

2023  
Aralık

Mühendislikte  
Araştırma ve  
**DEĞERLENDİRMELER**

**EDİTÖR**  
Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ

**İmtiyaz Sahibi • Yaşar Hız**  
**Genel Yayın Yönetmeni • Eda Altunel**  
**Yayına Hazırlayan • Gece Kitaplığı**  
**Editörler • Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ**

**Birinci Basım • Aralık 2023 / ANKARA**

**ISBN • 978-625-425-424-6**

© copyright  
Bu kitabın yayın hakkı Gece Kitaplığı'na aittir.  
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan  
hiçbir yolla çoğaltılamaz.

**Gece Kitaplığı**  
**Adres:** Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak Ümit Apt  
**No:** 22/A Çankaya/ANKARA Tel: 0312 384 80 40

[www.gecekitapligi.com](http://www.gecekitapligi.com)  
[gecekitapligi@gmail.com](mailto:gecekitapligi@gmail.com)

**Baskı & Cilt**  
**Bizim Buro**  
**Sertifika No: 42488**

# Mühendislikte Araştırma ve Değerlendirmeler

Aralık 2023

Editör:  
Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ



# İÇİNDEKİLER

## BÖLÜM 1

### PLASTİKLERİN ULTRASONİK KAYNAK YÖNTEMİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

*Güldenur HAM, Ahmet DEMİRER* .....1

## BÖLÜM 2

### BURDUR - ACIGÖL BÖLGESİNİN OTOKTON VE ALLOKTON BİRİMLERİ, FAYLARI VE SİSMOTEKTONİĞİ

*Murat ŞENTÜRK* .....31

## BÖLÜM 3

### MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARIN DÜNÜ BUGÜNÜ

*Gülşah ÖNER*.....63

## BÖLÜM 4

### EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ ÜZERİNE YENİ BİLGİLER

*GÜLŞAH ÖNER* .....81

## BÖLÜM 5

### KURU SÜRTÜNMELİ YATAKLARIN ÜRETİMİ VE ENDÜSTRİDEKİ KULLANIMI

*Kadir GÜNGÖR, Ahmet DEMİRER* .....93

## BÖLÜM 6

### ALGORITMA PARAMETRE SEÇİMİNİN MİKRODALGA TRANSİTÖRÜNÜN OPTİMİZASYON PROBLEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

*Ahmet Arif ULUSLU* .....115

## BÖLÜM 7

### FAZ GEÇİŞLİ DAVRANIŞIYLA VO<sub>2</sub> İÇERİKLİ TERMOKROMİK CAM KAPLAMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Lale CİVAN, Semra KURAMA* .....127

## BÖLÜM 8

### 3-D BASKILI VE DONATILI BETONLARIN MALZEME ÖZELLİKLERİNDEKİ SON GELİŞMELER VE ANALİZLERİ

*Sadık Alper YILDIZEL* ..... 153

## BÖLÜM 9

### BİTKİSEL ATIK KÜLÜNÜN YAPI MALZEMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ

*Aylin AKYILDIZ* ..... 169

## BÖLÜM 10

### YAPILARDA 3 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ

*Aylin AKYILDIZ* ..... 179

## BÖLÜM 11

### PASTIRMA VE SUCUK ÖRNEKLERİNDEN İZOLE EDİLEN LAKTİK ASİT BAKTERİLERİNİN BAZI FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

*Özlem ERTEKİN* ..... 193

## BÖLÜM 12

### GIDALARDAKİ ISIL İŞLEM TOKSİKANTLARI: KLOROPROPANOLLERİN OLUŞUM MEKANİZMALARI, ANALİZ YÖNTEMLERİ VE SAĞLIK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

*Elif EKİZ* ..... 209

## BÖLÜM 13

### YAPAY ZEKÂ TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE KARACİĞER KANSERİNİN TESPİTİ

*Aylin AKYILDIZ* ..... 229

## BÖLÜM 14

### KOMPOZİT MALZEME ÇEŞİTLERİ UYGULAMA ALANLARI VE GELECEKTEKİ DURUMU ÜZERİNE ARAŞTIRMA

*Abdülhadi KOŞATEPE* ..... 243

BÖLÜM 15

**A356 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA DEMİR DİFÜZYONU,  
DÖKÜM SICAKLIĞI VE SIVI METAL TEMİZLİĞİNİN AKICILIĞA  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

*Mehmet GAVGALI, Murat ÇOLAK, Melek DURMUŞ .....263*

BÖLÜM 16

**OTONOM ARAÇLARDA KULLANILAN SENSÖRLERİN  
İNCELENMESİ**

*Mustafa NAMDAR, Arif BAŞGÜMÜŞ, Ferhat AĞAÇ .....281*





# PLASTİKLERİN ULTRASONİK KAYNAK YÖNTEMİ VE ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

*Güldenur HAM<sup>1</sup>*  
*Ahmet DEMİRER<sup>2</sup>*

---

1 “POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ULTRASONİK KAYNAK YÖNTEMİYLE KAYNAK KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ” adlı yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yüksek Makina Mühendisi, Farba Otomotiv A.S.

2 Doç. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mühendislik Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

## GİRİŞ

Endüstriyel gelişmeler mühendislik malzemelerinde kolay şekillen-  
dirilebilen, hafif, aşınma direnci yüksek, maliyeti düşük, çevreye uygun  
malzemelerin kullanılmasına yöneltmektedir. Polimer ve polimer kom-  
pozit malzemelerin kullanımı bu nedenle yaygınlaşarak, metal, seramik,  
ahşap vb. farklı özelliklere sahip malzemelerin yerini almaktadır. Bu mal-  
zemelerin birleştirilmeleri için çoğu zaman kaynaklı bağlantılar karşımıza  
ıkmaktadır. Bu kaynaklı bağlantıların içerisinde otomasyona yatkın seri  
ve hızlı oluşu, aynı zamanda estetik görsellik açısından avantaj sağlayan  
ultrasonik kaynak tekniği ön plana çıkmaktadır.

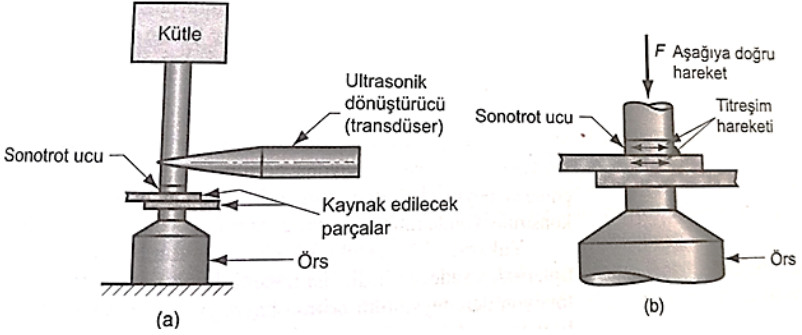
Termoplastik malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve  
bazen de fiyatını düşürmek maksatlı olarak katkı maddeleri kullanılmak-  
tadır. Katkı maddeleri arasında, cam elyaf katkılı kompozitler önemli  
mühendislik malzemelerindedir. Cam elyaf katkılar maliyetinin polimere  
göre düşük olması ve de özellikle çok iyi özgül sertlik ve mukavemet ka-  
zandırması nedeniyle en fazla tercih edilen kompozitlerdir (Demirer, 2022;  
Ishikawa vd., 2018).

Gelecekteki mühendislik uygulamaları için çok önemli olan termo-  
plastik kompozitlerin mekanik performanslarının arttırılmasına, karmaşık  
ve büyük yapıların imalatındaki sınırlamalar nedeniyle uygun birleştirme  
tekniklerinin geliştirilmesine önem verilmelidir (Goto, Imai, Arai, ve  
Ishikawa, 2019; Demirer, 2023). Ultrasonik kaynak yöntemi kısaca UK  
(Ultrasonic welding-UW), iki parçanın düşük bir sıkıştırma kuvveti ile  
bir arada tutulduğu ve birleşmenin sağlanması için ara yüzeye ultrason-  
ik frekansta titreşimli kaynak gerilmelerinin uygulandığı bir katı hal kay-  
nak yöntemidir (şekil 1) (Groover, 2015). Seri retim potansiyeli, kısa  
işlem süreleri ve enerji tasarrufu özellikleri ile cazip ve düşük maliyetli bir  
birleştirme yöntemidir (Palardy, Shi, Levy, Le, ve Villegas, 2018). Kaynak  
işlemi sırasında ara yüzeye viskoelastik sürtünme oluşturmak için sonotrot  
(horn) aracılığıyla sıkıştırılan malzemenin üst yüzeyine yüksek frekanslı  
titreşimler uygulanır (Tao vd., 2019; Zhang vd., 2010).

Ultrasonik kaynak, temel olarak titreşim ve katılaşma olarak iki  
aşamada gerçekleşir. Titreşim fazı; kaynak basıncı, kaynak süresi ve ti-  
treşim genliğinden etkilenirken, katılaşma fazı bekleme sresinden etkile-  
nir (Villegas, 2014).

Parçalar arasındaki titreşim hareketi, yüzeyde mevcut olan herhangi  
bir yüzey filmi kırarak parçalar arasında sıkı temas sağlar ve bu sayede  
yüzeyler arasında kuvvetli bir kovalent bağ oluşur. İşlem esnasında ara  
yüzeyde sürtünme ve plastik deformasyon sonucunda ısınma meydana  
gelse de sıcaklık plastik parçanın ergime derecesinin bir miktar altındadır.  
Bu yöntemde bazı kaynak türlerindeki gibi dolgu malzemesi, curuf yapıcı

(dekapan) ya da koruma gazı da kullanılmamaktadır (Demirer, 2023; Groover, 2015).



Şekil 1. Ultrasonik Kaynakta Genel Bindirme Kaynağı (a), Kaynak Bölgesi (b) (Groover, 2015).

