periyodunda gözlemlenen sıcaklık ve yağış miktarlarının yıllık ortalaması alınarak tespit edilmektedir (Trewartha 1968). Bu yöntemde C, D ve E tipi iklim grupları yeniden tanımlanmış, ayrıca nemli ve kurak iklimleri ayırt etmek için eşik değerleri yeniden belirlenmiştir ("Köp-



pen-Trewartha İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi”, 2023). Tablo 1’de Köppen-Trewartha iklim sınıflandırmasına göre küresel iklim sınıfları ve kuralları verilmiştir.

Köppen-Trewartha iklim sınıflandırma yönteminde üçüncü ve dördüncü harfler yaz ve kış aylarına ait bilgiler içermektedir. Buna dayanarak en sıcak ve en soğuk ayların ortalama sıcaklıklarına göre Tablo 2’den çıkarılan iklim özellikleri açıklama olarak verilmektedir (“Köppen-Trewartha İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi”, 2023).

Bu çalışmada; Köppen-Trewartha yönteminden yararlanılarak Batı Karadeniz Havzası’nda yer alan illerin (Zonguldak, Bartın, Kastamonu, Sinop, Karabük, Düzce, Çankırı, Bolu, Ankara, Sakarya, Samsun) iklim tipi araştırılmıştır. Bu bağlamda Meteoroloji, Genel Müdürlüğü’nden (MGM) temin edilen uzun yıllar aylık, sıcaklık ve yağış verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre havzada bulunan istasyonların iklim sınıfı belirlenmiştir.

**Tablo 1.** Köppen-Trewartha iklim sınıflandırması ve bunlara ait kurallar (“Köppen-Trewartha İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi”, 2023).

Sınıf	Tür	Tanım	Kurallar
A		Tropikal İklimler	Tsoğuk $\geq 18^{\circ}\text{C}$
	Ar	Tropikal, Yağmur Ormanı İklimi	10 veya 12 ay yağışlı. 0 ile 2 ay Kurak.
	Aw	Tropikal Savan İklimi	Kış ayları 2 veya daha fazla ay Kurak
	As	Tropikal Savan İklimi	Yaz ayları kurak. (Nadir görülür)
B		Kurak İklimler	P limit değerden küçükse(R) $R=2.3 * T - 0.64 * P_w + 41$ R: Limit değer; T:Yıllık Ortalama Sıcaklık; Pw : Kış aylarında meydana gelen yıllık yağış yüzdesi.
	BS	Yarı Kurak-Step İklim	P Limitin yarısından büyükse
	BW	Kurak veya Çöl İklimi	P Limitin yarısına eşit veya küçükse
C		Subtropikal İklimler	8 ile 12 ay $> 10^{\circ}\text{C}$ ve Tsoğuk $< 18^{\circ}\text{C}$
	Cs	Subtropikal kuru yaz iklimi, Akdeniz iklimi	8 ile 12 ay $> 10^{\circ}\text{C}$ ve $P \leq 89 \text{ cm}$ ve $P_{\text{min}} < 3 \text{ cm}$ ve $P_{\text{min}} < P_{\text{max}} / 3$
	Cw	Subtropikal kuru kış iklim.	8 ile 12 ay $> 10^{\circ}\text{C}$ ve $P \leq 89 \text{ cm}$ ve $P_{\text{max}} > P_{\text{min}} * 10$
	Cf	Subtropikal nemli iklim.	$P_{\text{min}} > 3 \text{ cm}$
D		Ilıman İklimler	4 ile 7 ay $> 10^{\circ}\text{C}$
	Do	Ilıman Denizsel	Tsoğuk $\geq 2^{\circ}\text{C}$
	Dc	Ilıman Karasal	Tsoğuk $< 2^{\circ}\text{C}$
E		Kuzey İklimleri	1 ile 3 ay $> 10^{\circ}\text{C}$
	Eo	Kutup altı Denizsel İklim	Tsoğuk $> -10^{\circ}\text{C}$
	Ec	Kutup altı Karasal İklim	Tsoğuk $\leq -10^{\circ}\text{C}$

F		Kutup İklimleri	Tüm aylar $< 10^{\circ}\text{C}$
	Ft	Tundra İklimi	Tsıcak $> 0^{\circ}\text{C}$
	Fi	Buz İklimi	Tsıcak $\leq 0^{\circ}\text{C}$

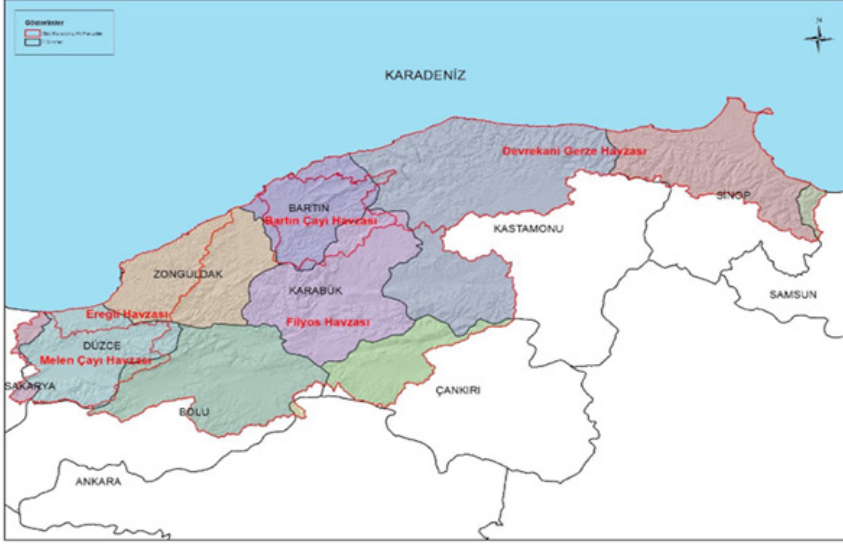
**Tablo Açıklaması:** T: Yıllık Ortalama Sıcaklık, P: Yıllık Toplam Yağış, R: Limit Değer, Tsoğuk: En soğuk ay Ort.Sıc. Tsıcak: En sıcak ay Ort.Sıc. Ps (Yaz Ayları): Nisan-Eylül 6 ay, Pw (Kış Ayları): Ekim-Mart 6 ay, Psmın: Yaz aylarındaki en düşük yağış, Pwmin: Kış aylarındaki en düşük yağış, Psmax: Yaz aylarındaki en yüksek yağış, Pwmax: Kış aylarındaki en yüksek yağış, Pmin: En kurak ay yağışı

**Tablo 2.** Köppen-Trewartha iklim sınıflandırmasına göre tanımlanan evrensel sıcaklık ölçekleri ve iklim özellikleri (“Köppen-Trewartha İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi”, 2023).

İndeks	İklim Özelliği	Aylık Ortalama Sıcaklık Değeri
i	Şiddetli Sıcak	$\geq 35^{\circ}\text{C}$
h	Çok Sıcak	$28^{\circ}\text{C}$ ila $34.9^{\circ}\text{C}$
a	Sıcak	$23^{\circ}\text{C}$ ila $27.9^{\circ}\text{C}$
b	Ilık	$18^{\circ}\text{C}$ ila $22.9^{\circ}\text{C}$
l	Ilıman	$10^{\circ}\text{C}$ ila $17.9^{\circ}\text{C}$
k	Serin	$0.1^{\circ}\text{C}$ ila $9.9^{\circ}\text{C}$
o	Soğuk	$-9.9^{\circ}\text{C}$ ila $0^{\circ}\text{C}$
c	Çok Soğuk	$-24.9^{\circ}\text{C}$ ila $-10^{\circ}\text{C}$
d	Şiddetli Soğuk	$39.9^{\circ}\text{C}$ ila $-25^{\circ}\text{C}$
e	Aşırı Soğuk	$\leq -40^{\circ}\text{C}$

## 2. Materyal ve metot

Çalışma alanı olan Batı Karadeniz Havzası Türkiye’deki 25 havzadan biri olup, Sakarya Havzası, Kızılırmak Havzası ve Karadeniz arasında yer almaktadır (Şekil 1). Havza içerisinde Ankara, Bartın, Bolu, Çankırı, Düzce, Karabük, Kastamonu, Sakarya, Samsun, Sinop ve Zonguldak illeri bulunmaktadır. Yüzölçümü açısından ise Türkiye’nin yaklaşık %3,7’sini kaplayan havzanın sahip olduğu yağış alanı  $28.855 \text{ km}^2$ ’dir (“Batı Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planları”, 2023).



**Şekil 1.** Batı Karadeniz Havzası (“Batı Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planları Yönetici Özeti”, 2023).

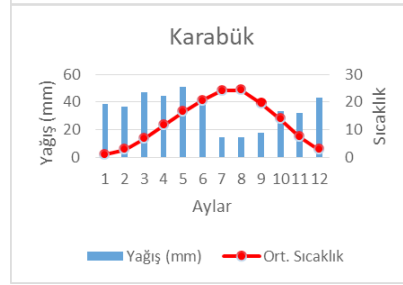
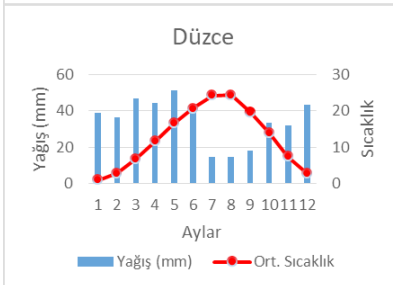
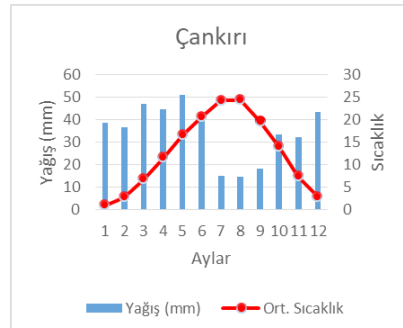
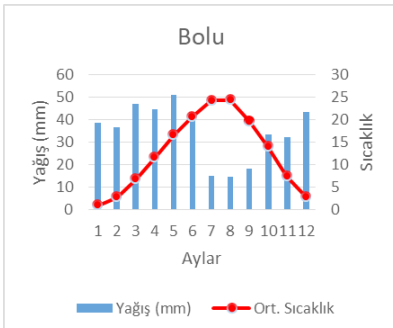
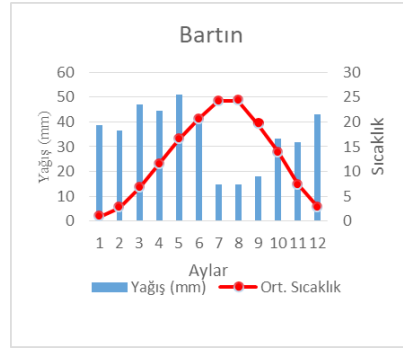
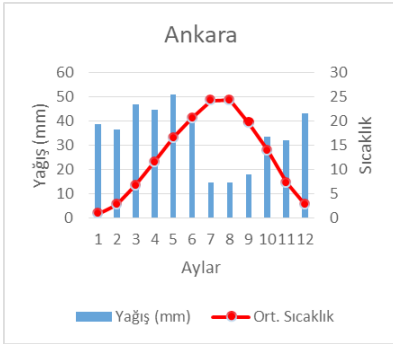
Çalışmada, Batı Karadeniz Havzası içerisinde bulunan illerin aylık ve yıllık sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak havzanın iklim sınıfı tespiti gerçekleştirilmiştir. İllere ait koordinatlar Tablo 3’te verilmiştir (“İstasyon Bilgileri Veritabanı”, 2023).

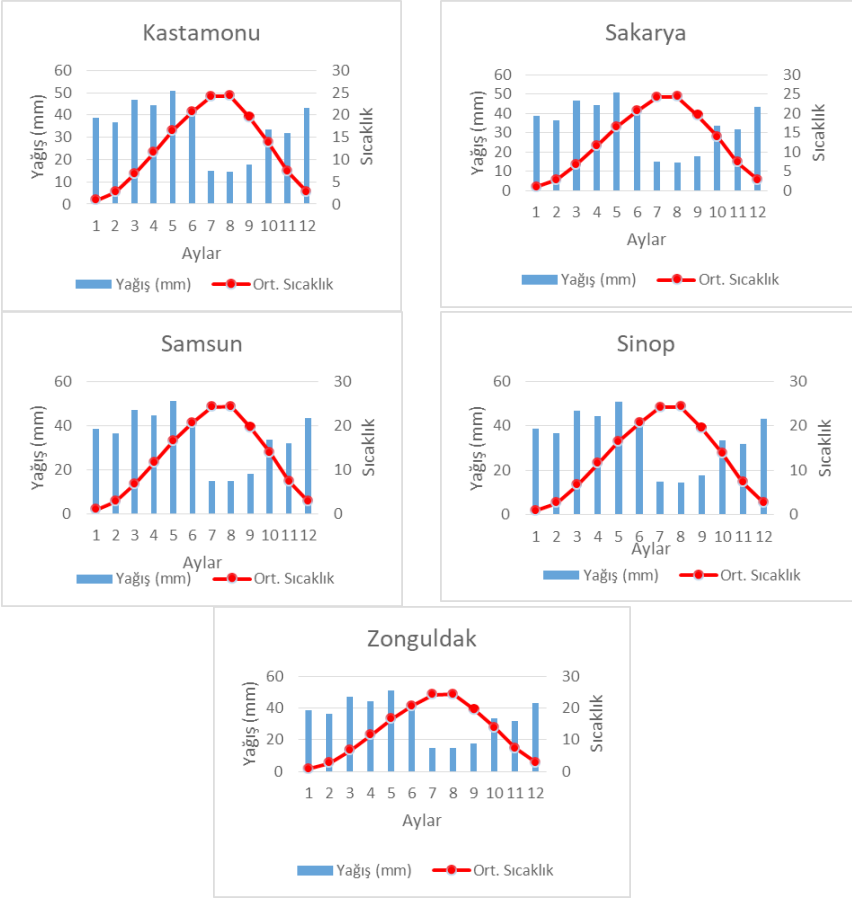
**Tablo 3.** Çalışmada havzasında yer alan istasyonların rakım, enlem ve boylamları (“İstasyon Bilgileri Veritabanı”, 2023)

İstasyon No	İstasyon Adı	Rakım (m)	Enlem (K)	Boylam (D)
17130	Ankara	938	39,9272	32,8644
17080	Çankırı	730	40,6	33,6167
17072	Düzce	160	40,8417	31,1605
17026	Sinop	28	42,0284	35,1528
17030	Samsun	44	41,2903	36,3336
17069	Sakarya	29	40,7793	30,4013
17022	Zonguldak	134	41,4564	31,7986
17077	Karabük	266	41,1947	32,6189
17074	Kastamonu	800	41,3764	33,7764
17020	Bartın	27	41,6344	32,3375
17070	Bolu	726	40,733	31,6

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında Batı Karadeniz Havza'sının MGM' den alınan uzun yıllar ortalama sıcaklık ve toplam yağış verileri kullanılarak, havza-daki her bir istasyonun iklim diyagramları elde edilmiştir (Şekil 2). Elde edilen iklim diyagramları aracılığıyla havzadaki istasyonların iklim türleri tespit edilmiştir.





Şekil 2. Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan istasyonların iklim diyagramları.

Şekilden açıkça görüldüğü gibi, havza genelinde yağış olmayan ay yoktur. Kış aylarında fazla olan yağış miktarının yaz aylarına doğru azaldığı görülmüştür. Minimum düzeye yaz aylarında (yaklaşık Temmuz sonlarında) ulaştığı saptanmıştır. Sıcaklık bakımından ise havza genelinde tipik bir sıcaklık dağılışı bulunmaktadır. Sıcaklığın en yüksek olduğu ay ile yağışın minimum olduğu ayların çakışmadığı saptanmıştır.

Köppen-Trewartha iklim sınıflandırma yönteminden yararlanarak havza genelinde yer alan illere ait iklim türleri irdelendiğinde üç farklı iklim türünün olduğu tespit edilmiştir. Buna göre Ankara, Bolu, Çankırı ve Kastamonu illerinin ılıman karasal; Düzce ve Karabük illerinin ılıman denizsel; Sakarya, Samsun, Sinop ve Zonguldak illerinin ise subtropikal iklim özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu iklim türlerinin hesaplanmasında izlenmesi gereken adımlar her bir iklim türü için birer örnek istasyon üzerinden ayrıntılı olarak aşağıda verilmiştir. Söz konusu hesaplama-

larda her bir istasyon için MGM'den alınan uzun yıllar ortalama yağış ve sıcaklık verileri kullanılmıştır.

“Subtropikal iklim” türüne sahip Zonguldak istasyonuna ait Tablo 4’deki veriler kullanılarak, birinci adımda söz konusu ilin Tablo 1’de belirtilen “A” sınıfı iklim türünde yer alıp almadığı kontrol edilmiştir. Buna göre en soğuk ayın ortalama sıcaklık değerinin  $18^{\circ}\text{C}$ ’in altında olması nedeniyle “A” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır. İkinci adımda Tablo 1’e belirtilen “R” limit değeri göz önünde bulundurularak, “B” sınıfı iklim türüne uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Buna göre kış aylarında meydana gelen yıllık yağış yüzdesinden (Pw) hesaplanan “R” limit değerinin toplam yıllık yağış miktarından (P) az olup olmadığına bakılmıştır. Kış ayları yıllık yağış toplamı 76,18 cm, bu aylarda oluşan yıllık yağış yüzdesi  $Pw=61,5$  ve  $R=33,84$  cm olarak hesaplanmıştır. Buna göre Tablo 1’de verilen “P limit değerden küçükse (R)” kuralına istinaden Zonguldak istasyonu “B” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır.

**Tablo 4.** Zonguldak istasyonuna ait uzun yıllar yağış ve sıcaklık değerleri

Zonguldak İstasyonu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
Ort. Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	6.3	6.4	8.1	11.5	15.7	19.9	22.4	22.7	19.5	15.7	11.7	8.3	14.0
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (mm)	127.7	93.9	96.4	57.1	59.5	83.0	69.7	81.6	125.9	147.5	134.5	161.8	1238.6

Üçüncü adımda Tablo 1’de belirtilen kurala göre “C” sınıfı iklim türünde yer alıp almadığı kontrol edilmiştir. Buna göre Zonguldak istasyonu için 8 ile 12 ay ortalama sıcaklık  $10^{\circ}\text{C}$ ’nin üstünde ve en soğuk ayın sıcaklığının da  $18^{\circ}\text{C}$  den altında olduğu görülmüştür. Buna göre Zonguldak istasyonu “C” sınıfı iklim türünde yer aldığı tespit edilmiştir. Dördüncü adımda Tablo 1’e göre tespit edilen “C” iklim sınıfına ait alt sınıf türü belirlenmiştir. En kurak aya ait yağış miktarı ( $P_{min}=6,97$  cm) değerinin 3 cm’den fazla olması nedeniyle Zonguldak istasyonu “Cf” “Subtropikal nemli” iklim türüne girmektedir. Beşinci adımda Tablo 1’e göre belirlenen iklim sınıfı türü ve bu iklim türüne ait alt sınıf belirlendikten sonra yaz ve kış aylarına ait bilgiler Tablo 2’den alınan iklim özelliklerine istinaden tespit edilmiştir. Buna göre en yüksek sıcaklık  $24,0^{\circ}\text{C}$  ile “b” “ılık”, en düşük sıcaklık  $6,3^{\circ}\text{C}$  değeriyle “k” “serin” olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak örnek olarak verilen Zonguldak istasyonu Köppen-Trewartha iklim sınıflandırmasına göre “C”(Subtropikal İklimler), “f”(Subtropikal nemli iklim), “b”(ılık), “k”(serin) olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Samsun, Sinop ve Sakarya istasyonlarında aynı adımlar izlenerek benzer sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 5.** Ankara istasyonuna ait uzun yıllar yağış ve sıcaklık değerleri

Ankara İstasyonu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
Ort.Sıcaklık (°C)	0.9	2.7	6.7	11.5	16.5	20.6	24.2	24.3	19.6	13.9	7.3	2.8	12.6
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (mm)	38.6	36.6	46.9	44.5	51.0	40.2	14.8	14.6	17.9	33.4	31.9	43.2	413.6

“İlman Karasal iklim” türüne sahip Ankara istasyonuna ait Tablo 5’deki veriler kullanılarak, birinci adımda ilk olarak “A” sınıfı iklim türüne girip girmediğine bakılmıştır. En soğuk ayın ortalama sıcaklık değerinin 18 °C’in altında olması nedeniyle “A” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır. İkinci adımda “B” sınıfı iklim türüne uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Toplam yıllık yağış miktarı ( $P=41.36\text{cm}$ )> limit değer ( $R=34.3\text{cm}$ ) olduğundan Ankara istasyonunun “B” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır. Üçüncü adımda “C” sınıfı iklim türünde yer alıp almadığına bakılmıştır. Buna göre Tablo 1’de verilen kurallara istinaden Ankara istasyonunda ortalama sıcaklık 7 ay 10°C’nin üstündedir. Dolayısıyla “C” sınıfı iklim türünde yer almamaktadır. Dördüncü adımda “D” sınıfı iklim türünde yer alıp almadığı kontrol edildiğinde Ankara istasyonunda ortalama sıcaklık 7 ay 10°C’nin üstündedir. Buna göre Ankara istasyonu “D” sınıfı iklim türünde sahiptir. Beşinci adımda “D” iklim sınıfına ait alt sınıf türü belirlenmiştir. Burada en soğuk aya ait sıcaklık değerinin 2°C’den daha düşük olmasından dolayı istasyonun iklim sınıfı “De” (İlman Karasal) olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde Bolu, Çankırı ve Kastamonu istasyonlarının da aynı iklim türüne sahip olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra istasyonların yaz ve kış aylarına ilişkin bilgileri Tablo 2’ye göre Ankara istasyonu için “a”(sıcak), “k” (serin); Bolu istasyonu için “b”(ılık), “k” (serin); Çankırı istasyonu için “a”(sıcak), “o” (soğuk) ve Kastamonu istasyonu için “b”(ılık), “o” (soğuk) olarak belirlenmiştir.

“İlman Denizsel iklim” türüne sahip Düzce istasyonuna ait Tablo 6’daki veriler kullanılarak, birinci adıma göre “A” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır. İkinci adımda toplam yıllık yağış miktarının ( $P=82,29\text{ cm}$ ) limit değerden ( $R=34.87\text{ cm}$ ) fazla olmasından dolayı Düzce istasyonunun “B” sınıfı iklim türüne uygun olmadığı saptanmıştır. Üçüncü adımda ortalama sıcaklığın 10°C’nin üzerinde 7 ay olması nedeniyle “C” sınıfı iklim türünde yer almadığı saptanmıştır. Dördüncü adımda Tablo 1’de verilen kurallara istinaden Düzce istasyonunun “D” sınıfı iklim türündedir. Beşinci adımda “D” iklim sınıfına ait alt sınıf türünün “Do” (İlman Denizsel) olduğu tespit edilmiştir. Son olarak Tablo 2’ye göre Düzce istasyonunun yaz ve kış aylarına ait veriler ışığında “a”(sıcak), “k” (serin) iklim özellikleri sergilediği tespit edilmiştir. Karabük istasyonunun da iklim sınıfı türü, bu iklim türüne ait alt sınıfı ve iklim özelliklerinin benzer olduğu saptanmıştır.

**Tablo 6.** Düzce istasyonuna ait uzun yıllar yağış ve sıcaklık değerleri

Düzce İstasyonu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Yıllık
Ort. Sıcaklık (°C)	4.1	5.5	8.2	12.3	17.0	20.8	23.1	23.2	19.3	14.8	9.5	5.6	13.6
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (mm)	87.1	70.7	77.1	60.6	61.5	76.7	39.3	51.1	52.7	82.8	67.6	95.7	822.9

Batı Karadeniz Havzası'nda bulunan istasyonlar için Köppen-Trewartha iklim sınıflandırma yöntemine göre belirlenen iklim sınıfları türleri, bu iklim türüne ait alt sınıflar ve iklim özellikleri Tablo 7' de özetlenmiştir.

**Tablo 7.** Batı Karadeniz Havzası'nda bulunan istasyonların iklim sınıfları

İstasyon Adı	İklim Türü
Ankara	Yazları sıcak, Kışları serin, Ilıman Karasal
Bolu	Yazları ılık, Kışları serin, Ilıman Karasal
Çankırı	Yazları sıcak, Kışları soğuk, Ilıman Karasal
Düzce	Yazları sıcak, Kışları serin, Ilıman Denizsel
Karabük	Yazları sıcak, Kışları serin, Ilıman Denizsel
Kastamonu	Yazları ılık, Kışları soğuk, Ilıman Karasal
Sakarya	Yazları ılık, Kışları serin, Subtropikal Nemli
Samsun	Yazları ılık, Kışları serin, Subtropikal Nemli
Sinop	Yazları ılık, Kışları serin, Subtropikal Nemli
Zonguldak	Yazları ılık, Kışları serin, Subtropikal Nemli

#### 4. Sonuç

Batı Karadeniz Havzası'nda yer alan illerin iklim sınıflarını saptamak amacıyla yapılan bu çalışmada havza sınırları içerisinde yer alan 11 istasyona ait uzun yıllar aylık, sıcaklık ve yağış verileri kullanılarak Köppen-Trewartha iklim indisleri hesaplanmıştır. Buna göre yapılan hesaplamalar doğrultusunda Ankara istasyonu yazları sıcak, kışları serin, ılıman karasal; Bolu istasyonu yazları ılık, kışları serin, ılıman karasal; Çankırı istasyonu yazları sıcak, kışları soğuk, ılıman karasal; Kastamonu istasyonu yazları ılık, kışları soğuk, ılıman karasal; Düzce ve Karabük istasyonlarının yazları sıcak, kışları serin, ılıman denizsel; son olarak Zonguldak, Sakarya, Samsun ve Sinop istasyonlarının ise yazları ılık, kışları serin, subtropikal nemli iklim türüne ait oldukları tespit edilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında söz konusu havza için su bilançolarının da elde edilerek havzadaki su potansiyelinin analiz edilmesi plan-



lanmaktadır. Bunun nedeni depolanan ve kullanılacak olan su miktarları arasındaki denge durumunu değerlendirerek, havzada tarımdan sanayi sektörüne kadar birçok alandaki araştırmalara destek olmaktır.



Türkeş, M. (2010). *Klimatoloji ve Meteoroloji*. Yer: Kriter Yayınevi, İstanbul.

Yeşilnacar, M. İ., Yazgan, M. S. & Gerger, R. (1998). *GAP kapsamındaki illerin su bilançosu*. II. Ulusal Hidroloji Kongresi, İstanbul, Türkiye.





## BÖLÜM 5

### TERMİK SANTRALLERDE AKIŞKAN YATAK PROSESİ VE TÜRKİYE'DEKİ DURUMU

*Zehra ÇETINKAYA<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr., Çukurova Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı,  
ORCID ID: 0000-0002-0553-0102

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin hızla ilerlemesiyle birlikte enerji ihtiyacının artması, bir dizi sorunu da beraberinde getirmektedir. Azalan kaliteli enerji kaynakları, düşük kaliteli yakıtların kullanımı ve çevresel sorunlar gibi faktörler, bu sorunların başında gelmektedir. Ülkemizde kullanılan linyit, konvansiyonel sistemlerde zor yanma sorunlarına neden olan düşük ısısal kapasiteye, yüksek uçucu madde, yüksek kükürt içeriği ve yüksek kül oranına sahiptir. Düşük ısısal kapasite, linyitin yakılacağı tasarımlarda bazı zorluklar doğururken, yüksek uçucu madde oranı, ısı transferi seçimini etkileyerek atmosfere büyük miktarda  $SO_2$  salınımı ve çevre kirliliği riskini artırmaktadır. Yüksek kül oranı ise yanma verimini düşürerek yakma sürecinin tasarımını etkilemektedir.

Linyit rezervlerinin diğer enerji kaynaklarına göre önemli olması, bu kaynakların kullanılmasının zorunlu olduğunu göstermektedir. Ancak, linyit tüketiminin olumsuz etkilerini, yani  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  ve toz emisyonlarını en aza indiren yeni teknolojilerin devreye girmesiyle azaltmak mümkün olabilecektir (Rahim ve Gündüz, 2013).

Türkiye'nin enerji ihtiyaçları hızla artarken, çevre dostu ve verimli enerji üretim yöntemlerine olan talep de artmaktadır. Akışkan yatak teknolojisi, yüksek verimlilik, düşük emisyonlar ve çeşitli yakıtların kullanılabilmesi gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Akışkan yatak teknolojisinin uygulanması, yerel enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayarak enerji ithalatının da azaltılmasına yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

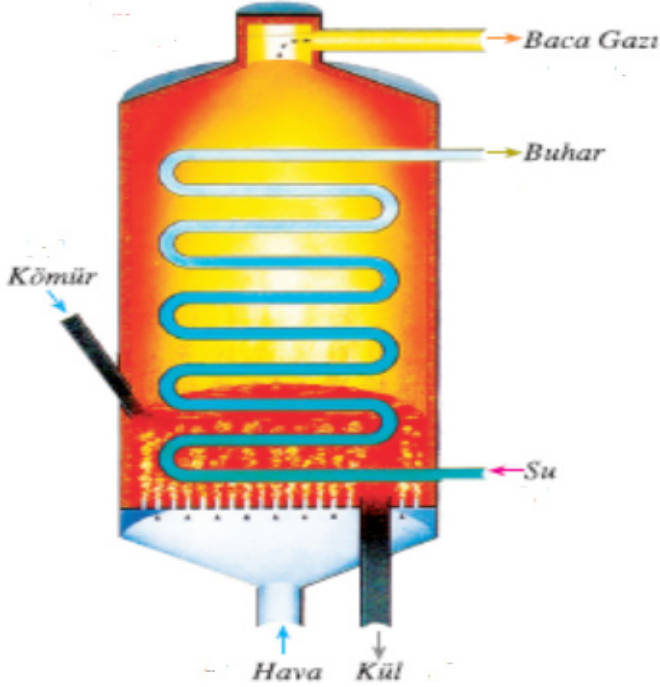
## 2. AKIŞKAN YATAK PROSESİ

Akışkan yataklı reaktörlerin kimya sanayinde çeşitli işlemlerde kullanımı, daha eski dönemlere dayanmasına rağmen kömür yakma kazanı olarak kullanımı 1970'li yıllardan sonra başlamıştır. Bu tarihten sonra akışkan yataklı yanma teknolojisi endüstriyel ölçekte buhar ve elektrik enerjisi üretimi için önemli bir rol oynamıştır (Güven ve Karakurt 2009).

Akışkan yataklı yakıcılar, silindir veya köşeli bir kap içine yerleştirilmiş kül veya kum gibi taneli bir yatak sisteminden oluşur. Kapın tabanında, çok sayıda küçük deliğe sahip bir ızgara bulunur. Bu deliklerden kül veya kum taneleri geçemez, ancak hava geçebilir. Şekil 1'de, akışkan yatağın temel yapısı gösterilmektedir. Alt kısımdan verilen hava (1-3 m/s hızında), deliklerden çıkarak taneleri yukarı doğru itmekte ve yataktan geçmektedir. Yukarı doğru hava akımının hızı belli bir değeri aştığında, taneler hava akımı içinde asılı kalır. Taneli kütlesi sıvı benzeri özellikler göstermeye başlar ve yatak akışkanlaşır. Hava hızı daha da arttırılırsa, sıvı içinden geçen hava durumuna benzer şekilde, hava akışkan yatak içinden kabarcıklar oluştu-

arak geçer. Bu durumda, tanecikler katı halde olup ergime meydana gelmez. Kaynamadaki akışkan yatak, yanma için son derece uygun bir ortam oluşturur. Yeterli sıcaklığa ulaşıldığında, kömür eklenerek hızla karışır ve yanmaya başlar. Yanma sırasında, tüm yatak kütlesi homojen bir sıcaklık dağılımına sahiptir. Bu sayede uçucu maddeler ve karbonmonoksit yatak içinde yanar. Akışkan yatakta düşük ısıl değere sahip, yüksek nem ve kül oranına sahip kömürlerin yüksek verimle yanması mümkündür (Plass ve ark. 1987; Broederman, 1987).

Akışkan yatak yakma teknolojisinde kömür, yaklaşık 12 mm'den küçük boyutlara kırılır ve yaklaşık %2 oranında yatak malzemesiyle birlikte beslenir. Yatak malzemesi genellikle kireçtaşı, kalsiyum sülfat ve bazen kum gibi bileşenlerden oluşur ve yakıtın külünü ve SO<sub>2</sub> gazını tutmak için yatak bölgesine beslenir. Yataktaki katı malzemelerin sıcaklığı genellikle 750-900°C aralığındadır (Güven ve Karakurt 2009).



Şekil 1. Akışkan Yatak (URL-1).

### 3. Akışkan yatak teknolojisinin avantajları ve dezavantajları

Akışkan yatak teknolojisi, termik santrallerde yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Bu teknolojinin bazı avantajları ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır:

### **Avantajları:**

**Yakıt Çeşitliliği:** Akışkan yatak teknolojisi, farklı türdeki yakıtların kullanılmasına izin verir. Katı yakıtlar (kömür, linyit, biyomasa), sıvı yakıtlar (fuel oil, atık yağlar) ve gaz yakıtları (doğal gaz, biyogaz) gibi çeşitli yakıt türlerini etkin bir şekilde kullanabilir.

**Yüksek Yanma Verimi:** Akışkan yatak sistemleri, yüksek yanma verimi sağlayan ve enerji kaybını minimize eden bir tasarıma sahiptir. Yakıtın tamamının etkin bir şekilde yanması ve enerjiye dönüştürülmesi için optimize edilmiştir.

**Düşük Emisyonlar:** Akışkan yatak teknolojisi, azot oksit ( $\text{NO}_x$ ) ve kürt dioksit ( $\text{SO}_2$ ) gibi zararlı emisyonların azaltılmasına yardımcı olur. Bu sistemlerde kullanılan arıtma yöntemleri, baca gazlarındaki kirleticilerin tutulmasını ve gelişmiş emisyon kontrolü sağlamayı amaçlar.

**Esnek Çalışma:** Akışkan yatak sistemleri, hızlı bir şekilde yük değişimlerine uyum sağlayabilen esnek bir çalışma yapısına sahiptir. Bu, enerji talebindeki dalgalanmalara hızlı bir şekilde yanıt verebilir ve sistem stabilitesini sağlar.

### **Dezavantajları:**

**Yüksek Yatırım Maliyeti:** Akışkan yatak teknolojisi, geleneksel termik santral teknolojilerine kıyasla daha yüksek yatırım maliyetine sahiptir. Bu, başlangıçta daha fazla sermaye gerektirebilir ve geri dönüş süresini uzatabilir.

**Bakım Gereksinimi:** Akışkan yatak sistemleri, karmaşık bir yapıya sahip olabilir ve periyodik bakım gerektirebilir. Bu da ek operasyonel maliyetlere yol açabilir.

**Yakıt Kalitesi İhtiyacı:** Akışkan yatak sistemleri, optimum performans için belirli bir yakıt kalitesine ihtiyaç duyabilir. Özellikle katı yakıtların boyutu, nem içeriği ve yanma özellikleri yakıt kalitesini etkiler. Bu nedenle, yakıtın kalitesinin dikkatlice kontrol edilmesi gerekmektedir.

## **4. Akışkan Yatak Yakma Sistemlerinin Sınıflandırılması**

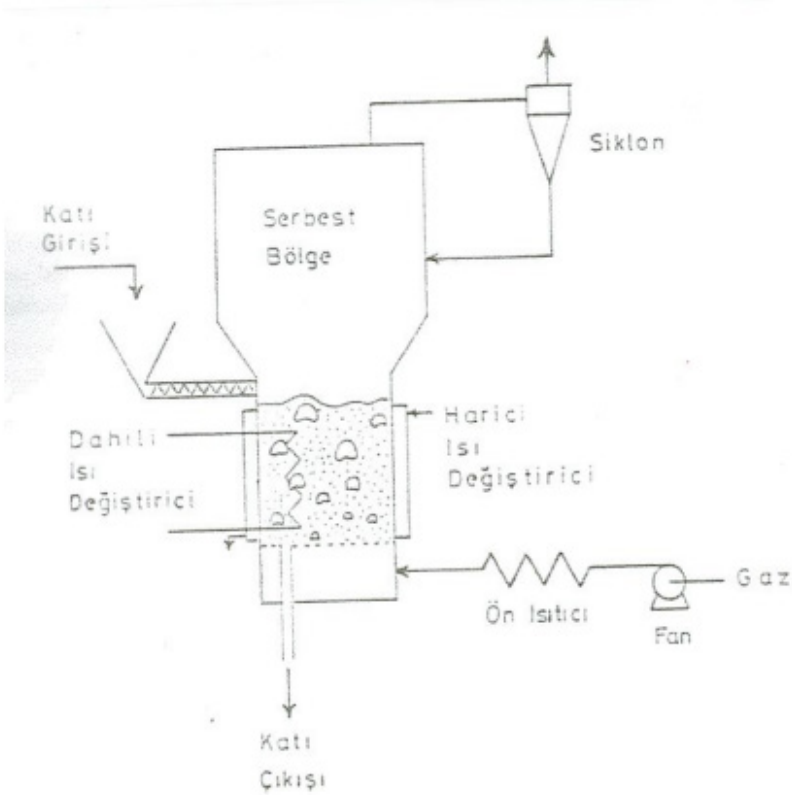
Akışkan yataklı kazanlar, iki grupta sınıflandırılabilir: atmosferik ve basınçlı kazanlar. Atmosferik akışkan yataklı kazanlar, atmosfer basıncında çalışırken, basınçlı akışkan yataklı kazanlar ise 5-20 atm aralığında çalışır.

Bunun yanı sıra, akışkan yataklı kazanlar akışkanlaştırma koşullarına göre de ikiye ayrılır: kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar ve dolaşımli akışkan yataklı kazanlar.



#### 4.1. Kabarcıklı (Sabit) Akışkan Yatak Yakma Sistemi

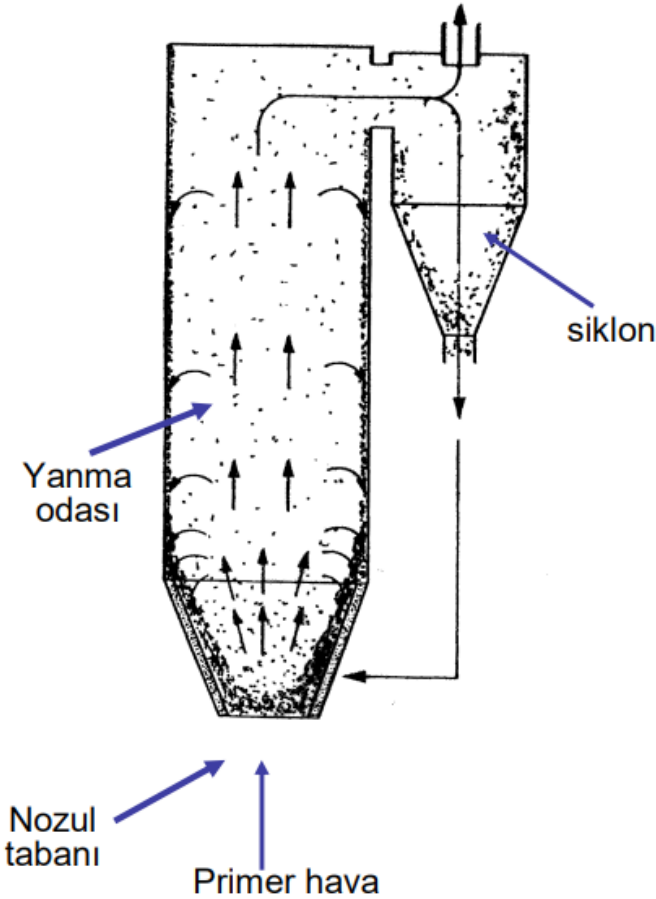
Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlarda, bir kolon içinde bulunan tanelerin olduğu bölgeye altta düşük bir hızla hava verilir (Şekil 2). Hava parçacıklarına fazla kuvvet uygulanmazken, hız arttıkça hava parçacıklarına daha fazla kuvvet uygulanır ve kabarcıkların oluşmasını sağlar. Bu kabarcıklar, yatağı terk ederken su kaynamasını andıran bir şekilde gözlemlenir. Beslenen kömür taneleri önce uçucu maddelerini kaybeder, ardından yanarken yatak içerisindeki serbest bölgedeki uçucu maddelerin yanması devam eder. Yanma sonucunda oluşan uçucu kül, gazla birlikte sürüklenir ve iri parçalar siklonlarda, ince taneler ise daha ilerideki elektrostatik filtrelerde tutulur. Sanayide, yüksek kapasite gerektiren uygulamalarda kabarcıklı akışkan yataklı kazanlar tercih edilmez. Bunun yerine Dolaşım Akışkan Yatak yakma sistemleri tercih edilmektedir (Yolcu, 1989).



Şekil 2. Kabarcıklı Akışkan Yataklı Kazanlar (URL-3).