### Literatür Araştırması

Polimer malzemelerin ultrasonik kaynak yöntemiyle birleştirilmesi alanında literatürlerde farklı çalışmalar mevcuttur. Bunlardan bazıları şunlardır;

Syed ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada ABS polimer malzeme ve bunun ultrasonik kaynak yönteminde kaynak parametrelerinin optimizasyonu araştırılmış ve enerji yönlendirici (EY) ile uygulanan birleştirmelerde yarım daire ve üçgen formlar kullanılmıştır. Aynı bindirmeli kaynak uygulaması Polipropilen (PP) malzemelerin kaynağı ile de gerçekleştirilmiştir. Hem ABS hem de PP için, en yüksek kayma mukavemeti yarı dairesel EY yerine üçgen formlu EY'li numunelerde elde edilmiştir. ABS'nin kaynağında, uygulanan basınç, genlik ve tutma süresinin kayma mukavemetini arttırmak için önemli faktörler olduğu; PP de ise genlik ve kaynak süresinin kaynak mukavemeti için daha fazla etkin parametreler olduğunu ifade etmişlerdir.

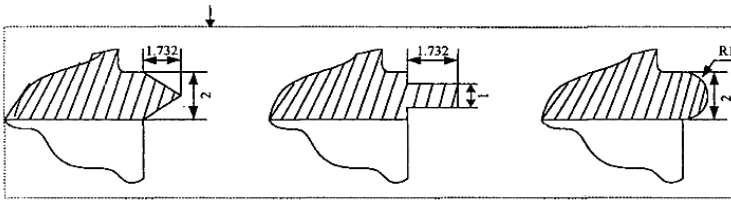
Demir Ahmet (2019) yaptığı çalışmada katkı PP malzemeye %10 talk dolgusu (TD) ilave edilmiş ve plastik numuneler farklı kaynak parametreleri seçilerek ultrasonik kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin mekanik dayanım değerleri test edilmiştir. Optimum kaynak parametrelerinin tespit edilmesi ile görsel problemler ortadan kaybolmuş, kopma dayanım değerleri artmış ve proses kararlı hale gelmiştir.

Zengguo ve diğerlerine göre (2022), yaptıkları çalışmada, ultrasonik kaynak (UK) ile 4.0 mm kalınlığında %30 karbon elyaf takviyeli poliamid6 (PA6) kompozitinin farklı çaplardaki horn ile nokta kaynağının kaynak kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bulunan kaynak kalitesi normal (düz) kaynak tekniği ile de karşılaştırılmıştır. Üç farklı horn çapı

(Ø23, Ø28 ve Ø33mm) seçilen nokta kaynak tekniği ile birleştirilen kompozit malzemenin kaynak mukavemeti incelenmiştir. Tüm ultrasonik kaynak bağlantıları, 2.1 saniyelik bir kaynak süresi ve 0.15 MPa'lık bir kaynak basıncı altında imal edilmiştir. Horn çapı arttıkça bağlantı mukavemeti ve kaynak boyutu önce artmış, Ø33 çapında horn da ise azalmıştır. Ø28mm çapında yapılan kaynaklar en yüksek bağlantı mukavemeti sergilemiştir. Nokta kaynak ile yapılan ultrasonik kaynağın mukavemet değeri normal (düz) kaynak yöntemine göre bir miktar daha yüksek olsa da bağlantıların kozmetik görünümü tercih edilmemesine neden olduğu belirtilmiştir.

Uzun ve Turan'a göre (2018), yayımladıkları çalışmada, %30 cam elyaf takviyeli PP kompozit malzemelerin ultrasonik yöntemle birleştirilmesinde enerji yönlendirici türünün ve tasarımının, birleştirme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. %30 cam elyaf takviyeli PP kompozitten üretilmiş otomotiv radyatör fan paneli ve üstüne konulan su tankı parçası, UK yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynak işleminde üçgen, kare ve dikdörtgen şekilli olmak üzere üç farklı enerji yönlendirici kullanılmıştır. En uygun enerji yönlendirici tür ve ebadını belirlemek amacıyla şişirme testi uygulanmıştır. Deneysel çalışmaların sonunda, 3 mm genişliğinde ve 3 mm derinliğindeki kare şekilli enerji yönlendirici açılmış numunenin en yüksek dayanım basıncını gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Yew ve ark. (2000), yaptıkları çalışmada, ultrasonik kaynak yönteminde enerji yönlendirici uygulamasının kaynak hızını ve kaynak kalitesini artırdığını belirtmişlerdir. İki tip termoplastik (ABS ve PE) ve üç tip yani üçgen, dikdörtgen ve yarım daire enerji yönlendiricileri kullanılarak "uzak alan ultrasonik kaynağı" tekniği ile deneysel sonuçlarını incelemişlerdir (Şekil 2).

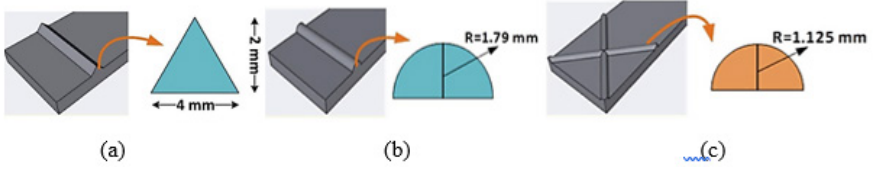


**Şekil 2.** Enerji Yönlendirici şekilleri (Yew, Liang, Chang, ve Shih, 2000).

Kaynak süresinin, çalışılan üç tip enerji yönlendirici için ultrasonik kaynağın önemli bir parametresi olduğunu ifade etmişlerdir. Sürenin artması kaynak verimini arttırmıştır. Kaynak basıncını artırmak ise ABS için kaynak verimliliğini azaltırken, PE için kaynak basıncı ilk etapta kaynak verimini artırmış sonraki yüksek basınçlarda ise azaltmıştır. Fakat kaynak basıncının daha fazla artması, kaynak verimliliğinin düşmesine neden olmuştur. Tutma süresinin ise ultrasonik kaynak verimliliği üzerinde ihmal edilebilir etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Enerji yönlendirici şek-

linin kaynak verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Karşılaştırma sonunda aynı kaynak şartlarında en yüksek kaynak verimini yarım daire; en düşüğünü ise üçgen şeklin verdiği belirtilmiştir (Yew, Liang, Chang, ve Shih, 2000).

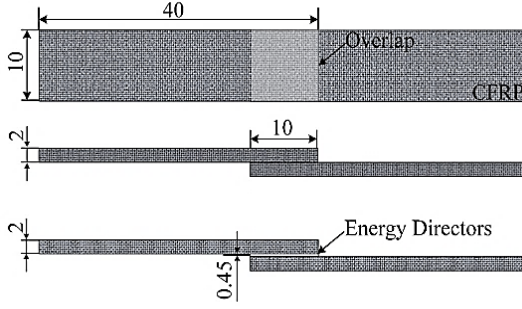
Ram ve arkadaşları (2022), çalışmalarında, dolgu yoğunluğunun, üç farklı enerji yönlendirici (üçgen, yarım daire ve çapraz) tipinin ve farklı kaynak parametrelerinin mekanik davranışlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ultrasonik kaynak için numuneler, Polilaktik asit (PLA) malzemeden üç farklı dolgu yoğunluğunda (%80, %90 ve %100) 3D baskı teknolojisi ve enjeksiyon kalıplama kullanılarak üretilmişlerdir. 3D baskılı parçaların ortak performansını aynı malzemeden enjeksiyonla kalıplanmış numunelerle de karşılaştırmışlardır. Tüm numuneleri iki farklı teknikte yani 3D yazıcıdan ve enjeksiyonla kalıplama ile enerji yönlendirici olarak (üçgen, yarım daire ve çapraz) üretilmişlerdir (Şekil 3).



**Şekil 3.** Enerji Yönlendiricileri (a) Üçgen (b) Yarım daire (c) Çapraz (Ram, Inderdeep, ve Apurbba, 2022).

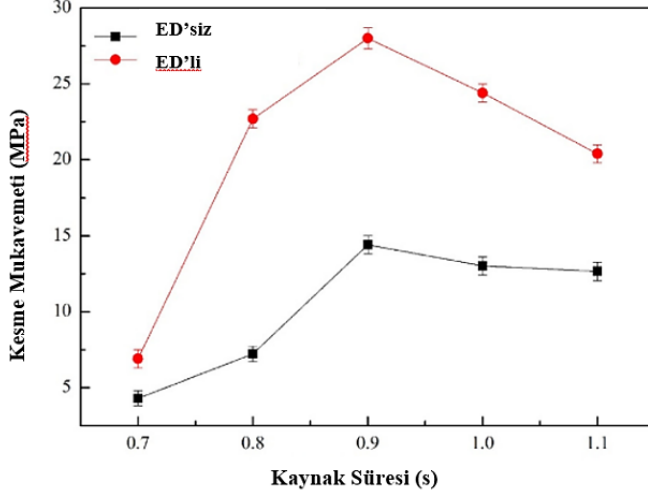
Çapraz yönlendirici açılmış numunelerin, tüm 3D baskılı ve enjeksiyon baskılı, üçgen, yarım daire ve yönlendiricisiz eşdeğer numunelerden daha yüksek kopma dayanım değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Tüm enjeksiyon baskılı EY'li ve EY'siz numunelerinin, 3D ile basılan eşdeğer numunelerden daha yüksek kopma mukavemeti göstermişlerdir. Bunun nedenini ise enjeksiyonda basılan numunelerde hava boşluklarının olmaması olduğunu belirtmişlerdir (Ram, Inderdeep, ve Apurbba, 2022).

Tao ve arkadaşları (2019), karbon elyaf (CF) takviyeli polietere-terketon (CF/PEEK) kompozitinin ultrasonik kaynakta, kaynak süresinin ve enerji yönlendirici (EY) kullanımının kaynak kabiliyetine etkisini ayrıntılı olarak incelemiştir. Ultrasonik kaynak süresi, ultrasonik kaynak işleminde anahtar parametre olmuştur. Bu nedenle, öncelikle kaynak birleşim noktalarının farklı ultrasonik süreleri (0.7 s – 0.8 s – 0.9 s – 1.0 s ve 1.1 s) altındaki mikro yapıları incelenmiştir.