#### 4.2. Dolaşımli Akışkan Yatakl Yakma Sistemi

Dolaşımli akışkan yatakl kazanlarda, gaz hızları kabarcıklı sistemlere göre 3-4 kat daha yüksektir. Bu nedenle parçacıklar kolaylıkla sürüklenir ve yanma havasının kademeli olarak beslenmesiyle yanma tüm kazan boyunca devam eder (Şekil 3). Yanma sırasında ince tanecikler, yanma gazının hızıyla birlikte yakıcının dışına taşınır. Bu parçacıklar, yanma odası çıkışında bulunan siklon tarafından yakalanarak yanma odasına geri gönderilir ve dolaşım gerçekleşir. Parçacık dolaşımı, kömürün yanması ve kükürtün tutulması için parçacıkların yanıcı içerisinde daha uzun süre kalmasını sağlar, böylece parçacıkların ısısından maksimum verim elde edilir (URL-2).



Şekil 3. Dolaşımli Akışkan Yatakl Kazanlar (URL-3).

### 4.3. Basınçlı Akışkan Yatak Yakma Sistemi

Basınçlı akışkan yataklı kazanlarda, kömür 5 atm ile 20 atm arasında bir basınç altında yanar. Bu şekilde, buhar üretimi için kullanılacak yanma gazının yanı sıra gaz türbinlerine beslenebilecek basınca sahip yanma gazı elde edilir. Basınçlı sistemler, atmosferik çalışan akışkan yataklara göre daha verimli olmaları nedeniyle, proses buharı ve buhar türbinlerinden elektrik üretiminin yanı sıra gaz türbinlerinden de elektrik elde etme avantajına sahiptir. Ancak, basınçlı sistemlerde sıcak gazın temizlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Eğer kazandan çıkan sıcak gaz, siklonlar ve filtreler aracılığıyla parçacıklardan tam olarak arındırılmaz ve korozyona neden olan gazlar içeriyorsa, gaz türbininin kanatlarında zarar meydana gelmesi kaçınılmaz olur. Bu nedenle, gazın temizlenmesi ve arıtılması basınçlı sistemlerde önemli bir aşamadır. Kabarcıklı ve dolaşimli sistemler her ikisi de basınçlı olarak tasarlanabilir, ancak genellikle kabarcıklı akışkan yatakların 100MWe kapasiteli basınçlı uygulamaları mevcuttur (URL-2).

Dolaşimli Akışkan Yatak yakma sistemlerinde birim alan başına üretilen ortalama ısı gücü, yaklaşık olarak  $4,5 \text{ MW/m}^2$  seviyesindedir. Öte yandan, Sabit Akışkan Yatak yakma sistemlerinde bu değer ortalama olarak  $1,0 \text{ MW/m}^2$  civarında yer almaktadır (Dülger, 2007).

## 5. AKIŞKAN YATAK YAKMA SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Kabarcıklı Akışkan Yatak ve Dolaşimli Akışkan Yatak sistemleri, akışkan yatak yakma teknolojisi içinde farklı tasarımları temsil eder. İşte bu iki sistem arasındaki bazı karşılaştırmalar:

### **Kabarcıklar:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Daha düşük hava hızıyla kabarcıklı akış sağlar. Yakıt yatağı üzerinde hareket eden kabarcıklar oluşur.

**Dolaşimli Akışkan Yatak:** Daha yüksek hava hızıyla kabarcıklı akış sağlar. Yakıt yatağı içindeki tüm yatak malzemesi hareketlidir.

### **İşletme Basıncı:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Atmosfer basıncında çalışır.

**Dolaşimli Akışkan Yatak:** İşletme basıncı daha yüksektir, genellikle 5 - 20 atm arasında değişir.

### **Isı Transferi:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Düşük basınçta çalıştığı için ısı transfer katsayıları daha düşüktür.

**Dolaşımli Akışkan Yatak:** Yüksek basınç sayesinde ısı transfer katsayıları yükselir, daha etkili bir ısı transferi sağlanır.

### **Yakıt Çeşitliliği:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Genellikle özel olarak seçilmiş ve daha homojen yakıtlarla kullanılır.

**Dolaşımli Akışkan Yatak:** Geniş bir yakıt yelpazesine uyum sağlayabilir. Daha düşük kaliteli yakıtların yanması için daha uygundur.

### **Boyut ve Maliyet:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Daha küçük boyutlara sahip ısı değiştiricileri kullanılır, bu da kazan boyutlarını küçültür ve işletme maliyetlerini azaltır.

**Dolaşımli Akışkan Yatak:** Daha büyük boyutlara sahip ısı değiştiricileri gerektirebilir, bu nedenle Kabarcıklı Akışkan Yatağa kıyasla daha büyük kazan boyutlarına sahip olabilir.

### **Uygulama Alanı:**

**Kabarcıklı Akışkan Yatak:** Küçük ve orta ölçekli enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilir.

**Dolaşımli Akışkan Yatak:** Büyük ölçekli enerji üretimi, termal güç tesisleri ve sanayi uygulamaları için daha uygundur.

Bu karşılaştırmalar, Kabarcıklı Akışkan Yatak ve Dolaşımli Akışkan Yatak sistemlerinin temel farklılıklarını ortaya koymaktadır. Hangi sistem seçileceği, yakıt tipi, enerji ihtiyacı, işletme koşulları ve uygulama gereksinimleri gibi faktörlere bağlı olacaktır.

## **6. TÜRKİYE'DEKİ AKIŞKAN YATAKLI YAKICILARIN DURUMU**

Akışkan yatak teknolojisi, ülkemizdeki düşük kaliteli linyit rezervlerinin verimli ve çevre standartlarına uygun bir şekilde değerlendirilmesi için giderek daha önemli hale gelmektedir. Türk linyitlerinin özelliklerine uygun olmayan akışkan yataklı yakıcı tasarımları, devreye alma sürecinde değişikliklere, gecikmelere, sık ve pahalı onarımlara ihtiyaç duymuştur. Bu nedenle, Türkiye'deki kazan imalatçıları, lisans olarak proses tasarımı için diğer ülkelerden imalat yapmış ve küçük ve orta kapasiteli kazanlar sunmuşlardır. Ancak, bu tasarımlar Türk linyitleri için geliştirilmemiştir, bu da uyum sağlama gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. 1975 yılında başlayan akışkan yataklı yakıcıların modellenmesi ve 1984 yılından itibaren pilot ölçekte deney ve tasarım geliştirme çalışmalarıyla devam eden araştırmalar, Türk linyitlerinin geliştirilmesine yönelik önemli adımların atılmasını sağlamıştır (URL-2).

Türkiye’deki devlet kuruluşlarına ait ilk akışkan yataklı kazan, 2005 yılında 18 Mart Çan Termik Santralinde devreye alınmıştır (Şekil 4). Bu kazan, toplamda 2 x 160 MW kurulu güce sahiptir ve yıllık 2080 GWh üretim kapasitesine sahiptir (URL-4).



Şekil 4. 18 Mart Çan Termik Santrali (URL-4).

18 Mart Çan Termik Santrali, çevresel etkileri azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla “Desülfürizasyon İşlemi” olarak adlandırılan bir süreç kullanmaktadır. Bu süreçte, yanma işlemine kireçtaşı katılarak kükürt emisyonları önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu teknoloji, santralin çevreye verdiği zararları en aza indirirken aynı zamanda enerji verimliliğini artırarak daha ekonomik bir enerji üretimine olanak sağlamaktadır (EÜAŞ, 2022).

Akışkan yatakta akışkanlaştırmayı sağlamak için primer hava ve sekonder hava kullanılır. Primer hava, nozul tabanından verilen hava akışıdır, sekonder hava ise nozul tabanının üst tarafındaki hava kanalından verilen havadır. Nozul tabanı, yatak malzemesinin (%98 oranında kül veya kum) homojen bir şekilde akışkanlaşmasını sağlar. Bu sayede akışkan yatak verimli bir şekilde çalışır. Primer hava, nozul tabanında bulunan deliklerden yatak malzemesine doğrudan verilir. Bu hava akışı, yatak malzemesini yukarı doğru hareket ettirir ve akışkanlaşmasını sağlar. Aynı zamanda, sekonder hava da nozul tabanının üst tarafındaki hava kanalından yatak mal-

zemesine yönlendirilir. Sekonder hava, primer havanın hareketini destekleyerek yatak malzemesinin homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Nozul tabanı, yatak malzemesinin akışkanlaşmasını kontrol etmek için önemli bir bileşendir. Deliklerin düzeni ve boyutları, primer hava ve sekonder havanın akışını yönlendirir ve yatak malzemesinin istenilen şekilde hareket etmesini sağlar. Bu şekilde, yatak malzemesi akışkan hale gelir ve yatak içinde homojen bir tabaka oluşturur. Primer havanın verildiği nozul tabanı ve yatak malzemesi, akışkan yatak teknolojisinin temel bileşenlerindedir. Bu bileşenlerin uyumlu bir şekilde çalışması, akışkan yatağın verimli bir şekilde işlemlerini sağlar. Aşağıda primer havanın verildiği nozul tabanı ve yatak malzemesi görülmektedir (Şekil 5) (URL-3).



**Şekil 5.** *Primer Havanın Verildiği Nozul Tabanı ve Yatak Malzemesi (URL-3).*

Son yıllarda özel yatırımcılar tarafından işletmeye alınan yerli kömür yakıtlı santrallerde kükürtoksit salımının daha az olduğu akışkan yatak teknolojisi kullanılmıştır.

Silopi Termik Santrali, 2009 yılında 135 MW kurulu güce sahip bir tesisdir ve yerli kömürün desteklenmesi, istihdama dönüştürülmesi ve ekonomiye katkı sağlanması amacıyla faaliyete geçirilmiştir (Şekil 6). Bu termik santral, asfaltit yakıtlı, akışkan yataklı ve çevre dostu bir yapıya sahiptir. İlk ünitenin başarısı üzerine, aynı sahada 2015 yılında 2x135 MW'lık kurulu güce sahip yeni üniteler kurulmuştur (URL-5).





Şekil 6. Silopi Termik Santrali (URL-5).

2014 yılında devreye alınan Polat Termik Santrali, çevre dostu bir teknoloji olan Akışkan Yatak Teknolojisi ile tasarlanmıştır (Şekil 7). Toplamda 51 MW kurulu güce sahip olan bu santral, yıllık 357.000.000 kWh elektrik üretebilme kapasitesine sahiptir. Polat-1 Termik Santrali, Avrupa standartlarının altında emisyon yayma özelliğiyle dikkat çekmektedir. Bu proje Türkiye-Çin İşbirliği ile gerçekleştirilmiştir. Santral, yerli linyit kaynaklarını yakıt olarak kullanmaktadır (URL-6).



Şekil 7. Polat Termik Santrali (URL-7).

Bolu Göynük Termik Santrali'nin ilk fazı, 135 MW kurulu güce sahip olarak, özel sektör tarafından Temmuz 2015'te faaliyete geçti. İkinci fazı ise 135 MW'lık güce sahip olarak, Ocak 2016'da hizmete girdi. Bu santral, yerli kaynakların ekonomiye kazandırılması ve enerjide dışa bağımlılığın azaltılması açısından büyük öneme sahiptir. Aynı zamanda, ileri teknolojisi sayesinde ucuz, verimli ve çevre dostu enerji üretimine olanak tanımaktadır. Bolu Göynük Termik Enerji Santrali, "akışkan yataklı yakma" teknolojisiyle çalışan bir termik santral olarak tasarlanmıştır (URL-8) (Şekil 8).



Şekil 8. Bolu Göynük Termik Santrali (URL-9).

Tufanbeyli Yerli Linyit Santrali, 2016 yılında özel sektör tarafından yapılan ve Türkiye'nin en büyük yerli linyit santrali olarak kabul edilen bir projedir. Santral, Adana ili, Tufanbeyli ilçesi, Yamanlı-Kayarcık-Taşpınar köyleri arasında konumlanmaktadır. Akışkan yatak teknolojisi kullanılarak tasarlanan santralin toplam kapasitesi 450 MW'dir. Santral, üç ünite olarak tasarlanmıştır (URL-10) (Şekil 9).





**Şekil 9.** Enerjisa Tufanbeyli Termik Santrali (URL-10).

2016 yılında özel sektör tarafından devreye alınan Adularya Yunus Emre Termik Santrali, enerji üretimi için yerli linyit kömürünü Adularya Şih Mehmet Nakıboğlu Maden İşletmesi sahasından temin etmektedir. Santral, dolaşımli akışkan yatak kazan teknolojisini kullanmaktadır ve toplamda iki üniteden oluşan 2x145 MW kapasiteye sahiptir (URL-11) (Şekil 10).



**Şekil 10.** Adularya Yunus Emre Termik Santrali (URL-11).

## 7. AKIŞKAN YATAK TEKNOLOJİSİNİN POTANSİYEL KATKILARI VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Akışkan yatak teknolojisi, enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalar açısından birçok potansiyel katkı sunmaktadır. İşte akışkan yatak teknolojisinin potansiyel katkıları ve gelecek perspektifleri:

**Yerli Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi:** Akışkan yatak teknolojisi, yerli kömür gibi yerel enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar. Bu teknoloji sayesinde kömür rezervleri daha verimli bir şekilde kullanılarak enerji üretimi artırılabilir. Özellikle linyit gibi düşük kaliteli kömürlerin temiz ve verimli bir şekilde yakılması mümkün hale gelir.

**Çevre Dostu Enerji Üretimi:** Akışkan yatak teknolojisi, daha düşük emisyon salınımı sağlayarak çevre dostu enerji üretimi yapılmasını mümkün kılar. Yüksek yanma verimliliği ve kükürt giderme kapasitesi sayesinde hava kalitesi üzerinde olumsuz etkileri minimize eder. Ayrıca, partikül madde salınımı da azaltılır, böylece hava kirliliği ve iklim değişikliği riski azaltılır.

**Yakıt Çeşitliliği:** Akışkan yatak teknolojisi, farklı yakıt türlerinin kullanımına olanak tanır. Kömürün yanı sıra, atıklar ve alternatif yakıtlar da akışkan yatak sistemlerinde kullanılabilir. Bu da enerji üretiminde yakıt çeşitliliğini artırarak enerji güvenliğini sağlar.

**Yüksek Verimlilik:** Akışkan yatak teknolojisi, yüksek yanma verimliliği sağlar. Yakıtın tamamen yanmasını ve enerjinin maksimum derecede çıkarılmasını sağlar. Bu da enerji üretiminde verimliliği artırır ve enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar.

**Endüstriyel Uygulamalar:** Akışkan yatak teknolojisi, sadece enerji üretimi için değil, aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda da potansiyel katkılar sunar. Özellikle kimya, petrokimya ve çelik gibi sektörlerde ısı ve buhar üretimi için akışkan yatak sistemleri kullanılabilir.

Gelecek perspektiflerine gelince, akışkan yatak teknolojisi sürekli olarak geliştirilmekte ve iyileştirilmektedir. Yakıt verimliliği, emisyon kontrolü ve operasyonel esneklik gibi alanlarda yapılan Ar-Ge çalışmaları, teknolojinin gelecekte daha da gelişmesini sağlayacaktır.

## 8. SONUÇ

Türkiye, geniş kömür rezervlerine sahip bir ülke olduğu için akışkan yatak teknolojisi, yerli enerji kaynaklarının değerlendirilmesi açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji sayesinde kömür rezervleri daha verimli bir şekilde kullanılarak enerji üretimi artırılabilir ve enerji ithalatının azaltılması hedeflenir. Gelecekte, Türkiye'nin enerji ihtiyacının

karşılanmasında akışkan yatak teknolojisinin önemi daha da artabilir.

Türkiye’deki akışkan yatak teknolojisi durumu olumlu bir şekilde ilerlemekte olup, projeler, Ar-Ge çalışmaları ve enerji politikaları bu teknolojinin yaygınlaşmasını desteklemektedir. Türkiye’nin yerli enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmak için akışkan yatak teknolojisinin daha da geliştirilmesi ve uygulanması önemli bir adımdır.

## KAYNAKLAR

(URL-1) <https://www.selnikel.com/wp-content/uploads/2021/06/Selnikel-Boiler-Catalogue-2020-Y%C3%BCksek-%C3%87%C3%B6z..pdf>

(URL-2) <http://eng.harran.edu.tr/~hbulut/buhar.pdf>

(URL3) [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi\\_dosya\\_ekleri/b81c4484ebf263f\\_ek.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/b81c4484ebf263f_ek.pdf)

(URL-4) <https://www.euas.gov.tr/santraller/18-mart-can>

(URL-5) <https://www.cinergroup.com.tr/enerji-madencilik/silopi-elektrik-uretim>

(URL-6) <https://www.kariyer.net/firma-profil/polat-elektrik-uretim-insaat-ith-ve-ihr-a-s-3011-229740>

(URL-7) <https://baru.com.tr/polat-1-termik-santrali>

(URL-8) <https://www.aksainvestorrelations.com/tr/aksa-enerji-uretim-as-hakkinda/enerji-santralleri/liniyit/bolu-goynuk-termik-santrali/>

(URL-9) <https://www.enerjigazetesi.ist/bolu-goynuk-termik-enerji-santral-sahasinda-gunes-santrali-kuruluyor/>

(URL-10) <https://www.enerjisauretim.com.tr/enerji-uretimi/diger-santrallerimiz/tufanbeyli-linyit-santrali>

(URL-11) <https://www.adularya.com/tr/enerji-santrali/2>

BROEDERMANN P., 1987. Calching of Fine-Grained in The Circulating Fluid Bed, Lurgi GmbH, Germany.

DÜLGER, 2007. Akışkan Yataklı Kömür Yakma Sistemlerinde Otomatik Kontrol Tasarım ve Uygulaması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Yüksek Lisans Tezi, 172s.

ELEKTRİK ÜRETİM A.Ş. (EÜAŞ). (2015). 18 Mart Çan Termik Santrali. <http://www.euas.gov.tr/18Mart/Sayfalar/Tarih%C3%A7emiz.aspx> (Erişim 06/08/2018 22:15)

ELEKTRİK ÜRETİM A.Ş. (EÜAŞ). (2022). Çanakkale İli Çan Termik Santrali'nde Kojenerasyonla Bölgesel Isıtma Sistemi Ön Fizibilite Raporu. <https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/canakkale-ili-can-termik-santrali-kojenerasyonla-bolgesel-isitma-sistemi-on-fizibilite-raporu2022.pdf>

GÜVEN T. Y., KARAKURT O. Akışkan yatakta yakma teknolojisi nedir, nerelerde kullanılır, avantajları nelerdir? Türkiye Kalkınma Bankası Yayını Nisan-Haziran 2009, sayı: 52, 39-44.

PLASS L., BIERBACH H. and GUMMEL P., 1987. Experience With Combustion in Circulating Fluidized Beds, Lurgi GmbH, Germany.

RAHİM, M. A., GÜNDÜZ, D., 2013. Dolaşım Akışkan Yataklı Bir Isıl-Güç Çevrim Santralinin Simülasyonu ve Duyarlılık Analizi. Gazi Üniversitesi Fen

Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım ve Teknoloji GU J Sci Part:C, 1(2):37-47.

YOLCU S., 1989. Pilot Boyutta Bir Dolaşımli Akışkan Yatak Yakma Sistemi Tasarım ve Kurulması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 22-42, 46-50.





## BÖLÜM 6

### ATIK YAĞLARIN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

*Belit KERMAN<sup>1</sup>, Ali Osman ATAHAN<sup>2</sup>,  
Murat KARACASU<sup>3</sup>*

---

1 İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi ORCID: 0009-0002-1690-2394

2 Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi ORCID: 0000-0002-4800-4022

3 Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ORCID: 0000-0001-9721-0984

## 1. LİTERATÜR

Temel olarak esnek, rijit ve kompozit yol kaplaması şeklinde üç çeşit kaplama tipi bulunmaktadır. Kompozit yol kaplamaları, genel olarak, deforme olmuş asfalt betonunu düzeltmek amacıyla normal betonun uygulandığı ya da deforme olmuş normal betonunu düzeltmek için asfalt betonunun uygulandığı yol kaplamasının iyileştirilme ve onarıma işlemi sonucu ortaya çıkmaktadır. Rijit yol kaplamalarında ise genellikle orta tabakası bulunan ya da bulunmayan alt zeminin üstüne konumlandırılmış normal beton katmanından meydana gelmektedir. Rijit üstyapılarda, normal beton katmanı granüler temel katmanının üst kısmına konumlandırıldığı gibi taban zeminin üstüne de konumlandırılabilir. Esnek yol kaplamalarında ise çoğunlukla, alt zemin olarak tanımlanan sıkıştırılmış toprak ile güçlendirilen granüler temel/alt temel katmanları üstüne konumlandırılmış asfalt betonundan meydana gelmektedir. Esnek üstyapıda, birçok alt tabakadan meydana gelebilen asfalt beton katmanı, sırasıyla konumlandırılmış olan alt zeminin ve granüler temel/alt temel tabakalarının üst kısmına konumlandırılmaktadır. Tabakalar arasındaki adezyonu oluşturmak amacıyla yapıştırma tabakası kullanılabilir. Yukarıda belirtilen yol kaplama tiplerine esnek ve rijit denilmesinin nedeni oluşan gerilmeleri diğer tabakalara aktarma biçimlerinden dolayıdır. [1]. Esnek yol üstyapı kaplamasının tümü yük etkisinde elastik sapma gösterir. Esnek üstyapı da kullanılan bitüm malzemesinden dolayı rijit yol üstyapısına göre daha elastiktir. Bununla beraber, esnek üstyapının daha çok deforme olma eğilimi vardır [2].

Asfalt betonu üretimi süreçlerinde farklı atık maddelerin agrega yerine kullanılabilir hale getirilmesi çevresel kirlilik azalımı açısından faydalı olabilir ve yol yapım çalışmalarının sürdürülebilir bir hale getirilmesini sağlayabilir. Asfalt betonu malzemelerinin geri dönüştürülmesinin sağlanması ile beraberinde daha sürdürülebilir bir yol üstyapısı oluşturulması ve atık yönetim süreci sağlanmasında önemli bir yer alabilir. Değişik atık çeşitleri sürdürülebilir yol yapımında kullanılabilirliğini gözlemlemek amacıyla sürekli olarak araştırılmaktadır. Polimer ve plastik materyaller kullanılarak yapılan çalışmalarda Marshall stabilitesinin ve akmanın artışı gözlemlenmiştir. Bina yıkım atıklarının asfalt betonunda değerlendirilmesi beton atık oluşumunu azaltmıştır. Lastik kauçuk tozu malzemesi çeşitli çalışmalarda incelenerek yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileştirildiği incelenmiştir. Atık değerlendirilmesi bağlamında atık cam, tuğla ve seramikler mekanik performans açısından olumlu sonuçların görüldüğü çalışmalar gerçekleştirilmiştir [5,6]. Sürdürülebilir bir çevrenin sağlanabilmesi için ilk olarak çevre kirliliği en aza indirilmesi gerektiği konusunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [3].

Su kaynaklarına ve toprağa karışan atık yağlar zararlı sonuçlar oluşturmaktadır. Bu nedenle, sürdürülebilir bir ortam sağlamak için atık yağların



doğru bir şekilde kullanım alanları oluşturulmalıdır. Değişiklikleri analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, çeşitli oranlarda atık yağların, kompozit geliştirici olarak kullanıldıkları zaman ki değişikliklerini göz önünde bulundurarak fiziksel performans deneyleri ve kimyasal bileşim incelemeleri gözlemlenmiştir [4].

Atık yemeklik ve motor yağının, yaşlanmış bitümlü kaplama için geliştirici bir malzeme şeklinde kullanılabilirliğinin etkisinin gözlemlendiği araştırma sonucunda, atık yemeklik ve motor yağının bitüm modifikasyonunda kullanılabilceği, çevresel ve ekonomik anlamda fayda sağlayabileceği belirtilmiştir [7,8]. Yol kaplamalarında, işlem görmemiş materyallerin kullanımının azaltılması için geri dönüştürülmüş materyallerin tercih edilmesi, zamanla altyapı endüstrisi içerisinde dikkate alınmaya başlanmıştır [9].

Bu çalışmada, üç çeşit atık yağ kullanılmıştır. Bu atık yağlar, kamyon, otomobil ve bitkisel yağ atığıdır. Kamyon yağ atığı ve otomobil yağ atığı Eskişehir sanayi bölgesinden; bitkisel yağ atığı ise Eskişehir bölgesindeki hazır yiyecek hizmeti sunan bir işletmeden temin edilmiştir. Toplanan atık yağlar üç farklı oranda (%1, %3, %5) bitüme karıştırılmıştır. Bu atık yağların bitüme modifiye edilme sürecinde, 140-160 °C sıcaklıkta 200 devir/dk hızda 1 saatlik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırılma işlemi sonrası kontrol ve modifiye bitüm numuneleri için penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite ve ince film ısıtma kaybı deneyleri uygulanmıştır. Tüm numuneler arasından optimum olarak belirlenen sonuç; %3 oranla kamyon yağ atığı modifiyeli bitüm olmuştur. Belirlenen optimum değer kullanılarak Marshall tasarım deneyi gerçekleştirilmiştir. Kontrol ve kamyon yağ atığı katkılı modifiye bitüm içeren Marshall tasarım numunelerinin performansları incelendiğinde, kamyon yağ atıklarının bitüm modifikasyonunda ve asfalt betonu üretiminde kullanılabilirliği öngörülmüştür. Bu çalışma ile literatüre katkı sağlanmıştır.

## 2. MALZEME VE METOD

### 2.1 Bitüm

Çalışmada, deneyler için kullanılan bitüm TÜPRAŞ Kırıkkale Rafinerisi üretim tesislerinden temin edilmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm malzemesi tercih edilmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm malzemesinin düktilite, yumuşama noktası, ince film ısıtma kaybı, penetrasyon, özgül ağırlık ve viskozite laboratuvar deneyleri analiz edilmiştir. Elde edilen bitüm özelliklerinin sonuçları Çizelge 1 içerisinde verilmiştir.

Çizelge 1. Bitüm özellikleri

DeneYler	Değerler	Standartlar
Yumuşama Noktası (°C)	47	ASTM D36/D36M-09
Penetrasyon (25°C, 1/10mm)	56.3	ASTM D5
Düktilite (25°C)	>100 cm	ASTM D113-07
İnce Film Isıtma Kaybı (%)	0.167	ASTM D 1754
Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.028	ASTM D70-09e1
Viskozite (135°C, cP)	378.53	ASTM D4402-06
Viskozite (165°C, cP)	105.03	ASTM D4402-06

## 2.2 AgregA

Eskişehir bölgesi kireçtaşı malzemesi, agregA olarak kullanılmıştır. AgregA malzemesiyle ilgili fiziksel özellik deney sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Değerler	Standartlar
Kaba AgregA	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.709
	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.681
	Yüzey Kuru Suyu Doymun Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.691
İnce AgregA	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.858
	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.596
	Yüzey Kuru Suyu Doymun Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.688
Filler	Zahiri Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	2.783
Su Absorbsiyonu (%)	0.37	ASTM C 127
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.572	ASTM C 29
Gevşek Birim Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.301	
Los Angeles Aşınma Kaybı (%)	16.2	ASTM C 131
Yassılık İndeksi (%)	16	ASTM D 4791
Donma-Çözülme Dayanımı (%)	4	ASTM C 88

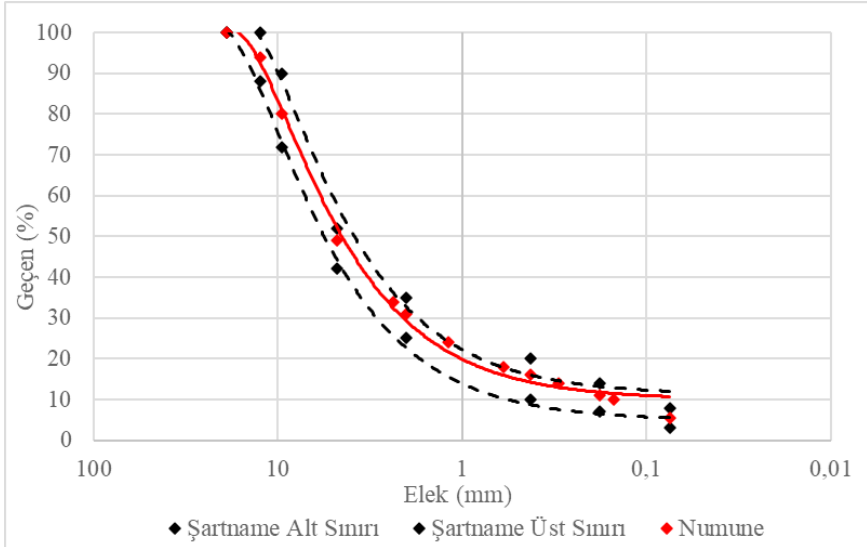
## 2.3 AgregA Elek Analizi

AgregA malzemesi için boyutlandırma yapılırken Karayolları Teknik

Şartnamesi (KTŞ 2013) [10] aşınma tabakası gradasyon limitleri alt ve üst sınır değerleri kullanılarak uygun karışım hazırlanmıştır. Bu agrega boyut dağılımı Superpave agrega tasarım değerlerini de sağlamaktadır. Elek analizi tasarımı Çizelge 3 ve Şekil 1 üzerinde ifade edilmiştir.

Çizelge 3. Agrega elek analizi çizelgesi

Agrega	Elek (inç)	Elek (mm)	$X^{0.45}$	Numune	KTŞ 2013	
					Şartname Alt Sınırı	Şartname Üst Sınırı
KA	3/4"	19	3.76	100	100	100
KA	1/2"	12.5	3.12	94	88	100
KA	3/8"	9.5	2.75	80	72	90
KA	# 4	4.75	2.02	49	42	52
İA	# 8	2.36	1.47	34		
İA	# 10	2	1.37	31	25	35
İA	# 16	1.18	1.08	24		
İA	# 30	0.6	0.79	18		
İA	# 40	0.425	0.68	16	10	20
İA	# 50	0.3	0.58	14		
İA	# 80	0.18	0.46	11	7	14
İA	# 100	0.15	0.43	10		
MF	# 200	0.075	0.31	5.5	3	8

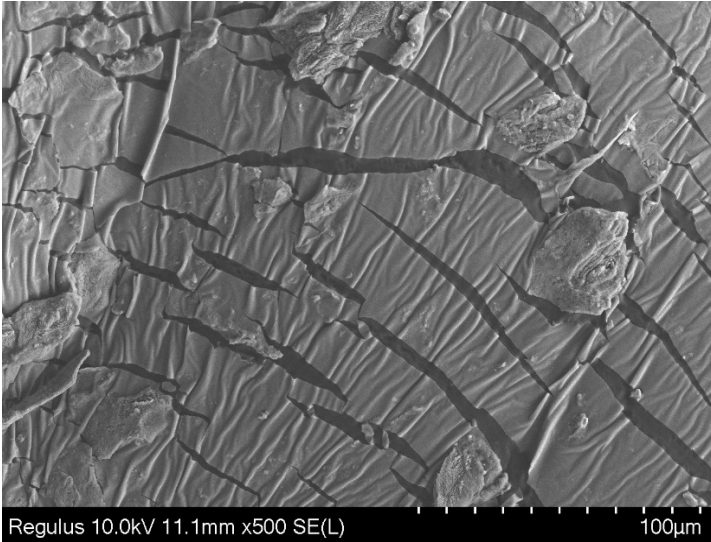


Şekil 1. Agrega elek analizi grafiği

## 2.4 Atık Yağlar

Deney tasarımlarında kullanılan kamyon ve otomobil yağ atığı, Eskişehir sanayi bölgesinde bulunan araç tamirhanelerinden temin edilmiştir. Kamyon ve otomobil yağ atığı herhangi bir işlem görmeden kullanılmıştır. Ayrıca yabancı madde karışmaması için süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kamyon ve otomobil yağ atığı oda sıcaklığında siyah renkte, kıvamı akışkan bir özellik göstermektedir. Bitkisel yağ atığı; Eskişehir ilinde bulunan hazır yiyecek hizmeti sunan bir işletmeden temin edilmiştir. Bitkisel yağ atığı laboratuvar çalışmalarında kullanılmadan önce süzgeç yardımıyla süzölmüştür. Bu işlemin nedeni ise içerisinde olabilecek tortu, çökelti veya parçacık bulunmasını önlemektir. Bahsedilen yağlar çevresel kirlilik oluşturmaktadır. Bu nedenle, yol yapımında asfalt betonu üretiminde değerlendirilme amaçlanmış ve çalışmaya karar verilmiştir.

Optimum oran olarak belirlenen %3 kamyon yağ atığı (KYA) katkılı bitüm numunesi, merkezi araştırma laboratuvarı uygulama ve araştırma merkezine iletilerek Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak ayrıntılı görüntüleri ve kimyasal analizleri elde edilmiştir. Ayrıntılı görüntüler ve kimyasal analizler için kullanılan cihaz Hitachi Regulus 8230 FE-SEM model taramalı elektron mikroskobudur [20]. KYA'nın Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir. KYA kimyasal özellik ve içerikleri Çizelge 4 üzerinde verilmiştir.



Şekil 2. Kamyon yağ atığı (FE-SEM) görüntüleri ( $\times 500$ )

Çizelge 4. %3 KYA modifiyeli bitümün kimyasal özellikleri

Element	Wt (%)
C	81.49
N	1.39
O	11.41
S	5.71
Toplam	100

## 2.5 Marshall Tasarım Deneyi

Marshall tasarım deneyi, 1939 yılında Bruce Marshall'ın Mississippi Eyaleti Otoyol Departmanında görev alırken tasarladığı bir yöntemdir [11,12]. Marshall tasarım deneyinde farklı aşamalar uygulanmaktadır. Bunlar; agregaların hazır hale getirilmesi, bitüme karar verilmesi, numunelere uygun karışımların oluşturulması, yoğunluk ve hava boşluğu sonuçlarının elde edilmesi, Marshall test cihazındaki stabilite ve akma sonuçlarının okunması ve optimum bitüm oranının belirlenmesi aşamalarıdır [13]. Marshall tasarım deneyinin uygulanma amacı asfalt betonlarında en uygun bitüm oranını belirlemektir. Agregalar belirli gradasyonlarda kullanılarak bitümle karıştırılır ve sonuçta asfalt betonunun fiziksel özellikleri, Marshall stabilite ve akma sonuçları ortaya çıkmaktadır [14]. Deneyin yapılışı esnasında, uygun şekilde boyutlandırılmış agregalar kullanılarak her bir numune tepsisi içerisinde toplam ağırlığı 1150 gram olacak şekilde hazırlanır. Agregalar numuneleri 24 saat boyunca 160 °C sıcaklıkta etüv içerisinde bekletilmektedir. Bitüm malzemesi ise etüv içerisinde 160 °C sıcaklıkta 2-3 saat geçirecek süreçte bekletilmektedir. Döküm sırasında kullanılan malzemeler de etüve konularak muhafaza edilmektedir. Eklenecek bitüm oranı agregalar ağırlığının %3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 oranında olacak şekilde ayarlanmaktadır. Bu ilave edilecek her oran için 3 numune olmak üzere toplam 21 numune dökümü yapılır. Karışım süresi 90 saniyedir. Karıştırılan numuneler kalıplara dökülür [15]. Kalıplanan numunelere Marshall tokmağı cihazında, her yüzeye 75 vuruş yapılır [16]. Kriko aletiyle hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri kalıplardan çıkarılmaktadır. 24 saat sonra numunelerin yüzeyleri zımpara ile düzeltilir ve yükseklik ölçümleri alınır. Numunelerin havada ve sudaki ağırlıkları belirlenir [15]. Son olarak numuneler 60 °C sıcaklıktaki su banyosuna sırasıyla konulur. 35 dakika süre ile burada bekletilen numuneler, Marshall test cihazına alınarak dayanım ve akma değerleri ölçülür [17,18]. Marshall tasarım deneyinde 50.8 mm/dk. hızla yükleme gerçekleştirilmektedir [19]. Marshall deney süreci sonrasında ulaşılan veriler kullanılarak pratik özgül ağırlık (PÖA), boşluk oranı (V), bitümle dolu boşluk oranı (VFA), Marshall stabilitesi (MS),

akma (F), Marshall katsayısı (MQ) ve agregalar arası boşluk oranı (VMA) sonuçları elde edilmektedir.

Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ 2013) [10] verilen sınır şartlarına göre optimum bitüm oranı (OBO) tespit edilir. Bu sınır şartları Çizelge 5 içerisinde gösterilmektedir.

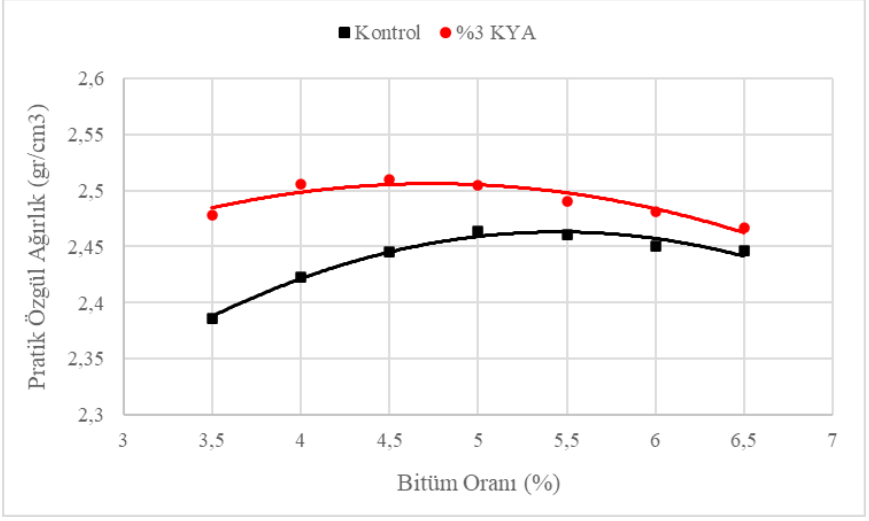
Çizelge 5. Marshall Tasarım Kriterleri (KTŞ 2013) [10]

Kaplama türü	Bitüm Oranı (%)	
	Binder	Aşınma
Pratik özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Max.	Max.
Marshall dayanımı (kg)	Min. 750	Min. 900
Boşluk oranı (%)	4 - 6	3 - 5
Bitümle dolu boşluk oranı (%)	60 - 75	65 - 75
Agregalar arası boşluk oranı (VMA) (%)	Min. 13	Min. 14
Akma (mm)	2 - 4	2 - 4

### 3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

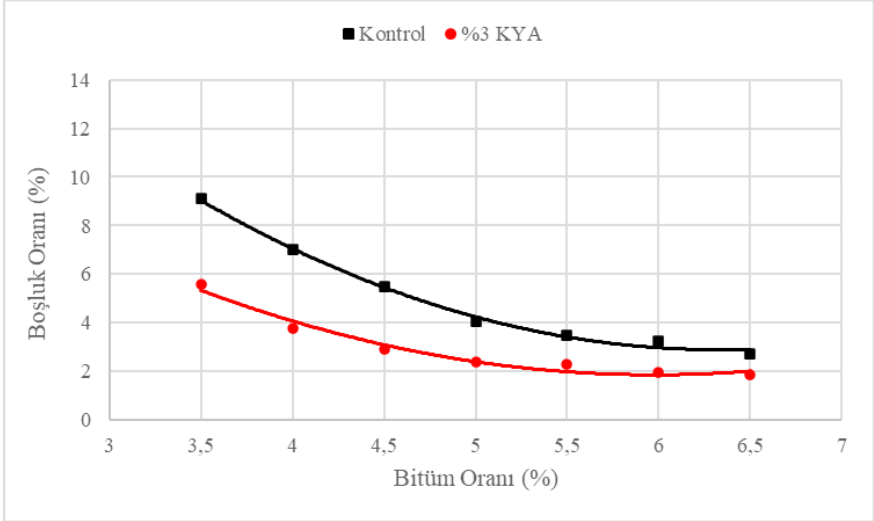
Marshall tasarım deneyi sonucunda ortaya çıkan veriler değerlendirilerek gerekli grafik değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir. Performans bağlamında optimum oran olarak belirlenen %3 KYA (kamyon yağ atığı) modifiyeli bitüm kullanılarak Marshall tasarım deneyinde test edilmiştir. Bunun için burada %3 KYA katkılı numunelerin ve kontrol numunelerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak verilecektir.

%3 KYA modifiyeli bitüm numunelerinin pratik özgül ağırlık değerleri; kontrol numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. KYA modifiyeli bitümün viskozitesi düşük olup, işlenebilirliği artırmıştır. Bu şekilde agregata tane aralıklarını daha iyi doldurabilmesi sağlanmıştır (Şekil 3).