**Şekil 4.** UK ile bindirme kaynağı boyutları (Tao vd., 2019).

CF/PEEK kompozitine önce EY olmadan ultrasonik kaynak yapılmıştır. Ultrasonik kaynak sürelerinin kısılması ile ara yüzeydeki ısı birikimi kompoziti tamamen eritmek için yeterli gelmemiş ve arayüzeyde çatlak ve boşluklar oluşmuştur. Kaynak süresi 1.0 s'den 1.1 s'ye çıktığında ITAB'ın (Isı tesiri altındaki bölgenin) genişliği 0.2 mm'den 0.42 mm'ye çıkmıştır. Artan kaynak süresi ile sıcaklık PEEK reçinesinin erime noktasına ulaşmıştır. Termal genişleme katsayıları arasındaki büyük fark nedeniyle, PEEK reçinesi ile karbon fiberin arayüzünde çatlaklar ve boşluklar meydana gelmiştir. Ultrasonik kaynak ile EY olmadan sağlam birleştirme elde edilememiştir. Kaynak süresi arttıkça arayüzün sıcaklığı yükselmiş ve arayüzdeki boşluk kademeli olarak kaybolmuştur. Ultrasonik kaynak ile birleştirilen numunelerin mekanik özellikleri kesme mukavemet testi ile değerlendirilmiştir. EY'siz 0.7 s kaynak süresi ile birleştirmenin kesme mukavemeti 4.3 MPa iken maksimum kesme mukavemeti değeri, 0.9 s'lik kaynak süresinde 14.4 MPa olmuştur. Düz EY'li kaynaklarda ise kesme mukavemeti, 0.7 s'lik kaynak süresi altında 7 MPa iken kaynak süresinin artmasıyla kesme mukavemeti artmış ve 0.9 s kaynak süresi ile maksimum 28 MPa değerine ulaşmıştır (Şekil 5).



*Şekil 5. Farklı koşullar altında numunelerin kesme mukavemet değerleri (Tao vd., 2019).*

Güldenur Ham (2023) yüksek lisans çalışmasında mühendislik plastik malzemelerinden poliamid 6'nın (PA6) farklı cam elyaf katkı oranları (%15 ve %30) ile ultrasonik kaynak parametrelerinin kaynak kabiliyetine etkisi incelenmiştir. Farklı katkı oranlarında ve kaynak parametrelerinin etkileri iki farklı ultrasonik kaynak tekniği ile ele alınmıştır. Birinci teknik enerji yönlendirici (EY), ikinci teknik ise nokta (punta) ultrasonik kaynağıdır. Kaynaklanan PA6 ve cam elyaf katkılı PA6 malzemelerin mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenerek kaynak kabiliyeti ele alınmış ve optimum işlem parametreleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonunda, enerji yönlendiricili (EY) numuneler nokta kaynakla yapılan numunelerden çok daha yüksek kesme dayanımına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

1) PA6+%0 CE yani katkısız polimer malzemelerde EY kaynaklı numuneler, nokta kaynaklı numunelerden ortalama %162 daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir.

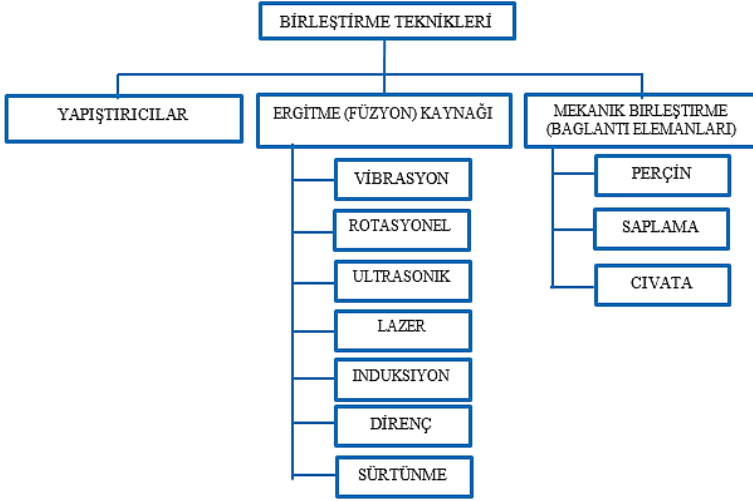
2) PA6+%30 CE malzeme de EY kaynaklı numuneler nokta kaynaklı numunelerden ortalama %233 daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir.

3) Enerji yönlendiricili ultrasonik kaynak işleminde plastik malzemedeki elyaf oranı arttıkça (PA+%30CE) ortalama %97'e varan oranda kesme kuvvetlerinde artış gözlenmiştir.

## 1.Endüstrilerde Kullanılan Birleştirme Yöntemleri

Büyük kompozit yapıların montajı için, endüstrilerde kullanılan geleneksel yöntemler;

- Mekanik birleştirme (Perçin, pim, saplama, cıvata vb. kullanarak),
- Ergitme (füzyon) kaynağı ile birleştirme ve
- Yapıştırıcılar (kimyasal) ile birleştirme (Reincke, Hartwig, ve Dilger, 2019).



Şekil 6. Kompozit malzemeler için farklı birleştirme teknikleri ve yöntemleri (Reincke, Hartwig, ve Dilger, 2019).

### 1.1.Mekanik birleştirme yöntemleri (Bağlantı elemanları)

Bağlantı elemanları (cıvata, perçin) gibi mekanik bağlantı yöntemleri endüstride kullanılan en yaygın birleştirme yöntemidir. Bu yöntem, polimer kompozitlere kıyasla metal birleştirme için daha verimlidir. Mekanik bağlantı elemanları kullanmanın faydaları:

- Yüzey hazırlığı gerektirmemesi,
- Kontrol edilmesinin kolay olması ve
- Perçinli bağlantı durumları dışında kolayca demonte edilebilmesidir.

Ancak mekanik bağlantılar ile ilgili en fazla dezavantaj, alt tabakalardaki deliklerden kaynaklanan stres konsantrasyonudur. Aynı zamanda yapıya önemli bir ağırlık yüklemesidir (Andrew, 2023).

## 2.Yapıştırıcılar ile birleştirme yöntemleri

Yapıştırıcı ile birleştirme, iki tabaka arasına yapıştırıcı uygulanarak birbirine sabitleme yöntemidir. İki (ya da daha fazla) yakın yerleştirilmiş parçayı yüzey birleştiricisi ile bir arada tutmak için bir ilave malzemenin kullanıldığı birleştirme yöntemidir. Metal, plastik, seramik, ahşap, kâğıt ve mukavva gibi aynı veya farklı malzemeleri birleştirmek için geniş bir birleştirme veya sızdırmazlık uygulamalarında kullanılır. Günümüzde artan birçok birleştirmede uygulanabilir. Yapıştırıcının fiziksel özelliklerinin, parçaların yüzeylerini birleştirmek için genellikle kimyasal reaksiyonla sıvıdan katıya dönüşme işlemidir.

- Sertleşme, genellikle ısı ve/veya bir katalizör ile gerçekleştirilir.
- Eğer ısı kullanılmışsa, sıcaklıklar göreceli olarak düşüktür.
- Sertleşme zaman alır. (İmalatta zaman kaybına neden olur)
- Yapışma işlemini gerçekleştirmek için bazen parçalar arasında basınç uygulanır.

### a) Yapıştırıcı Türleri:

1-Doğal yapıştırıcılar: Reçine, nişasta, şeker, soya tuzu, kola gibi doğal kaynaklardan elde edilirler. Düşük gerilmeli uygulamalarda; mukavva kartonları, döşeme, kitap ciltleri veya geniş yüzeylerde (kontraplak) kullanılır.

2-İnorganik: Düşük maliyetli ve düşük dayanımlıdır. Esas olarak sodyum silikat ve magnezyum oksit-klorüre dayanır.

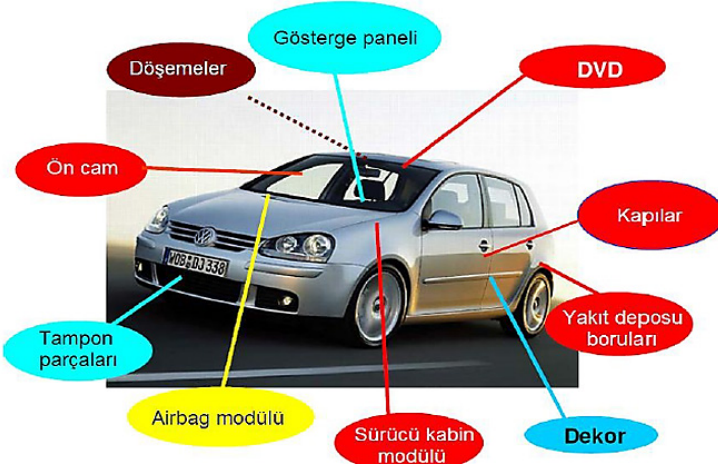
3-Sentetik (yapay) yapıştırıcılar: Genelde plastiklerin yapıştırılmasında tercih edilir. Termoplastik ve termoset yapıya sahiptir. İmalatta çok önemli yer tutar. Sentetik yapıştırıcılar, değişik mekanizmalarla sertleştirilir. Sertleştirme yöntemleri:

- Uygulamadan önce polimeri katalizör ve reaktif katkılarla karıştırma,
- Kimyasal reaksiyonu başlatmak için ısıtma,
- Ultraviyole ışık gibi, radyasyonla sertleştirme,
- Sıvı veya pastadan suyu buharlaştırarak sertleştirme,
- Yapışanlardan birinin yüzeyine film veya basınca duyarlı kaplama olarak uygulamak.

Polimer birleştirme teknolojisindeki gelişmeler ile yapıştırıcıların mukavemet, yorulma ömrü ve sertlik performansları iyileşmiştir (Demirer, A. 2023; Mariam, M. 2018; Kweon, J.H. 2006).

### b) Yapıştırmanın Sınırlamaları:

- Bağlantılar genellikle diğer birleştirme yöntemleri kadar güçlü değildir.
- Yapıştırıcı, birleştirilen malzemelere uygun olmalıdır.
- Uygulama (Servis) sıcaklıkları sınırlıdır.
- Yapıştırıcının uygulanmasından önce temizlik ve yüzey hazırlığı önemlidir.
- Sertleşme süreleri, üretim hızını sınırlayabilir.
- Yapıştırılmış bağlantıların muayenesi zordur.



Şekil 7. Bir otomobil gövdesindeki yapıştırma bağlantıları (Demirer, A. 2022; Mariam, M. 2018; Kweon, J.H. 2006).