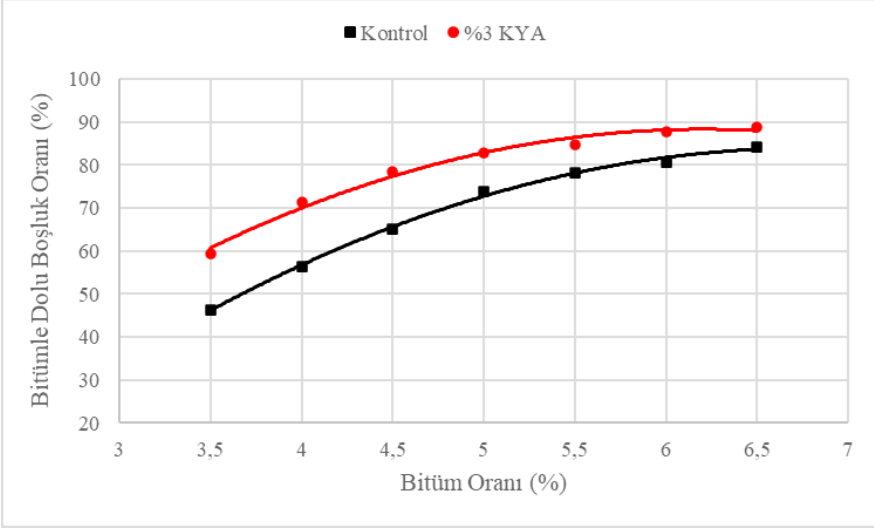
Şekil 3. Pratik özgül ağırlık – Bitüm oranı grafiği

Bununla beraber, boşluk oranı grafiği (Şekil 4) incelendiğinde, %3 KYA katkılı bitüm numunelerinin boşluk oranı yüzdesinin daha düşük çıktığı görülmektedir. %3 KYA katkılı bitüm; numunelerde boşluk oranının düşmesine sebep olmuştur. Bunun sebebi iyi bir işlenebilirlik sağlanması ve agrega danelerinin ince bir film halinde sarılmasıdır.



Şekil 4. Boşluk oranı – Bitüm oranı grafiği

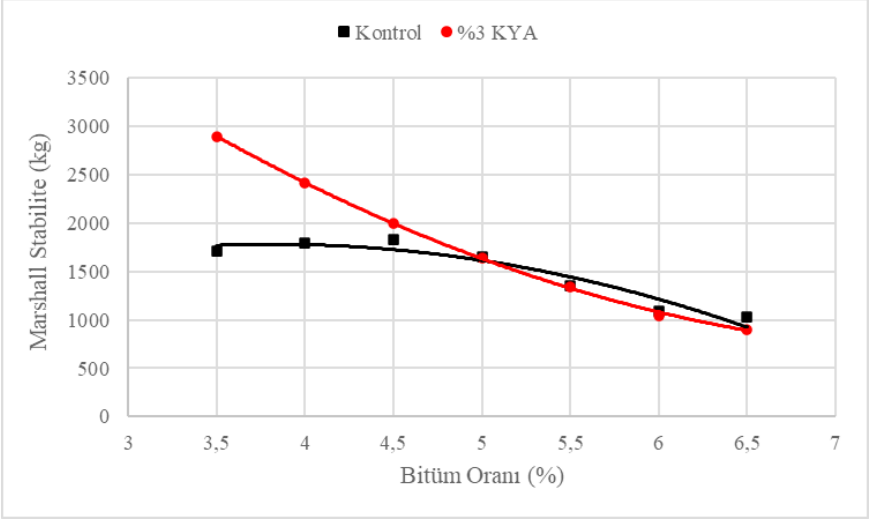
Bitümle dolu boşluk oranı grafiği Şekil 5 içerisinde gösterilmiştir. Bitümle dolu boşluk oranı değerleri KYA katkılı numunelerde ve kontrol numunelerinde bitüm oranı arttıkça artmaktadır. Bu doğal bir sonuçtur. KYA katkılı numunelerin bitümle dolu boşluk oranı değerleri kontrol numunelerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu numunelerde boşluk oranının düşmesi bu sonuçlara sebep olmaktadır.



Şekil 5. Bitümle dolu boşluk oranı – Bitüm oranı grafiği

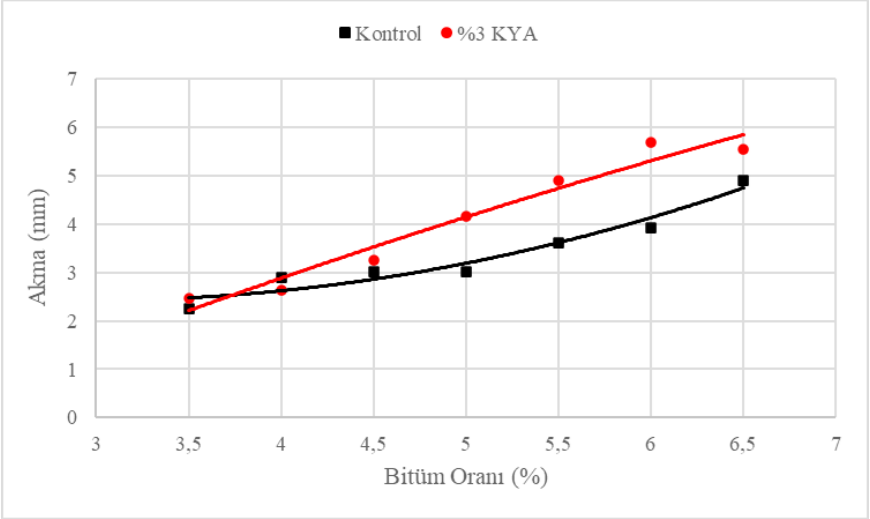
Şekil 6 üzerinde Marshall stabilite değerleri ifade edilmiştir. Marshall stabilite değerleri %5 bitüm oranına kadar %3 KYA modifiyeli numunelerde daha yüksek çıkmaktadır. Bunun yanı sıra %5 oranından sonraki yüksek bitüm oranı değerlerinde kontrol numunelerinin değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Kamyon yağ atığı fazla miktarda kullanıldığında numunelerde, bitüm film kalınlığı artmakta ve kayma direnci azalmaktadır. Sonuç olarak Marshall stabilite değerleri düşmektedir.





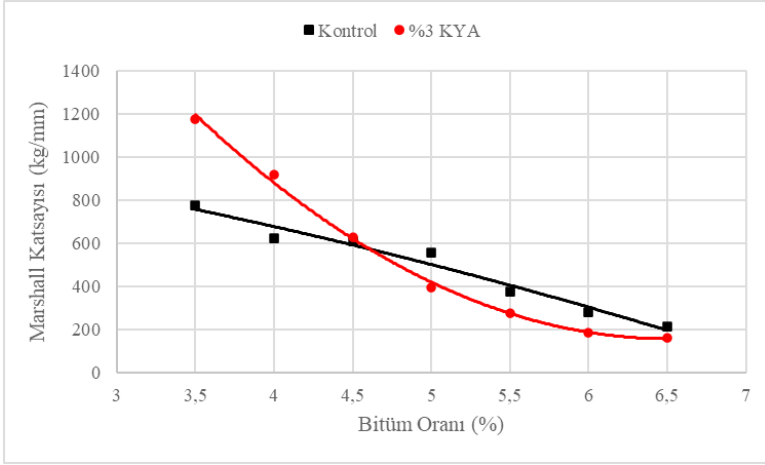
Şekil 6. Marshall stabilite – Bitüm oranı grafiği

Akma – bitüm oranı grafiği Şekil 7’de yer almaktadır. Tüm numunelerde bitüm oranı arttıkça akma değerleri de artmaktadır. %3 KYA katkılı bitüm numunelerinin akma değerleri kontrol bitüm numunelerine göre daha yüksektir. Bu durum, kayma gerilmesinin düşüp, agregaların birbiri üzerinden kaymasından kaynaklanmaktadır.



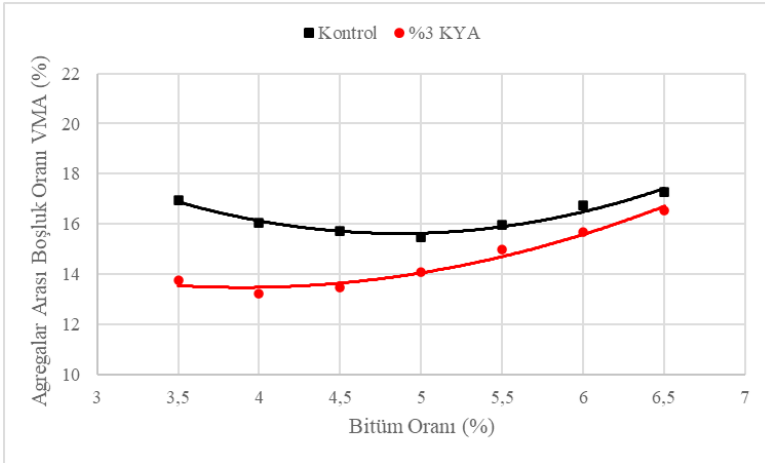
Şekil 7. Akma – Bitüm oranı grafiği

Marshall katsayısı grafik analizi Şekil 8 üzerinde yer verilmiştir. Bu grafik Marshall stabilite grafiği ile benzer sonuçlar göstermektedir. Bu oldukça doğal bir sonuçtur. Marshall katsayısı numunelerin rijitliğinin bir ölçüsüdür. Marshall stabilitesinin akma değerlerine oranı ile ifade edilir. İşlenebilirlik ve kayma direnci değerlerine bağlı olarak %5 oranından küçük bitüm oranlarında %3 KYA içeren numunelerin, %5 oranından büyük bitüm oranlarında ise kontrol numunelerinin rijitliği yüksek çıkmıştır.



Şekil 8. Marshall katsayısı – Bitüm oranı grafiği

Tüm numunelerde agregalar arası boşluk oranı değerleri genel olarak %13-14'lük sınır şartı değerlerini sağlamaktadır (Şekil 9).



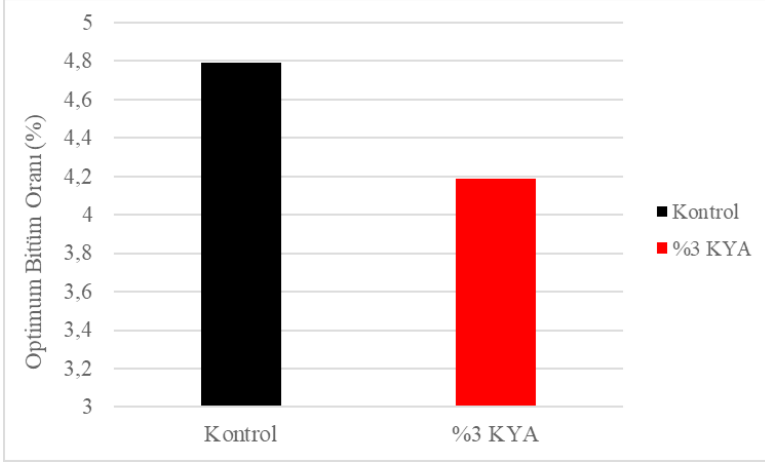
Şekil 9. Agregalar arası boşluk oranı – Bitüm oranı grafiği

Çizelge 5 içerisinde verilen Marshall Tasarım Kriterlerine (KTŞ 2013) [10] göre optimum bitüm oranları (OBO) tespit edildiğinde, elde edilen sonuçlar Şekil 10 üzerinde yer verilmiştir.

Kontrol bitüm numunelerinde OBO %4.79 iken,

%3 KYA katkılı bitüm numunelerinde OBO %4.19 olmaktadır.

Optimum bitüm oranının düşük çıkması arzu edilen bir sonuçtur.



Şekil 10. Optimum bitüm oranı grafiği

#### 4. SONUÇLAR

Önerilen çalışmada bitümün performansını arttırmak amacıyla kamyon, otomobil ve bitkisel yağ atığı kullanılmıştır. Bu atıklar ilk olarak laboratuvar çalışmalarında bitüme modifiye edilerek değerlendirilmiştir. Bu deneylerin analizi sonucunda, bitümün modifiyesinde yapılan ön çalışmalarda kamyon yağ atığı katkısının daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Başlangıçta yapılan deneyler, penetrasyon, duktilite, yumuşama noktası ve ince film ısıtma kaybı olmaktadır ve bu deneyler için %1, %3 ve %5 oranında kamyon, otomobil ve bitkisel yağ atığı ilave edilmiştir. Bitüme modifiye edilen atık yağ çeşitleri ve atık yağ oranları karşılaştırılmaktadır. %3 oranında atık yağ katkılı bitümden sonraki oranlar performans açısından değerlendirildiğinde sonuçlar daha düşük çıkmıştır. Hazırlanan %5 oranında atık yağ modifiyeli bitümlerin performans değerlendirmeleri daha düşük çıkması sebebiyle yapılan çalışmada, %3 kamyon yağ atığı ile ileri çalışmalara devam edilmiştir. %3 kamyon yağ atığı modifiyeli bitüm numuneleri ve kontrol numuneleri birbirleriyle karşılaştırılmalı olarak çeşitli grafiklerle değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme aşamasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

%3 kamyon yağ atığı içeren numuneler daha boşluksuz bir yapıya sahip olmuştur. Boşluksuz yapıya sahip olması dolayısıyla numunelerin pratik özgül ağırlıklarının da yüksek çıkmasını sağlamıştır.

Marshall stabilite değerleri, %5 bitüm oranına kadar KYA katkılı bitüm numunelerinde daha yüksek çıkmıştır. %5 bitüm oranından sonraki değerlerde ise bitümün daha fazla ilave edilmesi sonucunda numunelerin içerisindeki atık yağ miktarı artmıştır. Kamyon yağ atığı, bitüme kayganlık özelliği oluşturarak agregaların birbirlerinin üzerinden kaymalarına sebebiyet vermektedir. Bundan dolayı, Marshall stabilitesi %5 bitüm oranından sonra biraz daha düşük çıkmıştır. %5 bitüm oranından sonraki değerlerde, kamyon yağ atığı katkılı bitüm numunelerinin Marshall stabilitesi, kontrol numunelerine yakın sonuçlar göstermiştir.

Bitüm oranı yüzdesi arttıkça KYA modifiyeli bitüm numuneleri içerisindeki kamyon yağ atığı miktarı da giderek arttığı için akma değerleri kamyon yağ atığı katkılı numunelerde daha yüksek sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Marshall katsayısı, Marshall stabilitesinin akmaya oranı olarak tanımlanabilmektedir. Marshall katsayısı, numunenin rijitliğini ifade eden bir veridir. Marshall katsayısı grafiği, Marshall stabilitesi grafiği ile doğal olarak birbirine paralellik göstermektedir.

Kayma direnci, işlenebilirlik bağlamında KYA katkılı bitüm ve asfalt betonuna oldukça fazla avantajlar getirmektedir. Asfalt betonu maliyeti yüksek olan; agrega ve bitümün karışımından meydana gelen kompozit bir malzemedir. Agrega ve bitüm karışımında kullanılan bitüm malzemesi ekonomik açıdan oldukça yüksek maliyetlidir. Yapılan çalışma ile kullanılan bitümün, modifiye edilmesi sonucu optimum bitüm oranında azalma görülmektedir. Görsel ve çevresel kirliliğe sebebiyet veren bir atığın değerlendirilmesi düşüncesi ile yola çıkılmıştır. Deney sonuçlarının incelemeleri analiz edildiğinde KYA modifiyeli bitüm malzemesi asfalt betonunda kullanılabilir nitelikler taşıdığı görülebilmektedir. Yapılan çalışma ile KYA asfalt betonu üretiminde kullanılarak, sürdürülebilir çevre ve yaşam bağlamında önemli faydalar sağlanabileceği, ülkemizin kaynaklarının etkin kullanılabileceği öngörülmüştür.

**KAYNAKLAR**

- [1] Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- [2] Uljarević, M., & Šupić, S. (2016). Comparative analysis of flexible and rigid pavement design. 4th International Conference Contemporary achievements in civil engineering, Subotica, Serbia. 591-601.
- [3] Gschösser, F., Wallbaum, H., & Adey, B. T. (2014). Environmental analysis of new construction and maintenance processes of road pavements in Switzerland. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 10(1), 1-24.
- [4] Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., & Zou, X. (2021). Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 276, 122138.
- [5] Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F. (2020). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: A review. *Materials*, 13(7), 1495.
- [6] Miliutenko, S., Björklund, A., & Carlsson, A. (2013). Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden. *Journal of cleaner production*, 43, 156-165.
- [7] El-Shorbagy, A. M., El-Badawy, S. M., & Gabr, A. R. (2019). Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement. *Construction and Building Materials*, 220, 228-237.
- [8] Banerji, A. K., Chakraborty, D., Mudi, A., & Chauhan, P. (2022). Characterization of waste cooking oil and waste engine oil on physical properties of aged bitumen. *Materials Today: Proceedings*, 59, 1694-1699.
- [9] Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127936.
- [10] *Karayolları Teknik Şartnamesi*, (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara.
- [11] Lavin, P. G., (2003). *Asphalt pavements: a practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects*. Spon Press.
- [12] *Superpave Mix Design*. Superpave Series No. 2 (SP-2). Asphalt Institute.
- [13] Kaya, D., & Topal, A. (2016). Marshall ve Superpave Tasarım Yöntemleri Arasındaki Farklılıkların İlık Karışım Asfaltlar Açısından İncelenmesi. *CBÜ Fen Bil. Dergisi*, 12(2), 289-302.
- [14] Canpolat, M., Beycioğlu, A., Morova, N., Çetin, S., Çetin, H. M., & Gündoğan, H. (2022). Atık Olivin Mineralinin Asfalt Betonunda Filler Olarak Kullanımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(2), 555-566.

- [15] Karacasu, M. (2016). Yol Üstyapı Deneyleleri, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- [16] Kuiry, M., Karati, S., & Roy, T. K. (2023). Determination of Marshall parameters of bituminous mix by using non-destructive testing method. *Materials Today: Proceedings*.
- [17] Tan, E. H., Zahran, E. M. M., & Tan, S. J. (2022). The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process: A laboratory investigation using Marshall mix design. *Transportation Engineering*, 10, 100145.
- [18] Zoorob, S. E., & Suparma, L. B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt). *Cement & concrete composites*, 22(4), 233-242.
- [19] Zhu, J., Ma, T., Fan, J., Fang, Z., Chen, T., & Zhou, Y. (2020). Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121447.
- [20] Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskopu (FE-SEM). (2023). Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi. <https://arum.ogu.edu.tr/Sayfa/Index/80/alan-emisyonlu-taramali-elektron-mikroskopu-fe-sem>



## BÖLÜM 7

### DERİN ÇEKME İŞLEMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER<sup>1</sup>

*Vedat TAŞDEMİR<sup>2</sup>, Cebeli ÖZEK<sup>3</sup>*

---

1 Bu çalışma Vedat Taşdemir'in "Açılı derin çekme kalıplarında sıcaklığın limit çekme oranına etkisinin araştırılması" başlıklı Doktora tezinden üretilmiştir. Danışman: Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

2 Doç. Dr. Vedat Taşdemir, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, vedat.tasdemir@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2375-9525

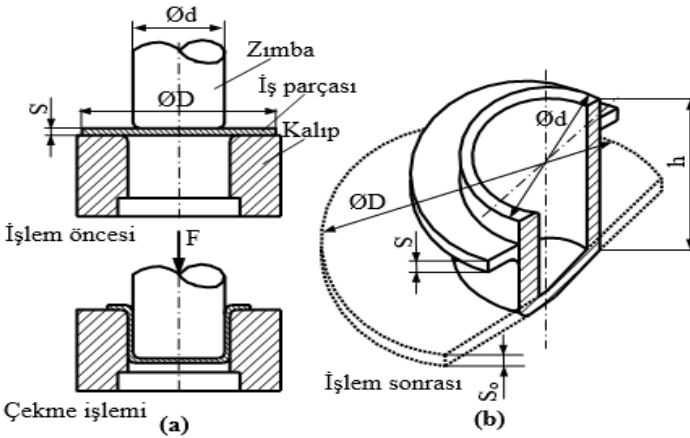
3 Prof. Dr. Cebeli Özek, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye, cozek@firat.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7603-415X

## 1. Giriş

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek için uygulanan ve dönüşüm işlemi sırasında kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan üretim yöntemlerine plastik şekil verme denir [1].

Derin çekme işlemi, metallere plastik şekil verme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biridir. Derin çekme, zımbanın mekanik hareketi ile sac metale kalıp şeklini veren bir sıkıştırma-germe işlemidir. Bu işlemle iki boyutlu, düzlemsel geometriye sahip iş parçasının çekme kalıbı yardımıyla presste çökertilmesi sonucunda belirli derinlik ve profillere sahip üç boyutlu parçalar elde edilir. Çekme yardımıyla elde edilmesi düşünülen kaplar birden fazla operasyon ile de oluşturulabilirler. Birbirini takip eden ve çok sayıda çekme işleminden oluşan bu imalat yöntemi derin çekme yöntemi olarak bilinmektedir [2-5].

Şekil 1’de, dairesel iş parçasından  $d$  çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmiştir.



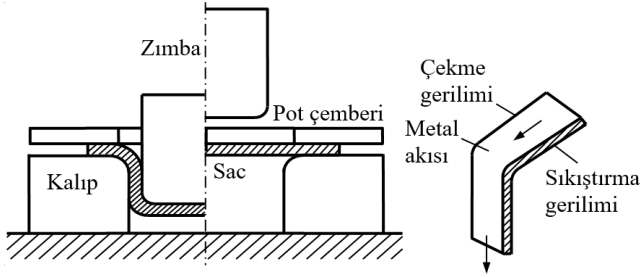
Şekil 1. Derin çekme işlemi, a. Şematik, b. Perspektif [6]

Şekilde görüldüğü gibi, başlangıçta  $s$  kalınlığı ve  $D$  başlangıç çapına sahip düzlemsel, metalik ve şekillendirilebilir bir levha,  $d$  çapındaki bir zımba yardımıyla kalıp (matris) içine çekilmek suretiyle, altı düz, silindirik bir parça haline getirilmektedir [6].

Çekme olayında zımbanın sac levhaya baskı yapması ile sac levha kalıp kenarlarındaki radyüsler (kalıp kavis yarıçapı) üzerine doğru eğilerek kalıp boşluğuna girmeye başlar. Zımbanın ileri hareketi ile sac levha zımba ile kalıp arasında halka şeklinde bulunan çekme boşluğundan kalıp içine doğru hareket ederek düz düşey duvar oluşturur. Son aşamada

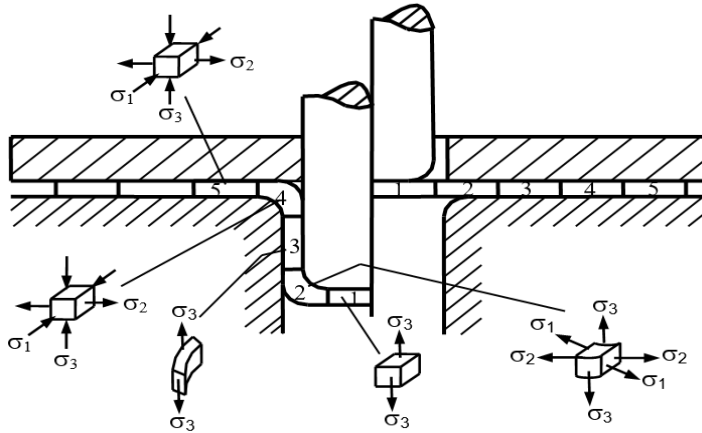


sac levhanın kalan kısmı radyal olarak akarak kalıp boşluğuna otururken, sac levhanın kalıp üstünde yani baskı plakasının altında kalan kısmı sürtünme kuvveti oluşturarak bu olayı engellemeye çalışır. Bunlar başlangıçtaki statik sürtünme kuvvetleri olup sac levha hareket etmeye başladığında bu kuvvetler azalır. Şekil 2’de ki gibi çekilmekte olan bir sac parçası için, sac levha radyal olarak akmaya başladığında kalınlığı azalmaya başlar ve geniş olan dış çevresi küçük olan kalıp çapına göre şekillenmeye başlayarak düşey duvarları oluşturur. Bu olay levha yüzeyinde dairesel sıkıştırma gerilimine sebep olur. Zımbanın ilerleyen hareketi ile sac levhanın büyük bir kısmı kalıp boşluğunda küçük dairesel flanş oluşturur. Şekil 2’de görüldüğü gibi düşey duvarlardan kalıp tabanına doğru gittikçe büyüyen tek eksenli gerilmeler oluşur.



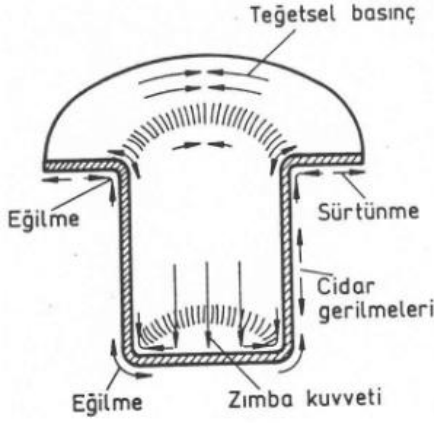
Şekil 2. Derin çekmenin mekaniği [68]

Derin çekme esnasında malzemenin plastik deformasyona zorlanması malzeme üzerinde birçok gerilmenin ortaya çıkmasına sebep olur. Bu durum Şekil 3’de verilmiştir. Çekme işleminin başarılı olması için malzemenin bu gerilmelere karşı dayanıklı olması gerekir [7-9].



Şekil 3. Derin çekme esnasında parçada boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [7]

Silindirik bir parçanın sac çekme yöntemiyle üretimi esnasında, parça içyapısında ortaya çıkan kuvvet ve gerilmeler Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler [3]

## 2. Derin çekme işlemini etkileyen faktörler

### 2.1. İşlem Değişkenleri

#### 2.1.1. Çekme Kuvveti

Çekilmesi istenen parçanın (kabın) çekme esnasında gösterdiği dirence çekme kuvveti denir. Çekme kuvveti aşağıdaki faktörlere bağlı olarak değişir:

- Çekilen parçanın ilkel çapına,
- Çekilecek parçanın büyüklüğüne,
- Sac kalınlığına,
- Çekilen sacın cinsine,
- Baskı plakası kuvvetine,
- Çekme hızına,
- Kalıp geometrisine,
- Çekme boşluğuna,
- Yağlama durumuna,
- Çekme derinliğine [10].

#### 2.1.1.1. Silindirik Parçalar İçin Çekme Kuvveti

##### a. İlk çekmede silindirik parçalar için çekme kuvveti

$$F_d = L \cdot S \cdot R_m \cdot k = \pi \cdot d \cdot S \cdot R_m \cdot k \quad [N] \quad (1)$$

Burada;

- $F_d$  : Çekme kuvveti [N],  
 $L$  : Çekme zımbasının çevresi [mm],  
 $d$  : Zımba çapı [mm],  
 $S$  : Sac kalınlığı [mm],

$R_m$  : Malzeme çekme dayanımı [ $N/mm^2$ ],

$k$  : Düzeltme faktörü.

Düzeltme faktörü  $k$ , gerilme dayanımı ve çekme gerilmesinin oranına bağlıdır. Temel olarak çekme parçasının boyutlarından gelen gerçek çekme oranına bağlıdır. Aşağıdaki Tablo 1' de düzeltme faktörü ve Tablo 2' de ise bazı derin çekme çeliklerine ait maksimum çekme dayanımı  $R_{m_{max}}$  verilmiştir [11, 12].

**Tablo 1.**  $d/D$  oranına bağlı olarak düzeltme (korreksiyon) faktörü,  $k$

$d/D$	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,72	0,75
$k$	1	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5
$d/D$	0,775	0,8	0,825	0,85	0,875	0,9	0,925	0,95	
$k$	0,45	0,40	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	

**Tablo 2.** Bazı derin çekme çeliklerine ait maksimum çekme dayanımı,

$R_{m_{max}}$

Malzeme	St 1303	St 1404	CuZn28	Al 99,5
$R_{m_{max}}$ ( $N/mm^2$ )	400	380	300 Derin çekme kalitesi	100 Orta sertlik

### b. İkinci çekmede silindirik parçalar için çekme kuvveti

$$F_{sec} = \frac{F_d}{2} + \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot R_m \cdot k \quad [N] \quad (2)$$

Burada;

$d_1$  : İkinci çekmedeki zımba çapı [mm].

Yuvarlak parçalar için tekli çekimde, maksimum çekme kuvveti

$F_U$  aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [13].

$$F_U = \pi \cdot (d_1 + S) \cdot S \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \left( \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \right) \quad [N] \quad (3)$$

Burada;

$d_1$  : Zımba çapı [mm],

$S$  : Sac kalınlığı [mm],

$R_m$  : Malzeme çekme dayanımı [ $N/mm^2$ ],

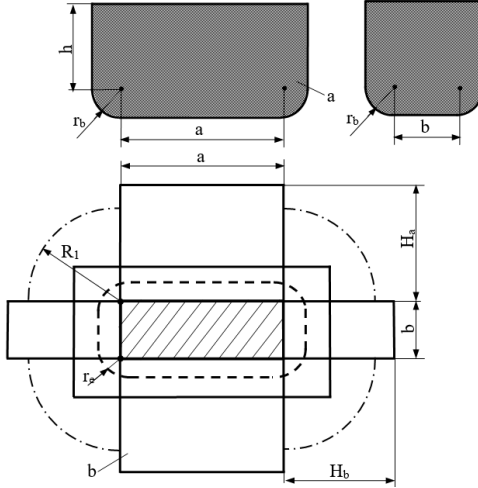
$\beta$  : Gerçek çekme oranı,

$\beta_{max}$  : Maksimum çekme oranı.

Maksimum çekme oranı, kullanılan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Kaba bir tahmin olarak, ilk çekmede  $\beta=2$  maksimum oranına sahip olarak hesaplanır [14].

### 2.1.1.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Çekme Kuvveti

Dikdörtgen bir parçanın sac çekme yöntemiyle üretiminin analizi için parça boyutları Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. Dikdörtgen kabın analizi [11]

$$F_d = \left( 2 \cdot r_e \cdot \pi + 4 \cdot \frac{(a+b)}{2} \right) \cdot S \cdot R_m \cdot k \quad [N] \quad (4)$$

Burada;

$F_d$  : Çekme kuvveti [N],

$d$  : Zımba çapı [mm],

$S$  : Sac malzeme kalınlığı [mm],

$R_m$  : Sac malzemenin çekme dayanımı [ $N/mm^2$ ],

$k$  : Katsayı,

$r_e$  : Köşe radyüsü [mm],

$a$  :  $r_b$  alt yarıçapı olmaksızın kabın uzunluğu [mm],

$b$  :  $r_b$  alt yarıçapı olmaksızın kabın genişliği [mm] [11].

### 2.1.2. Baskı Plakası (Pot Çemberi) Kuvveti (BPK)

Baskı plakası kuvvetinin büyüklüğü, çekme işleminde oluşan kırışmaları (ondülasyonu) önlemek için gereken en önemli faktörlerdendir. Bu kuvvet sayesinde malzeme akışı daha kontrollü olmaktadır. BPK'nin artmasıyla kalıp ile sac malzeme arasındaki tutunma kuvveti artar ve buna bağlı olarak sac malzemesinin yüzeyindeki gerilmeler de artmış olur.

Derin çekme işlemi için gerekli BPK aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilir.

$$F_{BH} = \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - (d + 2 \cdot r)^2] \cdot p \quad [N] \quad (5)$$

Genellikle, kalıp yarıçapı ve zımba ile kalıp arasındaki çekme boşluğu ihmal edildiği için, BPK'nin yaklaşık değeri, zımba çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [14].

$$F_{BH} \approx \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot p \quad [N] \quad (6)$$

Farklı malzemeler için baskı plakasının gerekli özgül basıncı, malzeme kalınlığı ve zımba çapına bağlı olarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$p = \left[ (\beta - 1)^2 + \frac{d}{200 \cdot S} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \quad [N/mm^2] \quad (7)$$

Burada;

- p : Baskı plakası basıncı [N/mm<sup>2</sup>],
- d : Zımba çapı [mm],
- D : İlk çap [mm],
- S : Sac malzeme kalınlığı [mm],
- R<sub>m</sub> : Sac malzemenin çekme dayanımı [N/mm<sup>2</sup>],
- β : Gerçek çekme oranı (ilk çekmede).

Baskı plakası kuvvetinin yetersiz olması halinde katlanmalar meydana gelir. Gereğinden büyük baskı plakası kuvveti ise yırtılmalara neden olur [1].

### 2.1.3. Çekme Hızı

Derin çekme işleminde zımbanın plastik deformasyona başladığı andaki hızına çekme hızı denir. Çekme hızının çekme olayına etkisi üzerindeki çalışmalar henüz kesin kurallara bağlanmamıştır ve deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmektedir. Çekme hızı, çekilen malzemenin fiziksel özellikleri ve şekil değiştirmesini önemli ölçüde etkilemektedir [15, 16]. Tablo 3'de, silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları verilmiştir. Çekme işleminde anormal durumlarla karşılaşmamak için (yırtılma vb.) malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verilmelidir [12].

Çekme hızı değerinin tespiti aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir.

$$V = 33,3 \cdot \left( 1 + \frac{d}{2} \cdot \sqrt{D - d} \right) \quad [mm/s] \quad (8)$$

Mekanik preslerde, piston hızı presin kursu boyunca değişkendir. Hidrolik preslerde ise, piston hızı kurs boyunca sabit kaldığı için kurs boyunca sabit kuvvet uygulamak mümkündür [16].

Mekanik preslerde hız aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$V = 0,105 \cdot n \cdot \sqrt{h \cdot (H - h)} \quad [\text{mm/s}] \quad (9)$$

Burada;

V : İş kursunun hızı [mm/s],

H : Kurs yüksekliği [mm],

h : Çekmeye başlanan yerden alt ölü noktaya olan mesafe [mm],

n : Krank mili devir sayısı [dev/dk],

**Tablo 3.** Silindirik çekmelerde malzemelerin cinsine göre çekme hızları [17]

Malzeme Cinsi	Çekme hızı (m/dk)	
	Tek etkili	Çift etkili
Alüminyum	56	33
Alüminyum Alaşımları	–	10 – 12
Pirinç	66	33
Bakır	50	28
Çelik	20	10 – 18
Çinko	50	15

#### 2.1.4. Limit Çekme Oranı (LÇO)

Derin çekme kalıplarının tasarımında göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktörlerden biri de limit çekme oranıdır. Üretilecek olan parçanın kaç kalıpta imal edilebileceği, sacın çekme oranıyla yakından ilişkilidir [18]. Limit çekme oranı ( $\beta$ ), yırtılmadan ideal şekilde çekilebilecek en büyük dairesel iş parçası çapının (D), bu işlemi gerçekleştirebilmesi öngörülen zımba çapına (d) oranı, şeklinde tarif edilir [19]. Limit çekme oranı;

$$\beta = \frac{D}{d} \quad (10)$$

şeklinde gösterilir.

Bu değer, malzemelerin derin çekilebilirliğinin ifadesidir. Malzemelerin çatlak başlangıcından önce maksimum hangi çapa kadar çekilebileceğini açıklar [20]. Bu oran, taslak malzeme büyüklüğünün artması ile artar. Bu sebeple, tek operasyonlu çekme işlemlerinde istenilen çekme derinliğine ulaşılmasında çekme oranı limiti göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktördür. Çekme oranı limiti, sac

malzemelerin çekilebilirliklerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

İlk çekme için izin verilen en büyük limit çekme oranı  $\beta$ , zımba çapının sac kalınlığına oranına bağlı olarak Tablo 4 yardımıyla belirlenir.

**Tablo 4.** Zımba çapı ve sac kalınlığına bağlı olarak ortalama  $\beta$  değerleri [11]

d/S	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
$\beta$	2.1	2.05	2.0	1.95	1.9	1.85	1.8	1.75	1.7	1.65	1.60	1.5

Gerçek limit çekme oranı daima  $\beta_{\text{gerçek}} \leq \beta$  olmalıdır.

#### 2.1.4.1. Silindirik Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

Çekme işlemi esnasında, zımba kuvvetinden dolayı çekilen parçanın cidarlarında çekme gerilmeleri meydana gelir. İlkel parça çapı ile zımba çapı arasındaki fark ne kadar büyük olursa bu gerilmeler de o kadar büyük olur. Parçada meydana gelecek olan bu aşırı gerilmeler, deformasyona ve yırtılmaya yol açacaktır. Bu nedenle çapları belirli bir oran dâhilinde azaltmak gereklidir. Kademe oranının ( $m$ ) tespitinde, ilkel parça çapı, sac kalınlığı, malzeme kalitesi dikkate alınmalıdır [12].

$$1. \text{ çekme: } d_1 = \frac{D}{\beta_0} = D \cdot m \quad (11)$$

$$2. \text{ çekme: } d_2 = \frac{d_1}{\beta_1} = d_1 \cdot m_1 \quad (12)$$

$$3. \text{ çekme: } d_3 = \frac{d_2}{\beta_1} = d_2 \cdot m_1 \quad (13)$$

$$n. \text{ çekme: } d_n = \frac{d_{n-1}}{\beta_1} = d_{n-1} \cdot m_1 \quad (14)$$

Silindirik çekmelerin kademelendirilmesinde (çekme sayısı hesabında) kullanılan “Hubert” eşitliği aşağıda verilmiştir [11].

$$n \cong \frac{h_n}{d_n} = \frac{D^2 - d_n^2}{4 \cdot d_n^2} \quad (15)$$

Burada;

$n$  : Gereken çekme sayısı

$h_n$  :  $n$ 'inci çekim sonrası kap yüksekliği [mm],

$d_n$  :  $n$ 'inci çekim sonrası kap çapı [mm],

$D$  : İlkel parça çapı [mm].

Tablo 5’de, çeşitli malzemeler için kademelendirme katsayısı ( $m$ )’nin malzeme cinsine bağlı olarak değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.** Çeşitli malzemeler için kademelendirme katsayısı [1]

Malzeme	Baskı plakalı çekme		Baskı plakasız çekme
	m	m <sub>1</sub>	m = m <sub>1</sub>
Çelik sac	0,56	0,80	0,90....0,93
Pirinç, bakır, gümüş	0,50	0,75	"
Çinko	0,75	0,91	"
Alüminyum	0,55	0,80	"
Paslanmaz çelik	0,60	0,80	"

### 2.1.4.2. Dikdörtgen Parçalar İçin Derin Çekme Adımları

Dikdörtgen parçalar için derin çekme adımları, tasarım yarıçapı  $R_1$  ve malzeme sabit  $q$  değerlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır. Derin çekme sacları için  $q \approx 0,3$  alınır.

$$1. \text{ çekme: } r_1 = 1,2 \cdot q \cdot R_1 \quad (16)$$

$$2. \text{ çekme: } r_2 = 0,6 \cdot r_1 \quad (17)$$

$$3. \text{ çekme: } r_3 = 0,6 \cdot r_2 \quad (18)$$

$$n. \text{ çekme: } r_n = 0,6 \cdot r_{n-1} \quad (19)$$

Başka bir deyişle tıpkı ilkel parça boyutlarının belirlenmesi gibi, kap tabanı temel dikdörtgeni ve köşe yarıçapının belirlendiği varsayılır [11].

Silindirik derin çekme işleminde kullanılan dairesel iş parçası çapının, bu işlemde kullanılacak zımbanın çapına tekabül eden limit çekme oranını aşacak değerler alması durumunda, parça yırtılarak hasara uğrar. İş parçasının başlangıç çapı büyüdükçe çekme işlemini gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan zımba kuvveti de artmaktadır. Şekil 6'da görülmekte olan bu türdeki bir hasar genellikle kabın yan duvar (veya cidar) kısmında ve zımba yuvarlatma yarıçapının başlangıç bölgesinde ortaya çıkmaktadır [6]. Şekil 7'de de çekme oranının aşılması sonucu parçada meydana gelen yırtılma görülmektedir.



**Şekil 6.** Silindirik iş parçasında limit çekme oranının araştırılması sonucu ortaya çıkan hasar [21]





**Şekil 7.** Çekme oranının büyük olmasından dolayı parçada meydana gelen yırtılma [18]

Derin çekme işlemi ile ilgili yapılan araştırmaların temel amacı sacın çekilebilirliğini, yani çekme derinliğini arttırabilmektir. Çekme derinliği, sacın ilkel çapı ve zımba çapı ile ilgilidir. Bu nedenle limit çekme oranının arttırılması, bir defada üretilebilecek maksimum çekme derinliğini de arttırmaktadır. Ayrıca limit çekme oranı sacın yapısal özellikleri ile ilgili olduğundan her sacın limit çekme oranı farklıdır [18].

### 2.1.5.Çekme Boşluğu

Dişi kalıp ile erkek arasındaki tek taraflı boşluğa çekme boşluğu denir. Bu büyüklüğün belirlenmesinde göz önüne alınan temel husus, çekme işlemi sırasında parçanın üst bölgelerinde ortaya çıkan malzeme yığılması kökenli kalınlaşmadır. Bu nedenle zımba ve kalıp arasındaki boşluk nominal sac kalınlığının belirli bir miktar üzerinde seçilir [15].

Çekme işleminde çekme boşluğunun az olması, sürtünmenin artmasına, ısı oluşumuna ve takımın aşınmasına fazla olması ise yumuşak malzemelerde çekilen parça cidarının bozulmasına, ince malzemelerde buruşmalara yol açar. Bu nedenle zımba ile kalıp arasında belirli toleranslarda bir boşluk bulunmalıdır.

Çekme boşluğunu çekmenin metoduna ve takımın yapısına bağlı olarak değerlendirmek gerekir. Çekilecek malzemenin kalınlık (s) değişiminin belirli sınırlar içinde kalması gerekmektedir.