### 3.Ergitme (Füzyon) kaynağı birleştirme yöntemleri

Birleştirme için başka bir seçenek olan, birleştirilecek parçaların ara yüzeyinin ısıtıldığı, yayıldığı ve daha sonra kaynamış eklemi elde etmek için soğutulduğu füzyon birleştirmesidir. Termoplastik malzemelerin kaynaklanabilirliğinin iyi olduğu bilinmektedir (Benatar, 2015). Termoplastik polimerler, ısı ve basınç uygulanarak yeniden şekillendirilebilir, bu da onları füzyon montajı için uygun hale getirir (Stavrov ve Bersee 2005; Villegas, I.F. 2013).

İndüksiyon, ultrasonik ve direnç kaynağı gibi füzyon birleştirme için kullanılan çeşitli teknikler vardır (Ageorges, C. 2001; Shi, H. 2015).

Direnç kaynağı, elektrik akımı kullanılarak üretilen ısı ile plastik yüzeylerin birleştirildiği işlemdir. Dirençli ısı, polimerlerin erimesine ve ardından soğumaya neden olur. Tekniğin ana avantajı, büyük ve karmaşık

eklemleri birleştirme etkinliğidir (Barbosa, L.C.M. 2019; Brassard, D. 2019).

Lazer kaynağı, plastikler için modern birleştirme işlem tekniği olup oldukça esnektir ve çalışma yüzeyini işaretlemeyen veya zarar vermeden yüksek mukavemetli bağlantılar sağlar. Hassas kontrol ve doğruluk gerektiğinde plastik lazer kaynağı tercih edilebilir ve zorlu geometrik yapılarda bile plastikleri başarılı bir şekilde kaynaklamak için kullanılabilir. Karbon takviyeli plastiklere de lazer kaynağı işlemi yapılabilir. Seri üretim yaklaşımları için faydalı olup temiz bir süreçtir (Knapp, Clement, Franz, Oumarou, ve Renard, 2010).

Titreşim veya doğrusal sürtünme kaynağı, kaynak bileşenlerinin malzeme ile sürtünmesiyle kaynağın gerçekleşmesi için ısı meydana gelir ve bu ısı malzemeyi yumuşatır (Arul, Rajasekar, Murugesapandian, ve Selwin, 2017).

İndüksiyon kaynağı, bir indüksiyon bobininin kaynak hattı boyunca hareket ettirildiği ve iletken karbon kompozit laminatta girdap akımının indüklendiği ve bunun polimerin erimesiyle sonuçlandığı bir birleştirme işlemidir (Andrew, W. 2023; Pappadà, 2015).

Rotasyonel kaynak ise dönme hareketini kullanarak yapılan bir işlemdir. Çoğunlukla dairesel bağlantı bölgeleri için uygun olan bir sürtünme kaynağı türüdür (Yousefpour, Hojjati, Immariageon, 2004).

#### 4.Ultrasonik Kaynak Yöntemi

Ultrason kaynağı uzun bir süredir metal sektöründe uygulanmaktadır. Alüminyum ve bakır gibi yumuşak malzemelerin bindirme bağlantılarında iyi sonuçlar vermiştir. Daha sert malzemelerin kaynağı sonotrotun hızlı aşınmasına yol açmaktadır. Parça kalınlığı da 3 mm'nin altında tutulmaya çalışılmıştır. Daha çok metal sektöründe, elektrik elektronik endüstrisi, lehimleme ihtiyacı olan tel birleştirmelerde, alüminyum sac panellerin montajında güneş panellerinde, boru sac birleştirme işlemleri ve küçük parçaların montajında kullanılmaktadır (Groover, 2015). Bazı plastik parçaların birleştirilmesi işlemi çalışmalarının olumlu sonuçlar vermesi ile ultrasonik kaynak yöntemi termoplastik türü malzemelerin kaynağında tercih edilmektedir. Seri ve estetik görünümü çok iyi düzeyde olan bir kaynak yöntemidir. Birkaç saniye gibi çok kısa sürelerde kaynak bağlantıları gerçekleştirilebilir (Demirer, 2023).

Plastik malzemelerin kaynağında, malzemenin zamana bağlı özelliklerinde oluşan değişimler, çalışma koşulları, kaynak sonrası sertleşme yönelimi, malzemenin kimyasal yapısı ve ısı direncinin yanı sıra işlem öncesi ve işlem sonrası güvenilirlik, otomasyona olan uygunluk ve bütün

bunların yanında ekonomik olması gibi birçok parametreler göz önünde bulundurulur (Ziegler, 2004).

Termoplastik malzemeler termosetlerden farklı olarak tekrar tekrar eriyebilen ve yeniden şekil verilerek kullanılabilen polimerlerdir. Kullanılmış termoplastikler yeniden endüstriye kazandırılması amacıyla tekrar ısı ve basınç uygulanarak ikincil ürün olarak üretilmektedir.

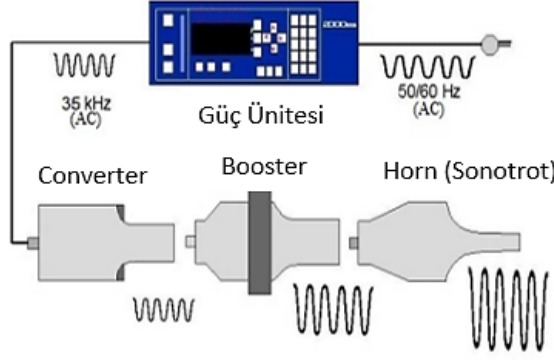
Termoset malzemeler bir sefere mahsus şekillendirilebilen polimer malzemelerdir. Bu tür plastiklere kaynak işlemi yapılamamaktadır. Çünkü termosetler ısı aldığımda kimyasal reaksiyona girerek çapraz bağlanırlar ve sertleşirler. Bu nedenle ikinci defa kaynak için ısıtıldıklarında yumuşamazlar. Eğer ikinci kez ısıtma işlemi uygulanırsa termoset malzeme renk değiştirerek yanar veya kömürleşirler. Bu malzemeleri kaynak yöntemi yerine birbirine geçme ya da yapıştırma teknikleri kullanılarak birleştirme işlemi yapılabilir (Demirer, A. 2023; O'Brien, R.L. 1991).

Ultrasonik kaynak yöntemi, üstün kaynak kalitesi, hızlı kaynak edilebilmesi, uzun ekipman ömrü, verimli olması ve otomasyona uygunluğu nedeniyle birçok alanda kullanılmaktadır. Tekstil, otomotiv, oyuncak, elektronik, aksesuar, paketleme ve tıp alanı başta olmak üzere birçok sanayi alanında yaygın olarak kullanılan bir kaynak teknolojisidir. Ayrıca bu yöntem, seri uygulanabilmesi, kısa bekleme süresi, düşük iş gücü, temiz dış görünümü, boyutsal olarak kararlı, yüksek toleranslarda birleştirmeler ve ekonomik üretim kolaylığı sağlaması nedeniyle birçok sektör tarafından tercih edilmektedir (O'Brien, 1991, Ay ve Sakin, 2005).



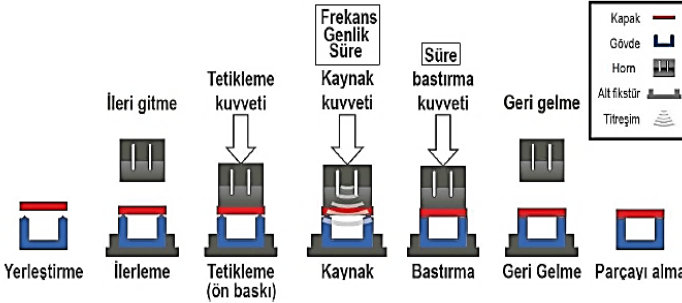
Şekil 8. Ultrasonik kaynak makinesi (Branson Ultrasonic, 2002).

Ultrasonik kaynak makineleri, belli başlı dört bölümden oluşur. Bunlar; kaynak kalıpları (horn), şiddet artırıcı (booster), enerji dönüştürücüler (converter) ve güç ünitesi (jeneratör) gibi elemanlardan oluşurlar (Herrmann Ultrasonik, 2018).



Şekil 9. Ultrasonik kaynak sistem bileşenleri (Branson Ultrasonic, 2002).

Şehir elektrik şebekesinden sağlanan 220 Volt, 50/60 Hz elektrik enerjisinin frekansı UK makinesinin jeneratöründe ortalama 35 kHz'e frekansa yükseltilir. Bu alternatif akım (AC), enerji dönüştürücüye gelir. Enerji dönüştürücüler, üst üste dizili olan piezoelektrik kristallerden oluşur ve tüm düzeneği rezonans frekansına (öz frekansına) yakın bir değerde titreştirir. Enerji dönüştürücü, elektrik enerjisinin sadece türünü değiştirerek, yine alternatif akım olarak, çıkışında 35 kHz frekansında mekanik titreşim olarak verir. Booster ise titreşim düzeneğinin yataklanmasında kullanılmaktadır. Mekanik amplifikatör sisteminde hareketli ve sabit parçalar arasında bulunan yük iletimi ve bu parçaların birbiri ile sabit konumda olmasını sağlar, yani yataklama görevi görmektedir. Farklı özellikte bulunan termoplastiklerin farklı değerlerde bulunan ergime sıcaklıkları nedeniyle, aynı genlik değeriyle her termoplastik malzeme aynı şekilde ve aynı kalitede kaynak edilebilmesi mümkün değildir (Yükler ve Sözoğ, 1998). Ergime sıcaklık değeri düşük olan termoplastiklere düşük genlikte titreşim uygulanması gerekirken, ergime sıcaklık değeri yüksek olan termoplastiklere yüksek genlikli titreşim uygulanır. Böylece en kısa sürede en sağlıklı kaynağın yapılabilmesi sağlanmış olur (Welding Technology, 2006).



**Şekil 10.** *Termoplastik malzemeler için ultrasonik kaynak teknolojisi proses adımları (Herrmann Ultrasonik, 2018).*

Ultrasonik kaynak kalıplarının elemanlarından olan ‘‘Horn’’ diğer ifadeyle ‘‘Sonotrot’’ olarak isimlendirilir. Temel görevleri makinenin üretiği titreşimi iş parçasına yönlendirmektedir. Basıncın da etkisi ile saniyede 35.000 defa birbiriyle sürtünmekte olan parçaların temas eden yüzeyleri ergime sıcaklığına yaklaştığında titreşim sonlandırılır. Basıncın etkisi altında bir süre daha bekletilerek parçaların soğuması sağlanır.