Çekme boşluğunun (c) belirlenmesinde kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir [3].

$$\text{Çelik için} \quad c = S + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot S} \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

$$\text{Alüminyum için} \quad c = S + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot S} \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

$$\text{Demir olmayan metaller için} \quad c = S + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot S} \quad [\text{mm}] \quad (22)$$

Çekme boşluğunun bulunması için kullanılabilecek bir diğer eşitlik de aşağıda verilmiştir.

$$c = S \cdot (1 + 0,01 \cdot R_m \cdot (\beta - 1)^3) \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

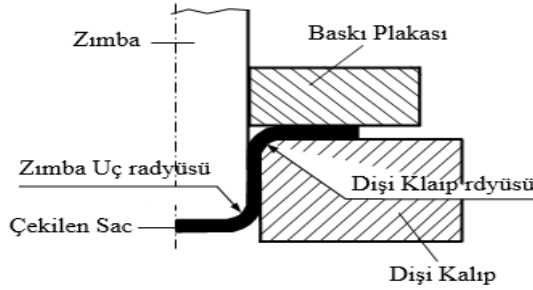
Çekme boşluğu değerlerinin tespit edilmesinde pratik olarak aşağıdaki Tablo 6 kullanılmaktadır.

**Tablo 6.** Çekme boşluğu değerleri [3, 22]

Malzeme Kalınlığı	İlk Çekme	Ara Çekme	Son Çekme
<0,4	(1,07-1,09)·S	(1,08-1,10)·S	(1,04-1,05)·S
0,4-1,3	(1,08-1,10)·S	(1,09-1,12)·S	(1,05-1,06)·S
1,3-3,2	(1,10-1,12)·S	(1,12-1,14)·S	(1,07-1,09)·S
>3,2	(1,12-1,14)·S	(1,15-1,20)·S	(1,08-1,10)·S

### 2.1.6. Kalıp Geometrisi

Bir sacın biçimlendirilmesinde zımba radyüsü en önemli parametrelerden biridir. Zımba radyüsünün küçük olması, bir sac üzerindeki keskin hatların iyi bir şekilde elde edilmesi için arzu edilen bir özelliktir. Fakat böyle keskin hatlar birim şekil değişimi artışını bir yerde toplayacağı için imalatta zorluklar ortaya çıkartır ve hata olasılığını arttırır. Bu ise sacın çatlamasına veya yırtılmasına sebep olur [15]. Zımba ucu radyüsü ve dişi kalıp radyüsü Şekil 8’de gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Zımba ucu ve kalıp radyüsü [3]

Çekme işleminde sac malzemenin kalıp içerisine akışını kolaylaştırmak için zımba ve dişi kalıp radyüslerinin mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerektiği düşünülmektedir. Ancak, gereğinden büyük tutulmuş zımba ve dişi kalıp radyüslerinde, baskı plakası etki yüzeyi küçüleceğinden, sac malzemenin takımla temas etmeyen yüzeyi

büyümekte ve parça üzerinde istenmeyen kırışıklıklar oluşmaktadır [23, 3]. Kalıp radyüsü için önerilen değer aralıkları Tablo 7’de verilmiştir.

**Tablo 7.** Kalıp radyüsü için önerilen değerler [3]

Malzeme kalınlığı (mm)	Kalıp radyüsü (mm)	
	En az	En fazla
0,4	4	6,5
0,5	4	7
0,6	5	7
0,7	5	7
0,8	5	8
1	5	8
1,3	6	9
1,4	6	9
1,5	6	9
1,6	6,5	10

Kalıp yarıçapının bulunması için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$r_k = 0,035 \cdot [50 + (D - d)] \cdot \sqrt{S} \quad (24)$$

Burada;

$r_k$  : Kalıp radyüsü [mm],

$D$  : İlkel parça çapı [mm],

$S$  : Sac malzeme kalınlığı [mm],

$d$  : Zımba çapı [mm] olarak verilmiştir.

İlave çekme işlemlerinde  $(D-d)$  yerine  $(d_{n-1}-d_n)$  kullanılmakta, 0.035 katsayı değeri ise 0.08 ‘e kadar artırılabilir.

Küçük zımba radyüsü cidar zayıflaması etkisi göstermektedir. Cidar zayıflaması sonucu, parça tekrar çekme işlemlerindeki gerilmelere dayanamamakta ve yırtılmaktadır. Baskı plakalı çekme işleminde, başarılı bir çekme gerçekleşmesi için kalıp ve zımba radyüsleri arasında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır [3, 24].

$$\frac{S}{D} \cdot 100 > 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = r_k \quad (25)$$

$$0,3 < \frac{S}{D} \cdot 100 < 0,6 \quad \text{ise} \quad r_z = 1,5 \cdot r_k \quad (26)$$

$$\frac{S}{D} \cdot 100 < 0,3 \quad \text{ise} \quad r_z = 2 \cdot r_k \quad (27)$$

Burada;

$r_z$  : Zımba ucu radyüsü [mm],

Pratik uygulamalarda, zımba ucu radyüsü sac malzeme kalınlığının 3 ile 10 katı arasında alınır. Dişi kalıp radyüsü ise, sac malzeme kalınlığının 10 katı veya üzerindeki bir değerde seçilir.

### 2.1.7. Yağlama

Derin çekmede yağlama, zımba kuvvetini düşürmesi, derin çekme oranı sınırını yükseltmesi, takım aşınmasını azaltarak ömrünü uzatması ve üretim kusurlarını önlemesi bakımından önem taşır [64]. Yağlama, malzeme ve takım arasındaki sürtünmeyi azaltmayı amaçlar. Böylece şekillenmeye karşı göstereceği direnç azaltılmış olur. Yağlama iş parçasının takımdan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla da kullanılır. Ayrıca yüksek basınçlardaki derin çekme işleminde seçilen yağ kalıp ve iş parçasını soğutmalıdır [3, 25]. Yağlama için kullanılacak maddelerde aşağıdaki genel özelliklerin bulunması gerekir.

- Yağlama maddesinin meydana getirdiği yağ filmi, homojen olmalı ve yüksek basınçlarda yırtılarak kuru sürtünmeye sebep olmamalıdır.
- Yağlama maddesi malzeme yüzeyini iyi ısıtmalı (yapışmalı) ve bütün yüzeylere homojen olarak dağılmalıdır.
- İş parçası üzerindeki yağ tabakası operasyondan sonra kolayca temizlenebilmelidir.
- Yağlama maddesi takım ve malzeme yüzeyinde kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar meydana getirmemelidir.
- Yağlama maddesinin bileşimi kararlı olmalı ve sağlığa zararlı etkileri bulunmamalıdır.
- Yağlama özelliğini kullanılan operasyon sıcaklığında kaybetmemeli, zararlı etkileri bulunabilecek duman ve gaz çıkarmamalıdır.
- Yağlama maddesinin temini kolay ve ucuz olmalıdır [3].

Pratikte dolgu maddeli dediğimiz, içinde grafit talk (magnezyum silikat), tebeşir (kalsiyum karbonat),  $MoS_2$  (Molibden disülfid) vs. gibi katkılı yağlarla, dolgu maddesiz çok çeşitli yağlama maddeleri kullanılmaktadır. Tecrübeler, dolgu maddesiz yağlama maddelerinin, dolgu maddeli yağlar kadar yağ filmi kararlılığına sahip olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda dolgu maddeli yağlarda sürtünmenin diğerine nazaran 2 ile 3 kat daha az olduğu, bu sebepten takım ömrünün uzadığı görülmektedir. Tablo 8' de yağlama maddelerinin cinsine göre sürtünme katsayılarının değerleri görülmektedir.

**Tablo 8.** Yağlama maddesine göre çekme işlemindeki sürtünme katsayıları [26]

Yağlama maddesi	Çekilen malzeme		
	Çekilen sac	Alüminyum	Al Alaşımı
Dolgu maddesiz makine yağı	0,14 – 0,16	0,15	0,16
Dolgu maddeli makine yağı	0,06 – 0,10	0,10	0,08 – 0,10
Kuru çekme	0,18 – 0,20	0,25	0,22

Çekme işlerinde kullanılabilecek yağlama maddeleri çeşitli malzemeler için Tablo 9 ve 10’ da verilmiştir.

Yağlama maddesinin kullanılması ile ilgili birkaç öneriyi aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- İlkel pulun yağlama maddesine daldırılarak bütün yüzeylerinin yağlanması tavsiye edilmemektedir.
- İlkel pulun yalnızca çekme kalıbına bakan tarafı belli aralıklarla yağlanmalıdır.
- Malzemenin zımba boyunca kayarak cidar incelmeye uğrayacağı düşünülerek ilkel pulun baskı plakasına bakan tarafının yağlanmaması iyidir.
- Parçanın taban ile zımba alın yüzeyi arasındaki sürtünmeyi artırmak için zımbanın alın yüzeyinin parlatılmaması gerekir. Malzeme, zımba alın yüzeyinden kolayca kayarsa kavis bölgesinde malzeme incelmesi daha fazla olacak ve malzemenin çekmede yırtılması kolaylaşacaktır.
- Malzeme ile takım elemanları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, malzemenin kırılmaya olan eğilimini artırır. Bu sebepten  $S/D < 0,3$  gibi düşük malzeme kalınlığı oranlarında ilk çekme operasyonunda yağlama yapılmaması tavsiye edilir. Fakat takım aşınmalarını ve iş parçası yüzey bozukluklarını önlemek için dışı kalıp kavis bölgelerinin yağlanması gerekir.
- Bir üstteki maddede açıklanan öneriler ince saclardan yarım küre ve benzeri şekilli parçaların çekimleri içinde uygulanmalıdır.
- Magazine doldurularak otomatik besleme yapılan küçük boyutlu ilkel pulların yağlanması besleme esnasında pulların birbirlerine yapışmalarına sebebiyet verebileceğinden, yağlama yapılmaması iyidir. Bu durum takım aşınmalarını artırır ve çekme oranını fena yönde etkiler.

Yüksek şekillendirme basınçları ve şekillenme dereceleri gerektiren işlerde “fosfatlama” tabir edilen uygulamada sıklıkla başvurulan yağlama çözümlerindedir [3].

**Tablo 9.** Düşük karbonlu çeliklerin çekimlerinde kullanılabilir yağlama maddeleri [3]

Yağlama maddesinin bileşimi	Ağırlık oranı %	AÇIKLAMALAR
Makine yağı Balık yağı Grafit Yağ asidi Kükürt Yeşil sabun Su	43 8 15 8 5 6 15	Uygun nitelikli yağlama maddeleridir. Kükürt bileşimine toz halinde ilave edilmelidir.
Makine yağı Hint yağı Balık yağı Tebeşir Yağ asidi Sudkostik Su	33 1,5 1,2 45 5,5 0,7 12	Büyük boyutlu parçaların yağlanmasında kullanılan bu yağlama maddesi iş parçasından kolayca temizlenebilir.
Yeşil sabun Su	20 80	60 – 70 °C de erir. İş parçasından kolayca temizlenebilir. Yarım küre çekmeler gibi operasyonlarda kullanılır.

**Tablo 10.** Çeşitli malzemelerin çekimlerinde kullanılabilen yağlama maddeleri [3]

Çekilen malzeme	Yağlama maddesi
Alüminyum, Al alaşımları	Bitkisel yağ (soda yağı), vazelin, pul grafit ile gaz karışımı, parafin
Bakır, Bronz	Bitkisel yağ ve suda eritilmiş sert sabun karışımı (1:1), pul grafit karıştırılmış mazot, soda ilaveli veya ilavesiz koyu sabunlu su
Nikel ve Alaşımları	Kalın sabun çözeltisi (NaOH, KOH) ile yağ karışımı
Paslanmaz çelik	Su ile grafit bulamacı, %10 kükürt ilave edilmiş kalın bezir yağı ile üstübeç karışımı (Zehirlidir)
Çinko ve Alaşımları	Don yağı ile pul grafit karışımı

Yapılacak operasyona ve çekilecek malzemeye uygun çekme yağlarının sanayi yağ üreticilerinden hazır alınması çoğu zaman daha başarılı olabilir.

## 2.2. Malzeme Değişkenleri

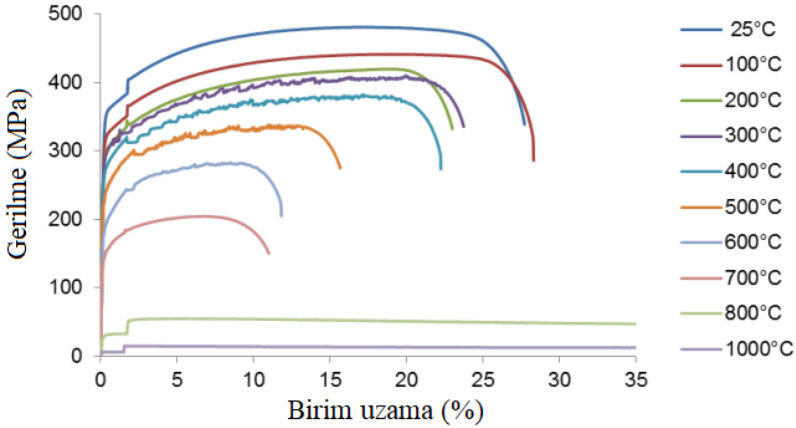
### 2.2.1. Sıcaklığın Etkisi

Malzeme şekillendirme işlemleri soğuk (oda sıcaklığında), yarı sıcak (ılık) ve sıcak olarak yapılabilir. Malzemelerin mutlak erime sıcaklığı,  $T_e$  ve şekillendirme sıcaklığı ise  $T$  ile gösterilirse;

$T < 0,3 \cdot T_e$  ise soğuk şekillendirme,  
 $0,3 \cdot T_e \leq T \leq 0,5 \cdot T_e$  ise ılık (yarı sıcak) şekillendirme,  
 $T > 0,6 \cdot T_e$  ise sıcak şekillendirme olarak  
 adlandırılır.

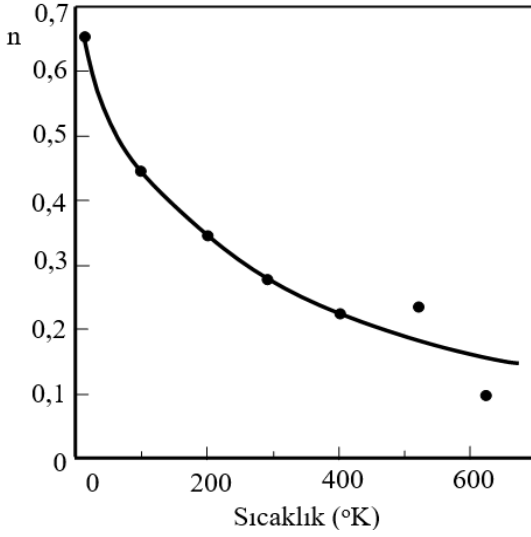
Soğuk şekillendirme ile malzemelerin kristal ve tane yapısı sürekli olarak bozulur, sertlik ve pekleşmesi (dayanım değeri) artarken, süneklik ve elektrik iletkenliği ise azalır. Bundan dolayı malzemeleri şekillendirmek için gerekli olan kuvvet ve iş de artar. Ayrıca malzemelerin sünekliğindeki azalma malzemenin istenilen şekli almadan hasara uğramasına neden olabilir.

Oda sıcaklığının üzerinde fakat yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan yarı sıcak (ılık) işleminde yeniden kristalleşme görülmez ancak soğuk şekil değiştirmeye göre daha küçük şekil verme kuvveti gerekir ve malzemenin şekillendirme esnasında hasara uğrama tehlikesi azalır. Aşağıda Şekil 9'da sıcaklığın gerilme-birim uzama üzerindeki etkisi mühendislik çekme diyagramında gösterilmiştir.



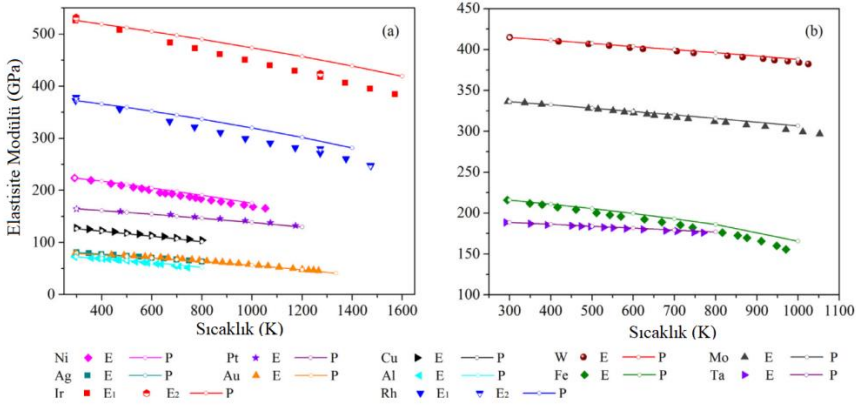
Şekil 9. Sıcaklığın mühendislik çekme diyagramına etkisi [27]

Sıcak şekil verme ise yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde yapıldığı için şekillendirme esnasında bozulan yapı hemen hemen yeniden kristalleşir. Genelleştirme yapmak bir dereceye kadar zor olsa da sıcaklığın yükselmesi çoğunlukla sünekliği ve tokluğu arttırır. Ayrıca sıcaklığın etkisi ile elastikiyet modülü, çekme dayanımı ve akma sınırının düşmesi sıcak şekil verme işleminin soğuk şekil verme işlemine kıyasla daha küçük bir kuvvetle yapılabilmesini sağlar. Şekil 10'da sıcaklığın pekleşme üsteline etkisi gösterilmiştir.



Şekil 10. Sıcaklığın pekleşme üsteline etkisi [1]

Bunun yanı sıra pekleşme üsteli “n” de sıcaklıktan etkilenir. Sıcaklığın yükselmesi pekleşme üstelinin düşmesine sebep olur. Bu da şekillendirme esnasında dayanım artışının önüne geçerek şekillendirmeyi kolaylaştırır. Yani presleme kuvvetini azaltır [1, 28]. Şekil 11’de sıcaklığın elastisite modülüne etkisi gösterilmiştir.



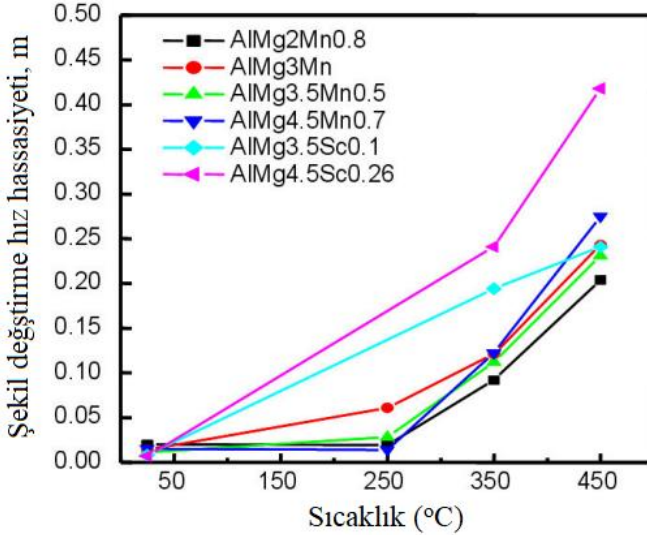
Şekil 11. Sıcaklığın elastisite modülüne etkisi [29]



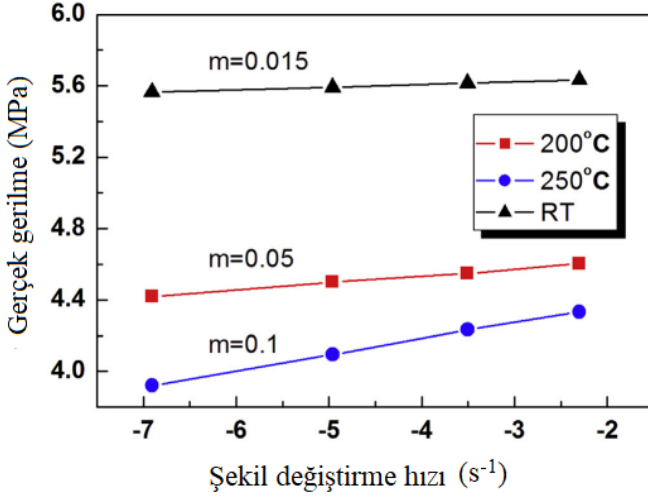
## 2.2.2. Birim Şekil Değiştirme Hızı ve Hız Duyarlılığı İndeksinin Etkisi

Yüksek sıcaklıkta deformasyon işlemini etkileyen parametrelerden biri de gerinim (birim şekil değiştirme) hızı hassasiyet indeksidir [28].

Birim şekil değiştirme hızı hassasiyeti gerilim dağılımına yardım eden önemli özelliklerden biridir. Birim şekil değiştirme duyarlılığı katsayısı “m” pozitif ve yüksek olan malzemelerde boyun verme olayından sonraki şekil değiştirme miktarı artar. Bu tür malzemelerde boyun verme bölgesindeki plastik gerilme artışı ile boyun verme olayının komşu bölgelere yayılması sağlanır. Böylece kalınlık incelmesinin sadece bir bölgede yoğunlaşmayıp tüm malzemede üniform olarak gelişmesi sağlanır [15]. Çeşitli malzemelerin şekil değiştirme hızı hassasiyet indeksi Şekil 12’de ve sıcaklık parametre olmak üzere şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi ise Şekil 13’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, sabit sıcaklıkta şekil değiştirme hızının artması malzemenin dayanımını arttırmaktadır. Bu olaya şekil değiştirme sertleşmesi de denebilir.