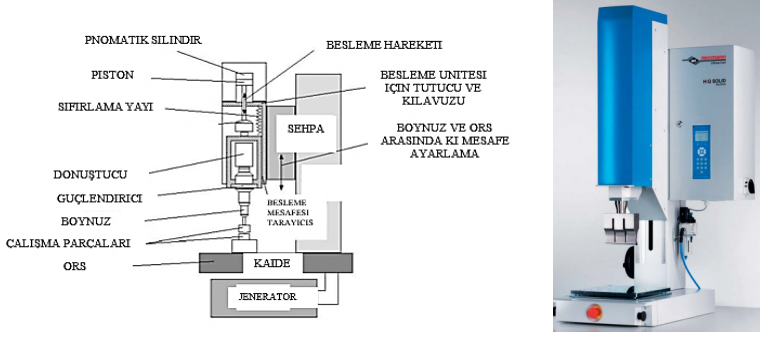
Ultrasonik kaynak kalıpları; titanyum, alüminyum, alaşımlı çelik ve ferro-titanyum malzemelerinden yapılırlar ve çeşitli frekanslarda üretilirler. Frekans seçimi, yapılacak işe göre tespit edilir (Prakasan, Rani, Rudramoorthy, ve Suresh, 2007). Yüzey kaynak uygulamalarında genellikle 20 kHz frekans, noktasal kaynak ve perçin başı ezme uygulamalarında ise 30 kHz ve 40 kHz frekanslar seçilmektedir. Malzemesine ve yapılacak uygulamaya göre frekansı belirlenir.

Erime sıcaklığı kaynak için gereken enerji ile doğru orantılıdır, erime sıcaklığı ne kadar yüksekse kaynak için o kadar fazla ultrasonik enerji gerekir. Malzemenin sertliği, ultrasonik enerji iletimini etkiler. Malzeme ne kadar sertse, iletim o kadar iyidir. Eriyik sıcaklığı ve akışkanlık gibi faktörler, farklı bir polimerin kaynağı sırasında daha fazla etkileyecektir. Erime sıcaklığındaki fark nedeniyle, düşük erime sıcaklıklı polimer erken erir ve bu da zayıf bir bağa yol açar. Birbirine benzemeyen polimerlerin daha iyi kaynaklanması için, erime sıcaklığı farkı 22°C’den fazla olmamalı ve başka bir bileşenle de kimyasal olarak uyumlu olmalıdır.

#### 4.1.Ultrasonik kaynak makine ekipmanları

Ultrasonik kaynak ekipmanı, mekanik titreşimi yüksek frekansta statik bir sıkıştırma kuvveti ile bağlantı ara yüzüne iletmek için kullanılır. Statik kuvvet ve dinamik titreşimlerin aynı anda uygulanması nedeniyle, numune arasındaki ara yüzde füzyon meydana gelir ve böylece bir kaynak oluşur.

Ultrasonik kaynak makinesinde ultrasonik jeneratör, dönüştürücü (converter), güçlendirici (booster), horn (sonotrot) ve numunelerin dayandığı fikstür gibi beş ana bileşen vardır (Devine, 2001).



Şekil 11. Ultrasonik kaynak makinesinin elemanları (Devine, 2001; Herrmann Ultrasonik, 2018).

## Jeneratör

Bir ultrasonik jeneratörün ana işlevi, 50-60 Hz'deki elektrik gücünü (5000 W) 20 ila 40 kHz'lik yüksek bir frekansta elektrik enerjisine dönüştürmektir. Ultrasonik kaynak uygulamaları için yaygın olarak kullanılan frekans 20 kHz'dir.

## Dönüştürücü (Converter)

Bir dönüştürücü, jeneratörden üretilen yüksek frekanslı elektrik darbelerini mekanik titreşimlere dönüştürmek için işlev görür. Alternatif bir voltaja maruz kaldığında genişleyen ve büzülen piezo seramikler kullanılır.

## Güçlendirici (Booster)

Adından da anlaşılacağı gibi, dönüştürücüden mekanik titreşim elde edildikten sonra, geometriyi ayarlayarak tasarım gereksinimine göre titreşimlerin genliğini artırmak veya azaltmak için bir güçlendirici kullanılır.

## Horn (Sonotrot)

Numuneyle doğrudan temas edecek olan ana bileşen horndur. Bir üst kaynak kalıbı elemanıdır. Hornun işlevi, mekanik salınımları kaynak yapılacak numunelere aktarmaktır. İş parçasına doğru/optimum titreşimleri sağlamak için farklı tasarım ve geometrilerde olabilirler. Bu horn çoğunlukla titanyum, alüminyum ve alaşımlı çelik gibi malzemeden imal edilir ve bunların seçimi büyük ölçüde uygulamaya ve olası maliyet kısıtlamalarına bağlıdır.

## Fikstür

Numunenin altına yerleştirilen parçayı sabitlemeye yarayan bileşendir. Fikstürün ana işlevi, sağlam bir yapıyı kolaylaştırmak için kaynak

işlemi sırasında numuneyi yerinde tutmaktır. Bir tür alt kalıp elemanıdır. Bu bahsedilen beş UK bileşene ek olarak, bir UK makinesi, tüm bileşenleri bir arada tutmak için ana çerçeve veya yapı, hava kompresörü ve değişken parametreleri kontrol etmek için PLC (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) gibi birçok bileşen gerektirir (Devine, 2001).

#### 4.2.Ultrasonik kaynağın avantajları

1. Ultrasonik kaynak, indüksiyon, direnç kaynağı ve ark kaynağı gibi diğer tekniklerle karşılaştırıldığında en hızlı birleştirme yöntemlerinden biridir ve bu nedenle seri üretim ve otomatik işlemler için en uygun olanıdır.
2. Numunelerin ultrasonik kaynağı için dolgu, dekapan maddeleri gibi ilave maddeler gerekli değildir. Bu yöntem kullanılarak nokta veya dikiş kaynağı yapılabilir.
3. Ultrasonik kaynaktaki yüzey hasarı minimumdur. Çünkü sürtünme karıştırma kaynağı gibi diğer kaynak işlemlerinde olduğu gibi yüzeyin üst kısmından ziyade ara yüzde ısı üretilir.
4. Kaynak sırasında duman veya kıvılcım oluşturmadığından temiz bir birleştirme işlemidir ve bu nedenle çevre dostu olarak kabul edilir (Ganesh ve Praba, 2013; Patel, 2011; Brown, 1994; Yeh, 2013).

#### 4.3.Ultrasonik kaynağın dezavantajları

Ultrasonik kaynak yöntemini kullanmanın bazı sınırlamaları mevcuttur bunlar:

1. Ultrasonik işlem, üst üste binme ve kesme bağlantılarıyla ve kaynak yapabileceği maksimum kalınlıkla sınırlıdır. Titreşimin daha kalın kısımlara nüfuz etmesi ve yapıştırma bölgesindeki salınım zor olduğundan, sağlam bir kaynak kalitesi elde etmek için yeterli değildir.
2. Ultrasonik kaynak, mekanik titreşim iletimi ilkesine göre çalışır, bu nedenle rezonans durumundan duyulabilir gürültü üretilebilir ve bu kaçınılmazdır.
3. Titreşimsel döngüsel yükleme nedeniyle, numunenin yorulmada başarısız olma şansı daha fazladır. Bu durum malzemenin bir miktar yorulmasına neden olur (Ganesh ve Praba, 2013).

#### 4.4.Ultrasonik kaynak uygulama alanları

Plastik malzemelerin birleştirilmesinde UK kaynak yöntemi çok farklı endüstriyel alanlarda çok sayıda uygulamaya sahiptir. Bunlar otomotiv, havacılık, tıp, elektrik ve elektronik uygulamalarında ve diğer birçok alanda bulunabilir. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, enerji tüketimini azaltarak verimliliği artırmak için hafif bir malzemeye ihtiyaç duyarlar. Örneğin bir bağlantı mekanizması olan cıvatalı bağlantı kullanmak ağırlık artışına neden olmaktadır. Bu nedenle endüstride birleşme bağlantılarında, seri üretim için ultrasonik kaynak yöntemi tercih edilen önemli bir seçenektir (Yousefpour, Hojjati, ve Immarigeon, 2004). Diğerlerine göre daha temiz bir işlem olması ve kirlilik oluşturmaması nedeniyle özellikle medikal uygulamalarda; hastane elbiseleri, tıbbi çip testleri, steril giysiler, maskeler ve temiz odalarda kullanılan tekstil ürünleri gibi alanlarda ultrasonik kaynak yöntemi tercih edilmektedir (Yeh, 2013).

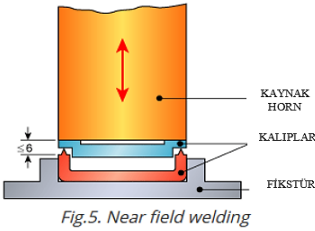


Şekil 12. Ultrasonik kaynak uygulama alanları (Hermann Ultraschall, 2015).

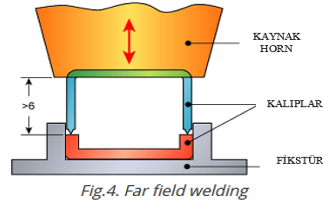
#### 4.5.Yakın ve Uzak alan Ultrason Kaynak Yöntemi

Termoplastiklerin ultrasonik kaynağında, horn konumuna göre iki kategoriye ayrılır:

1. Yakın alan kaynağı
2. Uzak alan kaynağı



a)



b)

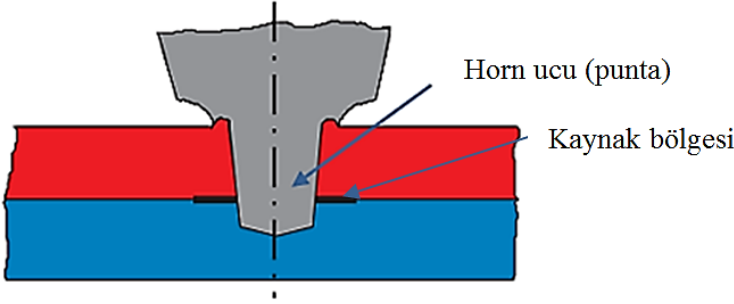
Şekil 13. (a) Yakın ve (b) Uzak alan kaynağı şematiği (Ensminger, ve Bond, 2012).