Şekil 12. Şekil değiştirme hızı hassasiyeti üzerine sıcaklığın etkisi [30]



Şekil 13. Şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi [31]

Ayrıca şekil değiştirme hızının çekme dayanımına etkisi oda sıcaklığında nispeten az, yüksek sıcaklıkta ise oldukça yüksektir.

Şekil değiştirme hızının dayanıma etkisi, sabit sıcaklık ve birim şekil değiştirme miktarı için genel olarak;

$$\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot |\epsilon_T| \quad (28)$$

bağıntısı ile ifade edilir.

Burada;

$\sigma$  : Plastik gerilme veya akma gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>),

$C$  : Malzeme sabiti (N/mm<sup>2</sup>),

$m$  : Şekil değiştirme hızı duyarlılığı indeksi,

$\dot{\epsilon}$  : Gerçek deformasyon hızı (s<sup>-1</sup>), olarak verilmiştir.

“ $m$ ” değeri  $\log \sigma$ - $\log \dot{\epsilon}$  diyagramlarından elde edilir ve çizilen doğrunun eğimidir. Eğimin 45<sup>0</sup> olması  $m=1$  anlamındadır. Sıcaklığın yükselmesi “ $m$ ” değerinin artmasına yol açar ve dolayısı ile malzemenin dayanımı şekil değiştirme hızına daha duyarlı hale gelir. Soğuk şekillendirmede  $m < 0.05$ , sıcak şekil vermede  $m = 0.05-0.4$ , süperplastik malzemeler için ise  $m = 0.3-0.85$  arasındadır [1].

### 2.2.3. Pekleşme Katsayısının (Deformasyon Sertleşmesi Üssü) Plastik Şekil Değişimine Etkisi

Bir malzemenin taneleri çarpılmış durumda ise, o malzemenin soğuk şekil değişimine uğradığı kabul edilir. Soğuk şekil değiştirme malzemenin kafes yapısına bağlı olan bütün özelliklerini etkiler [86].

Bir sacın soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliği, gerilme artışı sonucu meydana gelen deformasyon ile pekleşmesidir. Pekleşme deformasyondan dolayı mukavemetteki artış olarak da tanımlanabilir [20]. Pekleşme özelliği yüksek olan malzemelerin deformasyona uğramış bölgeleri incelendiğinde dislokasyon yoğunluğu artışı sebebiyle bu bölgenin deformasyona karşı koyduğu görülür. Bu durumda uygulanan gerilme altında deformasyon komşu bölgelere doğru yayılarak sacda üniform bir incelmeye meydana getirir. Eğer malzemenin pekleşme özelliği düşükse, incelmeye belli bir bölgede başlar ve hızla o bölgede yoğunlaşır. Sonunda o bölgede hasar oluşur [15].

Çekme testinde üniform birim şekil değişimi, maksimum yükteki birim şekil değişimi olarak adlandırılır ve sacın pekleşme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Pekleşmenin diğer bir ölçüsü ise pekleşme katsayısı “n” dir [15].

Deneyssel olarak elde edilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine çok uyan bazı ampirik denklemler geliştirilmiştir [1].

Bunlardan ilki;

$$\sigma_g = K \cdot \epsilon^n \quad (29)$$

şeklindeki “Holloman” denklemdir [32].

Ancak burada  $\epsilon=0$  alınırsa  $\sigma_g = 0$  olur. Bu sebeple bu denkleme

$\sigma_a$  eklenmiş ve yeni denklem;

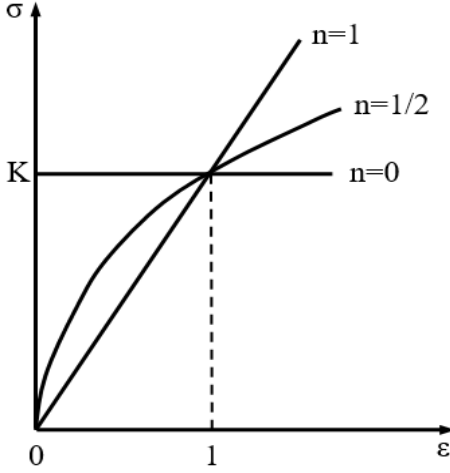
$$\sigma_g = \sigma_a + K \cdot \epsilon^n \quad (30)$$

şeklindeki “Ludwing” denklemini almıştır.

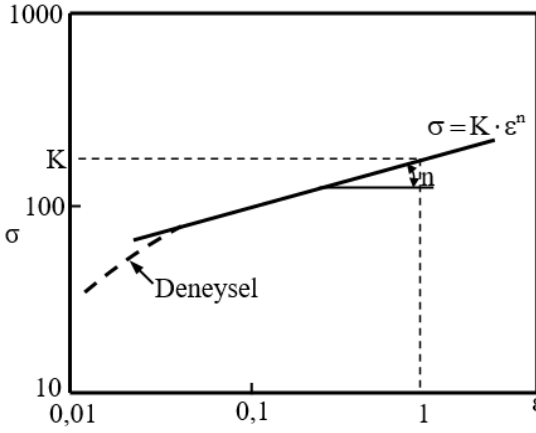
Burada;

- $\sigma_g$  : Gerçek gerilme ( $N/mm^2$ ),
- $\sigma_a$  : Akma gerilmesi ( $N/mm^2$ ),
- K : Mukavemet katsayısı ( $N/mm^2$ ),
- $\epsilon$  : Gerçek birim şekil değiştirme,
- n : Pekleşme katsayısı dır.

Aşağıda Şekil 14’de pekleşme katsayısının gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine etkisi ve Şekil 15’de ise logaritmik koordinatlarda gerçek çekme diyagramı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, deformasyon sertleşmesi üssü, tam plastik malzemeler için  $n=0$ , tam elastik malzeme için  $n=1$  değerindedir. Çoğu malzemelerin pekleşme katsayısı  $n=0-0,5$  arasındadır.



Şekil 14. Pekleşme üstelinin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirmeye etkisi ( $\sigma_g = K \cdot \epsilon^n$ ) [1]



Şekil 15. Logaritmik koordinatlarda gerçek çekme diyagramı [1]

Aşağıda Tablo 11'de, çeşitli malzemelerin tavllanmış durumdaki K ve n değerleri verilmiştir.

**Tablo 11.** Tavlanmış durumdaki çeşitli malzemelerin K ve n değerleri [33]

Malzeme	Pekleşme üssü, n	Mukavemet katsayısı, K (MPa)
% 0.8 C içeren çelik	0.25	600
% 0.15 C içeren çelik	0.18	620
% 0.45 C içeren çelik	0.12	950
302 kalite paslanmaz çelik	0.3	1300
410 kalite paslanmaz çelik	0.1	960
Bakır	0.33	450
Pirinç (70 Cu/30Zn)	0.41	500
Muntz metal (60 Cu/40 Zn)	0.5	800
1100 alüminyum alaşımı	0.25	140
2017 alüminyum alaşımı	0.15	380
5052 alüminyum alaşımı	0.13	210
7075 alüminyum alaşımı	0.17	400

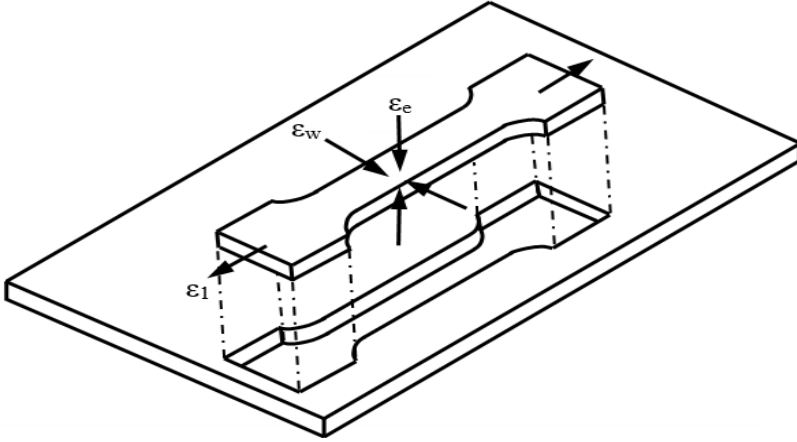
#### 2.2.4. Anizotropinin Etkisi

Özelliklerin doğrultuya bağlı olması anlamına gelen “anizotropi” sacların şekillendirilmesinde önemli bir faktördür [1]. Şekil 16’da, dikey anizotropi parametresi (R), tanımlanmıştır. Anizotropinin üç önemli kaynağı vardır. Bunlar;

1. Tek kristallerde olduğu gibi doğuştan veya orijinal anizotropi,
2. Plastik deformasyon öncesi ve deformasyona bağlı kazanılmış anizotropi,
3. Son yapısal anizotropi [20].

Bir sac kristalografik yönlenmeden dolayı farklı yönlerde ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) farklı anizotropi değerlerine sahip olabilir [15]. Plastik anizotropi (R); genişlikteki birim şekil değiştirmenin kalınlık yönündeki şekil değiştirme oranı olarak verilir.

$$R = \frac{\text{Genişlik gerinimi}}{\text{Kalınlık gerinimi}} = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_e} = \frac{\ln(W/W_0)}{\ln(e/e_0)} \quad (31)$$



Şekil 16. Dikey anizotropi parametresi

Genişlik yönündeki şekil değişiminin, kalınlık yönündeki şekil değişimine oranı “dikey anizotropi parametresi” olarak da anılır. Pozitif bir sayı olan dikey anizotropi sayısının fiziksel anlamı;  $R > 1$  olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir. Aksi halde  $R < 1$  olur. İzotropik bir malzemede ise  $R = 1$ 'dir [1].

Sac malzemelerde “R” nin haddeleme yönüne göre farklı değerler verdiğini bilmekteyiz. Bu nedenle elde edilen farklı dikey anizotropi katsayılarının ortalaması alınır [15]. Bu da aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}}{4} \quad (32)$$

Ortalama dikey anizotropi katsayısı “R” derin çekilebilirliğin bir ölçüsü olduğu için  $R > 1$  olması istenir. Böylece malzeme kalınlığında fazla incelmeye olmadan, birim şekil değiştirme büyük oranda sac düzleminde oluşacak ve şekillendirme başarıyla sonuçlanacaktır.

Derin çekme işleminde dikey anizotropi katsayısı istenmekle beraber, “düzlemsel anizotropi -  $\Delta R$ ” aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmakta ancak istenmemektedir. Bunun sebebi ise kulak oluşumuna yol açmasıdır.  $\Delta R$  büyüdükçe kulak oluşumu da artar [1, 15].

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2 \cdot R_{45} + R_{90}}{2} \quad (33)$$

Çelik sacın plastik deformasyon özellikleri, derin çekmenin önemli parametrelerinden haddeleme yönü ve plastik anizotropi ile ilgilidir. Normal anizotropi incelemeye karşı sacın dayanımını belirlediği için deforme olmuş sacın anizotropik özellikleri iyi belirlenmelidir. Bu özellikleri belirlemek ve iyileştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan biri de sacların ılık/sıcak şekillendirilmesidir. Malzemelerin haddeleme geçmişi ve anizotropi özelliği sadece sac ısıtıldığında ortadan kalkar. Bundan dolayı da deformasyon esnasında sacdaki umulmadık hatalar azalır. Böylece malzeme mukavemetindeki azalma ve malzemenin anizotropi özelliğinin ortadan kalkması yırtılma ve buruşma hataları olmaksızın daha yüksek derin çekme oranlarına ulaşılabilir [28].

### 2.2.5. Malzeme Tane Boyutunun Etkisi

Saclarda tane büyüklüğü malzemelerin mekanik özelliklerine ve ürünün yüzey görünümüne etkileri bakımından büyük önem taşır.

Tane büyüklüğünün belirlenmesi için, mikroskop vasıtası ile belirli bir alandaki tane adedi veya büyütülmüş bir fotoğrafta rastgele çizilmiş belirli bir uzunluktaki bir doğrunun kestiği tane adedi sayılır. Genel olarak plastik şekil verilecek saclarda ASTM tane büyüklüğü numarası (n) 7 (1024 tane/mm<sup>2</sup>) veya malzemenin daha ince taneli olması istenir. İnce taneli malzemelerde  $5 \leq n \leq 8$  olmalıdır.

Oda sıcaklığında tane büyüklüğü arttıkça akma sınırı, çekme dayanımı ve sertlik düşer süneklik ise artar. Ayrıca iri taneli bir metal plastik şekil değiştirdikten sonra yüzeyi portakal kabuğu görünümünde pürüzlü olur. Bu nedenle iri taneli saclar derin çekme, gererek biçimlendirme, bükme gibi şekil verme işlemlerine uygun değildir [1].

### 2.2.6. Kalıntı Gerilmelerin Etkisi

Birçok plastik şekil verme ve yüzey işleme yönteminde, malzemenin üniform olmayan bir şekilde biçim değiştirmesinden dolayı, şekillendirmeyi sağlayan kuvvetler kalktıktan sonra iş parçasının içinde var olmaya devam eden gerilmelere “kalıntı (artık) gerilme” denir [1. 34].

Kalıntı gerilmelerin denge hali çeşitli plastik şekil verme yöntemleri (talaşlı ve talaşsız imalat) ile bozulabilir. Bu takdirde gerilmeler yeni bir denge dağılımı meydana getirir. Bu da malzemenin eğilmesi veya çarpılmasına neden olabilir. Benzer şekilde iç gerilmeleri bulunan bir malzemeye silindirik delikler açıldığında deliklerin ovalleştiği görülebilir. Ayrıca bir parçadaki kalıntı gerilmelerin dengesi, belli bir süre sonra gerilme gevşemesi (rölaksasyon) sonucunda da bozulabilir. Parçalarda şekil ve boyut kararsızlığına yol açan bu durum kullanım yerine göre önemli bir sorunun kaynağı olabilir.

Üniform olmayan plastik şekil değişiminden başka, kalıntı gerilmelerin oluşumuna neden olan bir diğer sebep de parça içindeki sıcaklık gradyanlarıdır. Yani bir parçanın ısı işlem veya döküm sonrasındaki soğuması sırasında kalıntı gerilmeler oluşabilir.

Kalıntı gerilmelere neden olan bir diğer etken de faz değişimleridir. Bu durum özellikle ılık ve sıcak şekil değiştirmede önem kazanır. Fazlar arasındaki yoğunluk farkı mikroyapıda değişimlere yol açarak kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olur.

Saçların şekillendirilmesi esnasında yüzeyde meydana gelen çekme kalıntı gerilmeler, giderilmediği takdirde, gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir [1, 15].

Kalıntı gerilmelerdeki küçük değişimler bir parçanın ömründe önemli bir etki yapabilir. Bu etkilerin önemini anlamak ve bir parçanın olası performansını değerlendirmek için parça içindeki kalıntı gerilmelerin seviyesinin bilinmesi gerekir [15, 34].

### 3. Sonuç

Derin çekilebilirliğin en önemli ölçütlerinden biri limit çekme oranı (LÇO)'dır. LÇO'daki artış deney parametrelerinin doğru bir şekilde tespitine bağlıdır. Kalıp geometrisi, şekillendirme sıcaklığı, kullanılan yağlayıcı, malzeme özellikleri vb. faktörler malzemenin kalıp boşluğu içerisine akışını kolaylaştırmalı ve neticesinde de hasarsız kaplar üretilmelidir. Tek seferde hasarsız ve yüksek boyutlu kapların üretilmesi üretim maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Görüleceği üzere derin çekme işlemini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörlerin göz önüne alınması üretilecek ürün kalitesi açısından önemlidir.



## Kaynakça

- [1] Çapan, L., 2010. Metallerde Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [2] Ethiraj, N., Senthilkumar, V. S., 2010. Experimental Investigation on Warm Deep Drawing of Stainless Steel AISI 304, Applied Mechanics and Materials, Vol. 26-28, pp 436-442.
- [3] Güneş, A.T., 2002. Pres İşleri Tekniği Cilt 2, Makine Mühendisleri Odası, Ankara.
- [4] Özek, C., Ünal, E., 2011. Optimization and modeling of angular deep drawing process for square cups. Mater. Manuf. Process. 26, 1117–1125.
- [5] Savaş, V., Seçgin, Ö., 2010. An experimental investigation of forming load and side-wall thickness obtained by a new deep drawing die. Int. J. Mater. Form. 3, 209–213.
- [6] Topaç, M. M., 2003. Karbonlu Çeliklerde Derin Çekmeye Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [7] Demiray, K., 2006. Al 1050 Malzemesinin Derin Çekme İşleminde Baskı Plakasının Etkisinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [8] Seçkin, Ö., 2005. DKP Sac Çeliğinin Derin Çekilmesinde Matris Yüzey Açılı Değişiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [9] Özek, C., Ünal, E., 2012. The effect of die / blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups. J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. 27, 615–622.
- [10] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 2006. Makine Teknolojisi, Çekme Kalıpları-I, Ankara.
- [11] Tschaetsch, H., 2006. Metal Forming Practise, Processes–Machines–Tools, Springer, Germany.
- [12] Ataşımşek, S., 1977. Kesme, Delme ve Biçimlendirme Kalıpları, Bursa.
- [13] Gunnarsson, L., Asnafi, N. and Schedin E., 1998. In-process control of blank holder force in axi-symmetric deep drawing with degressive gas springs, Journal of Materials Processing Technology, 73, 89-96
- [14] Altan, T., 1998. Metal Forming Handbook, Schuler Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- [15] Özçelik, G., 2008. Derin Çekme İşleminin Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [16] Gürün, H., 2008. Derin Çekme Kalıplarındaki Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Bulanık Mantık İle Tahmini, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [17] Uzun, İ., ve Erişkin, Y., 2002. Sac Metal Kalıpcılığı, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, Ankara.
- [18] Aytaç, F., 2007. Matris Açılı Derin Çekme Kalıplarında Alüminyumun Derin Çekilmesinde Açık Değişiminin Çekme Oranı Üzerine Etkisinin Deneysel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [19] Schey, J. A., 2000. Introduction to Manufacturing Processes, New York: McGraw Hill Companies Inc.
- [20] Ay, İ., İmalat Yöntemleri-II ders notları, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- [21] Çapan L., 1979. Derin Çekmede Allotropi, Doçentlik Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi.
- [22] Simith, A. D., 1990. Die Design HandbookI, Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 10,1-12,43.
- [23] Ünal, E., 2011. Kare Kesitli Kapların Derin Çekilmesinde Kalıp Geometrisi ve Radyüsünün Çekme Oranına Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [24] Erişkin, Y., 1986. Uygulamalı Sac Metal Kalıp Konstrüksiyonu, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, Ankara.
- [25] Schumann, M. L. and Simoes, D., 2001. Choosing a Lubricant for Deep Drawing, www.thefabricator.com.
- [26] Romanowski, W. P., Handbuch der Stanzeitechnik VEB Verlag Technik/Berlin.
- [27] Manninen, T., Säynäjäkangas, J., 2012. Mechanical Properties of Ferritic Stainless Steels at Elevated Temperature. Proc. Fourth Int. Expert. Semin. Stainl. Steel Struct. 4th, 1–15.
- [28] Erdin, M. E., Aykul, H. ve Tunalioglu, Ş., 2005. Forming of High Strength/Low Formability Metal Sheets at Elevated Temperatures, Mathematical and Computational Applications, Vol. 10, No. 3, pp 331-340.
- [29] Li, W., Kou, H., Zhang, X., Ma, J., Li, Y., Geng, P., Wu, X., Chen, L., Fang, D., 2019. Temperature-dependent elastic modulus model for metallic bulk materials. Mech. Mater. 139, 103194.
- [30] Hirsch, J., Brünger, E., Keller, S., Amborn, P., Kipry, K., 2015. Hot forming of Al-Mg-Mn alloys for light-weight car design.
- [31] Jiang, J., Bi, G., Wang, G., Jiang, Q., Lian, J., Jiang, Z., 2014. Strain-hardening and warm deformation behaviors of extruded Mg-Sn-Yb alloy sheet. J. Magnes. Alloy. 2, 116–123.
- [32] Savaşkan, T., 2009. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Celepler Matbaacılık, Trabzon.
- [33] Dieter, G. E., 1988. Mechanical Metallurgy SI Metric Editions, McGraw-Hill Book Company, Singapur.

- [34] Yiğit, O., Dilmeç, M., Halkacı, S., 2008. Tabaka Kaldırma Yöntemi ile Kalıntı Gerilmelerin Ölçülmesi ve Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması, Mühendis ve Makine, Cilt 49, Sayı 579.