Yakın alan kaynağı, bağlantı ara yüzü ve horn arasındaki mesafenin 6.35 mm (0.25 inç) ve daha az olması durumunda; uzak alan kaynağı ise bağlantı arabilimi ile horn arasındaki mesafenin 6.35 mm ve daha fazla olması durumu için verilen tanımlamadır (Ensminger, ve Bond, 2012).

Yumuşak ve gözenekli termoplastikler için yakın alan kaynağı önerilirken, sert ve amorf termoplastikler için tercihen uzak alan kaynağı uygulanır.

#### 4.6.Nokta (punta) Ultrason kaynak yöntemi

Kaynaklanacak olan kalıplanmış bileşenler, enerji yönlendirici olmadan birbiri üzerinde düzlemsel olarak uzanır. Hornun ucu üst plakadan alt plakaya nüfuz eder ve böylece her iki bileşenin temas bölgesinde kaynama gerçekleşir. Ortaya çıkan eriyik kısmen bağlantıda toplanır ve bir nokta kaynağı oluşturur (Hermann Ultraschall, 2015).



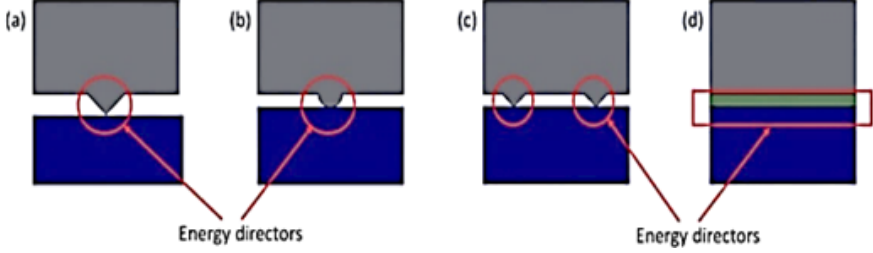
Şekil 14. Nokta Kaynak Yönteminin Şematik Görşeli (Hermann Ultraschall, 2015).

#### 4.7.Enerji Yönlendirici Ultrason kaynak yöntemi

Termoplastiklerin ultrasonik kaynağında ısı üretimi, viskoelastisite olgusundan kaynaklanan ara yüzde üretilen en önemli parametrelerden biridir. Ara yüzde ultrasonik enerji yoğunlaştığından iyi bir bağ elde etmek için polimer yüzeyinde bir çıkıntı gereklidir. Bunun için polimer yüzeyinin bir tarafına çıkıntı, yarım daire veya üçgen gibi farklı geometrilerde enerji yönlendirici (EY) kullanılır. EY kaynağın kalitesini artırmaya ve kaynak sürecini daha hızlı ve daha verimli hale getirmeye yardımcı olur (Tao vd., 2019).

Enerji yönlendiriciler, ultrasonik plastik kaynağında önemli bir fiziksel parametredir. Enerji yönlendirici, reçine bakımından zengin kompozit numune üzerinde suni bir çıkıntı konumundadır ve herhangi bir lif içermez ve aynı malzemenin küçük kesitli bir çıkıntısı (uzantısı) olarak yer alır. Şekil 15'teki gibi kaynak sırasında ara yüze gelecek şekilde oluşturulur.

EY'nin tasarımı, şekli, boyutu, morfolojisi ve konfigürasyonu son kaynak kalitesini etkilediğinden, sağlam bir kaynak elde etmek için çok önemli bir rol oynar. Yarım daire, üçgen, dikdörtgen, çoklu EY'ler gibi farklı enerji yönlendirici şekilleri tasarlanabilir (Fernandez, 2015; Tao, 2019; Demirer, 2022).



Şekil 15. Enerji yönlendirici türleri a) Üçgen EY b) Yarı küresel EY c) Çoklu EY d) Düz/Dikdörtgen EY (Fernandez, Valle, Bersee, ve Benedictus, 2015).

#### 4.8.Ultrasonik Kaynakta Parça Tasarımı

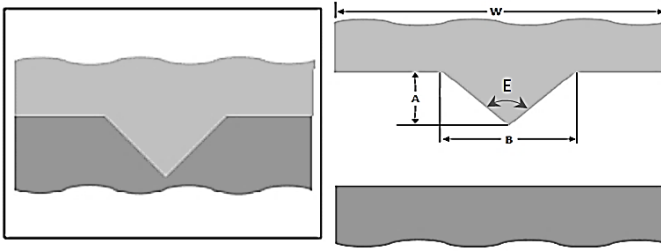
En uygun montaj sonuçları elde etmek için birleştirilecek parçaların bağlantı tasarımı kritik öneme sahiptir. Belirli bir parçanın bağlantı tasarımında plastiğin türü, parça geometrisi ve kaynağın bağlantı notası gibi faktörlere bağlıdır. Her biri kendine özgü avantajlara sahip birçok farklı tasarımlar vardır. Bağlantı tasarımında üç temel gereksinim vardır:

- Düzgün temas alanı
- Küçük bir ilk temas alanı
- Bir hizalama aracı (Dukane, 2011).

Düzgün temas alanı, birleşme yüzeylerinin tüm bağlantı çevresinde yakın temas halinde olması gerektiği anlamına gelir. Bağlantı mümkünse bir düzlemde olmalıdır. Eşleşme alanları arasında küçük bir başlangıç temas alanı oluşturulmalıdır. Bunu yapmak, eşleşen birleştirilecek parçalar arasındaki “erimeyi” başlatmak ve tamamlamak için daha az enerji ve dolayısıyla daha az zaman demektir. Kaynak işlemi sırasında birleşme yerlerinin yanlış hizalanmaması için bir hizalama yöntemi önerilir. Hizalama pimleri ve soketleri, kanalları ve kanatları, bunları hizalamak için genellikle parçalara ayrılır. Çok gerekmedikçe parçaların hizalanmasını sağlamak için hornu veya fişstür kullanmamak en iyisidir (Dukane, 2011). Bir bağlantı için en önemli iki gereklilik, parçaların bağlantı düzleminde birbirine göre serbestçe titreşebilmeleri ve herhangi bir esnemeyi önlemek için parçaların sert bir şekilde desteklemelidir (Solvay, 2013).

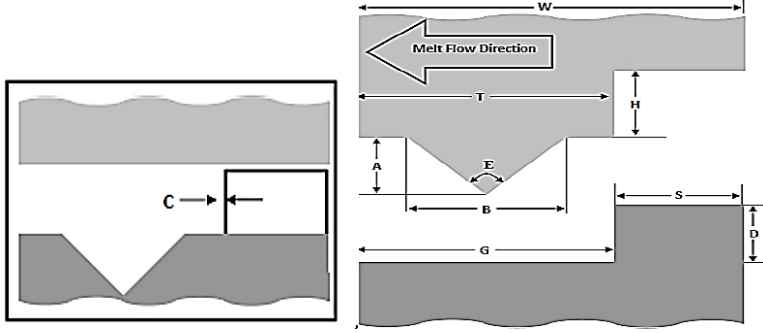
Enerji yönlendirici tekniği ile yapılan birleştirmelerde, fazla çapak olmadan iyi bir kaynak mukavemetinin elde edilebilmesi için eritilecek belirli bir malzeme hacmi sağlamak üzere geliştirilmiştir. Genellikle amorf polimerler için tavsiye edilen tasarımıdır. Bir ortak tasarımın üç temel gereksinimi açısından, enerji yönlendirici birleşim iki tanesini karşılar: düzgün ve küçük bir ilk temas alanı sağlar. Enerji yönlendirici birleşim bir hizalama aracı olarak ya da malzeme çapağını kontrol etmek için kullanılmaz. Bu gereksinimler parça tasarımına dahil edilmelidir. Amorf bir reçine için temel enerji yönlendirici tasarımı, tepe noktasında 90 derecelik açı ve her biri 45 derecede taban açıları olan dik bir üçgendir. Bu, yüksekliği taban genişliğinin yarısı yapar. Polikarbonat, akrilikler ve yarı kristal reçineler için, enerji yönlendirici eşkenar bir üçgendir yani her üç açı da 60 derecedir. Bu, yüksekliği taban genişliğinin 0.866 katı yapar. Daha önce belirtildiği gibi, parçalar bir hizalama aracı içerecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu mümkün değilse, fikstür parçaları birbirine göre hizalamak için gerekli yerleştirme özelliklerini sağlayacak şekilde tasarlanabilir (Dukane, 2011).

**Tablo 1.** Enerji Yönlendirici bağlantısı için tasarım ölçü değerleri (Klinstein, 2012)



	BOYUT	GENEL KURALLAR
W	Duvar (cidar) Kalınlığı	Min 2.286 mm
B	Enerji Yönlendirici Taban Genişliği	W/4 veya W/5
A	Enerji Yönlendirici Yüksekliği	B/2 veya 0.866B
E	Enerji Yönlendirici Açısı – Tepe Noktası Açısı	60° veya 90°

Tablo 1’de EY’li bağlantı için tasarım ölçü değerleri, Tablo 2’de adım (basamak) bağlantı için tasarım ölçü değerleri verilmiştir. Adım (basamak) bağlantı tasarımı enerji yönlendirici gibi tasarımın iki temel gereksinimini karşılar ilki düzgün bir temas yüzeyi sağlaması, diğeri ise küçük bir başlangıç temas alanı oluşturur. Bir basamak birleştiricisi aynı zamanda bir hizalama aracıdır. Ayrıca bu yöntemde duvarın (cidarın) sadece bir kısmı kaynağa dâhil olduğu için dayanımı ilk enerji yönlendiricisinden biraz düşüktür (Dukane, 2011).

**Tablo 2.** Adım bağlantı için tasarım ölçü değerleri (Klinstein, 2012)

	BOYUT	GENEL KURALLAR
W	Duvar (cidar) Kalınlığı	Min 1.524 mm
B	Adım Birleştiricisinin Taban Genişliği	W/4 veya W/5
A	Adım Birleştiricisinin Yüksekliği	B/2 veya 0.866B
T	Adım Birleştiricisinin Duvar Genişliği	2/3 W
H	Adım Birleştiricisinin Duvar Yüksekliği	2/3 W
G	Adım Genişliği	T + 0.0508 mm T + 0.1016 mm
D	Adım Derinliği	H + 0.0254
S	Adımın Yan Duvarı	Min. 0.508 mm
C	Boşluk	0.0508 mm – 0.1016 mm
E	Enerji Yönlendirici Açısı – Tepe Noktası Açısı	60° veya 90°

### Keskin köşeler (Sharp Corners)

Ultrasonik titreşim enerjisine maruz kaldığında, keskin köşeleri olan plastik parçalar yüksek stresli alanlarda kırılabilir veya eriyebilir. Stres kırılmasını azaltmak için tüm köşelerde ve kenarlarda az da olsa bir yarıçap (radüs) önerilir.

### Delikler veya Boşluklar (Holes or Voids)

Enerji, delikler, boşluklar, açılar veya kıvrımlar etrafında iyi hareket edemez. Malzeme tipine, delik boyutuna ve açığa bağlı olarak, doğrudan bu alanların altında çok az ya da hiç kaynak yapılamaz. Mümkün olduğunca tüm keskin açılar, kıvrımlar ve delikler ortadan kaldırılmalıdır.

### Uzantılar (Appendages)

Plastik parçalara kalıplanan uzantılar, çıkıntılar titreşimli enerjiye maruz kaldıklarında strese de odaklanır ve eğilme temayülü (eğilimi)

gösterir. Bunu en aza indirmenin yolları arasında, uzantıların ana kısma katıldığı alanlara daha fazla bir yarıçap eklenmesi, esnekliği sönümlemek için uzantılara hafif bir kuvvet uygulanması, eklerin daha kalın hale getirilmesi veya mümkünse 40 kHz ekipman kullanılması önerilir (Dukane, 2011).

## 5. SONUÇ

Ultrasonik kaynak, ek bağlantı elemanları, yapıştırıcılar veya hareketli menteşeler gibi mekanik özellikler kullanmadan iki parçayı birleştirmek için üstün özellikli bir yöntemdir. Isı ile kaynaklama, sıcak plaka (elaman) kaynağı, spin kaynağı ve sürtünme (titreşim) kaynağı gibi diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında ultrasonik kaynak, döngü süresi ve otomasyon kolaylığı açısından avantajlar sunar. Ayrıca hızlı ve bağlantıda estetik bir görünüm de sağlar.

Ultrasonik kaynak ile iyi kalitede kaynak elde etmek için parça tasarımına dikkat edilmesi büyük önem taşır. Ayrıca, firmaların birçok yeni özellikler geliştirerek kazandırdığı bu kaynak yöntemi ile üretim yapmak çok daha kolaylaşmıştır. Ultrasonik kaynak yapmak isteyen teknik elemanlar için farklı firmaların kurslarının yanı sıra Türkiye Metal Sanayicileri Sendikası (MESS) bünyesinde de eğitimler verildiği bilinmektedir.



## Kaynaklar

- Ageorges, C., Ye, L., Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: *A review. Compos. Part A*, 32, 839–857.
- Andrew, W. (2023). *Applied Plastics Engineering Handbook*. Publishing: Boston, MA, USA, 113–120.
- Arul, S., Rajasekar, R., Murugesapandian, K., Selwin, M. (2017). Vibration and Ultrasonic Welding Behaviour of Polymers and Polymer Composites. *A Review. J. Chem. Pharm.Sci.* 3
- Ay, İ., Sakin, R. (2005). *Ultrasonik Yöntemle Plastiklerin Kaynağı*. Pagev Plastik Dergisi.
- Barbosa, L.C.M., Souza, S.D.B., Botelho, E.C., Cândido, G.M., Rezende, M.C. (2019). Fractographic evaluation of welded joints of PPS/glass fiber thermoplastic composites. *Engineering Failure Analysis*, 102, 60–68.
- Benatar, A. (2015). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites. *In Power Ultrasonics, Gallego*. Woodhead Publishing: Oxford, UK, 20 295–312.
- Brassard, D., Dubé, M., Tavares, J.R. (2019). Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element. *Composites Part B: Engineering*, 165, 779–784.
- Branson Ultrasonic, (2002). *Actuator Instruction Manual*. Branson Ultrasonic Corporation
- Brown, L. (1994). Copper Development Association Cost-Effective Manufacturing: Joining of Copper and Copper Alloys. *European Copper Institute*, 98, 1–64.
- Demir, A. (2019). Termoplastik Malzemelerin Ultrasonik Kaynağı ve Kaynak Parametrelerinin Çekme dayanımına Etkisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 177-185,11.
- Demirer, A. (2022). *Özel Üretim Yöntemleri, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Ders notu*, Sakarya.

Demirer, A. (2023). Mühendislik Polimeri ve Plastik Teknolojisi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler*

niversitesi *Ders notu*, Sakarya.

Devine, J. (2001). *Ultrasonic Plastics Welding Basics*. Weld. J. 80, 29–33.

Dukane, (2011). *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly*, 10 July 2020.

<https://documents.dukane.com/DesignGuides/Guide%20To%20US%20Plastic%20Assembly.pdf> adresinden erişildi.

Ensminger, D., Bond, L.J. (2012). *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies and Applications*,

3rd (Taylor & Francis Group): Boca Raton, FL, USA.

Fernandez V.I., Valle G.B., Bersee, H.E.N., Benedictus, R. (2015). A comparative evaluation

between flat and traditional energy directors for ultrasonic welding of CF/PPS thermoplastic composites. *Composite Interfaces*, 22, 717–729.

Ganesh, M., Praba Rajathi, R. (2013). Experimental study on ultrasonic welding of aluminum

sheet to copper sheet. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2,

161–166.

Goto, K., Imai, K., Arai, M., Ishikawa, T. (2019). Shear and tensile joint strengths of carbon

fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding. *Composites Part A: Applied*

*Science and Manufacturing*, 116:126,37.

Groover, M. P. (2015). *Principles of Modern Manufacturing*. 4.th Edition: Wiley.

Ham, G. (2023). *Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Ultrasonik Kaynak Yöntemiyle*

*Kaynak Kabiliyetinin İncelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Sakarya Uyg. Bilimler Üniversitesi.

Hermann Ultrashall, (2015). *Ultrasonik welding technology fundamentals of plastics*

*handbook*, Hermann.

Herrmann Ultrasonik. (2018). *Termoplastik malzemeler için ultrasonik kaynak teknolojisi*.

rn Kataloğu.

- Syed, F.R., Sarmad, A.K., Mohammad, P.M. (2019). Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103:2053–2067. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03681-7>.
- Knapp, W., Clement, S., Franz, C., Oumarou, M., Renard, J. (2010). Laser bonding of long fiber thermoplastic composites for structural assemblies. *Physics Procedia*, 5, 163–171.
- Kweon, J.H., Jung, J.W., Kim, T.H., Choi, J.H., Kim, D.H. (2006). Failure of carbon composite to aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding. *Composite Structures*, 75, 192–198.
- Mariam, M., Afendi, M., Abdul Majid, M.S., Ridzuan, M.J.M., Gibson, A.G. (2018). Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy/glass fiber reinforced composites fabricated with different joining methods. *Composite Structures*, 200, 647-658
- O'Brien, R.L. (1991). *Welding Handbook*, v.2, 8 th. Edition, American Welding Society.
- Palardy, G., Shi, H., Levy, A., Le, C. S., Villegas, IF. (2018). A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113:339,49.
- Pappadà, S., Salomi, A., Montanaro, J., Passaro, A., Caruso, A., Maffezzoli, A. (2015). Fabrication of a thermoplastic matrix composite stiffened panel by induction welding. *Aerospace Science and Technology*, 43, 314–320.
- Patel, V.K., Bhole, S.D., Chen, D.L. (2011). Influence of ultrasonic spot welding on microstructure in a magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 65, 911–914.

Prakasan, K., Rani, M.R., Rudramoorthy, R., Suresh, K.S. (2007). Modeling of Temperature

Distribution In Ultrasonic Welding of Thermoplastics For Varios Joint Designs, *Journal*

*of Materials Processing Technology*, 186, 138-146.

Ram, S.R., Inderdeep, S., Apurbba, K.S. (2022). Ultrasonic welding of printed/molded

sustainable polymer specimens with energy directors. *Ultrasonics*, 134.

<https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.107078>

Reincke, T., Hartwig, S., Dilger, K. (2019). Improvement of the adhesion of continuously

manufactured multi-material joints by application of thermoplastic adhesive film. *Int. J.*

*Adhes. Adhes.* 93, 102321.

Stavrov, D., Bersee, H.E.N. (2005). Resistance welding of thermoplastic composites-an

overview. *Compos. Part A.* 36, 39–54.

Shi, H., Villegas, I.F., Oteau, M.-A., Bersee, H.E.N. (2015). Yousefpour, A. Continuous

resistance welding of thermoplastic composites: Modelling of heat generation and heat

transfer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 16–26.

Solvay, (2013). Ultrasonik Welding, 11 July 2020

[https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Ryton-PPS-Ultrasonic-Welding\\_ENv1.0\\_0.pdf](https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/Ryton-PPS-Ultrasonic-Welding_ENv1.0_0.pdf) adresinden erişildi.

Ishikawa, T., Amaoka, K., Masubuchi, Y., Yamamoto, T., Yamanaka, A., Arai, M., Takahashi,

J. (2018). Overview of automotive structural composites technology developments in

Japan. *Composites Science and Technology*, 155:221,46.

Uzun, H., Turan M. (2018). Ultrasonik Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cam Fiber Takviyeli

PP Kompozitlerin Birleştirme Mukavemetine Enerji Yönlendirici Türünün Etkisi. *Published in 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering*

*and Science*, 09-11 November.

- Tao, W., Su, X., Wang, H., Zhang, Z., Li, H., & Chen, J. (2019). Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic welding. *Journal of manufacturing processes*, 37, 196-202.
- Villegas, I.F., Moser, L., Yousefpour, A., Mitschang, P., Bersee, H.E. (2013). Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites. *J. Thermoplast. Compos.* 26, 1007–1024.
- Villegas, IF. (2014). Strength development versus process data in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65:27,37.
- Yeh, H.J. (2013). *Ultrasonic welding of medical plastics. In Joining and Assembly of Medical Materials and Devices*; Zhou, Y., Breyen, M.D., Eds.; Woodhead Publishing: Oxford, UK, 296–323.
- Yew, K.C., Liang, H.C., Chang, B.C., Shih, J.L. (2000). Effects of the Shape of the Energy Director on Far-Field Ultrasonic Welding of Thermoplastics. *Polymer Engineering & Science*, 40(1). <https://doi.org/10.1>
- Yousefpour, A., Hojjati, M., Immarigeon, J.P., (2004). Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. *J. Thermoplast*, 17, 303–341.
- Yükler, A.İ., Sözöz, H. (1998). *Ultrasonik Yöntem ile Plastiklerin Kaynağı*. Makine Market Dergisi, sayı 25.
- Welding Technology, (2006). *Ultrasonic Welding of Plastic Used in Medical Devices*. Institute of Australia.
- Zengguo, T., Qian, Z., Guopeng, Z., Xinrong, T., Lei, L., Peichung, W., Zhongxia, L. (2022). Influence of Pre-Pressing Ring on the Weld Quality of Ultrasonically Welded Short Carbon Fiber Reinforced Nylon 6 Composite, *Polymers*. 14,3115.

<https://doi.org/10.3390/polym14153115>

Zhang, Z., Wang, X., Luo, Y., Zhang, Z., Wang, L. (2010). Study on heating process of

ultrasonic welding for thermoplastics. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*,

23:647.

Ziegler, D. (2004). Welding of Termoplastics. *Welding Journal*, 83 (10), 45-4.



**BURDUR - ACIGÖL BÖLGESİNİN  
OTOKTON VE ALLOKTON BİRİMLERİ,  
FAYLARI VE SİSMOTEKTONİĞİ**

*Murat ŞENTÜRK*

## 1. Giriş

Batı Anadolu, Ege levhasının güney sınırı üzerinde konumlanmış ve genişleme tektoniğinin baskın olduğu bir bölge olarak bilinmektedir. Bu coğrafyada, çeşitli yaşlara ve bileşimlere sahip kaya birimleri, karmaşık fay sistemleri tarafından kesilmiş ve deforme olmuştur. Bu fay sistemleri, sadece bölgenin morfolojisini şekillendirmekle kalmayıp, aynı zamanda sismik aktiviteyi de etkilemektedir. Bu çalışmanın amacı, Isparta büklümünün kuzeybatısında bulunan Burdur-Acıgöl bölgesinin sismotektonik özelliklerini belirlemektir. Bu amaçla, bölgedeki otokton ve allokton kaya birimleri ile Burdur ve Acıgöl faylarına ek olarak bu faylarla ilişkilendirilen aktif faylar, jeolojik ve jeofizik veriler kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, bölgenin geçmiş ve yakın dönemdeki sismik aktivitesi de dikkate alınmıştır. Bu çalışma, Burdur-Acıgöl bölgesinin sismotektonik yapısının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

## 2. Bölgesel Jeoloji

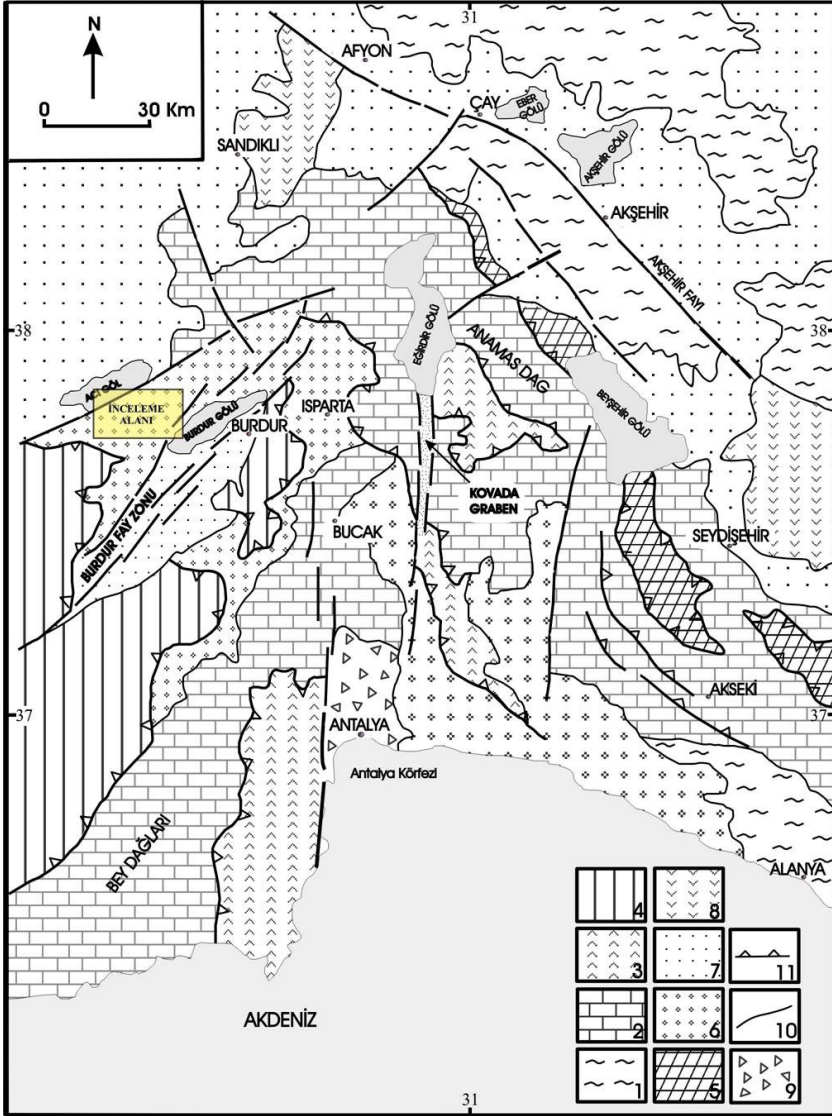
Çalışma sahası, Batı Anadolu'da Isparta Büklümü olarak adlandırılan coğrafi oluşumun kuzeybatısında bulunmaktadır (Şekil 1). Isparta Büklümü, Toros dağ kuşağının temel bileşenlerinden biri olan Geç Mesozoyik döneme ait karbonat eksenin, Antalya körfezinin kuzeyinde ters “V” şeklinde bükülmesi sonucunda oluşmuştur. Isparta büklümü, kuzey-güney yönlü olarak yaklaşık 180 km uzunluğa ve doğu-batı yönünde yaklaşık 100 km genişliğe sahip üçgen bir yapı oluşturur. Büklüm, batıda Burdur fay zonu tarafından ve doğuda Akşehir-Simav fayları ile sınırlanmıştır. Bu çevredeki Eğirdir-Kovada grabeni, Isparta büklümünü tektonik olarak iki bölgeye ayırmaktadır. Büklümün batı kanadında çoğunlukla kuzeydoğu-güneybatı uzanımlı yapısal çizgilere rastlanırken, doğu kanadındaki çizgiler büyük ölçüde kuzeybatı-güneydoğu uzanımlıdır. Burdur ve Akşehir fayları, Isparta büklümünün oluştuğu süreçte meydana gelen makaslama hareketleriyle karakterize edilen fay sistemlerini temsil etmektedir (Şekil 1).

Isparta büklümünün batı kanadındaki kaya birimleri Beydağları otoktonunu oluşturur. Beydağları otoktonu, Geç Kretase'den Eosen'e kadar değişen yaşlara sahip karbonat ve kırıntılı tortul kayalardan oluşur. Bu kaya birimleri, alttan üste doğru Geç Kretase yaşlı karbonat kayaları, Paleosen yaşlı karbonat kayaları, Eosen yaşlı Kayıköy formasyonu ve Oligosen yaşlı Başmakçı formasyonu olarak sıralanır. Kayıköy formasyonu, genellikle kumtaşı ve şeyl araldanmasından oluşan türbidit tortullardan ve kireçtaşı ara katmanlarından oluşur. Isparta'nın çevresinde, Geç Kretase yaşlı karbonat kayalarını uyumsuz olarak örten Kayıköy formasyonu, Oligosen yaşlı Başmakçı formasyonu tortullarıyla birçok yerde paralel

uyumsuzluklar gösterir. Başmakçı formasyonu ise molas fasiyesinde depolanmış olan kaba taneli çakıltası, kumtaşı ve çamurtaşı bileşenlerinden oluşur.

Isparta büklümünün doğu kanadındaki kaya birimleri, Akseki-Anamas platformunu oluşturur. Bu platform, Geç Kretase'den Eosen'e kadar değişen yaşlara sahip karbonat kayaçlarından oluşur. Bu kaya birimleri, Geç Kretase yaşlı karbonat kayaçları, Paleosen-Eosen yaşlı karbonat kayaçları ve Eosen yaşlı karbonat kayaçları olarak sıralanır. Bu platformun üstünde yer alan tektonik birimler Antalya ofiyolit naplarıdır. Antalya ofiyolit napları, ofiyolitik matriks içinde farklı büyüklükteki kireçtaşı, dolomit, çört, diyabaz ve serpantin bloklarından oluşur.

Isparta büklümünü batıdan ve doğudan çevreleyen allokton birimler, Likya naplarına aittir ve olistrostromal karakterli türbiditik matriks içinde farklı büyüklükteki kireçtaşı, dolomit, çört, diyabaz ve serpantin bloklarından meydana gelir. Allokton birimler, genellikle Eosen yaşlı türbiditik birimleriyle örtülüdür ve bu dokanaklı birimlerin üzerine gelmiştir. Oligosen yaşlı mola fasiyesi tortulları, çoğu yerde uyumsuz olarak Likya naplarına ait allokton birimlerini örter.



Şekil 1: Burdur ve Acıgöl çevresinin basitleştirilmiş jeoloji haritası (Yağmurlu vd., 1997). (1) Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalar; (2) Mesozoyik yaşlı karbonatlı kayalar; (3) Antalya napları, (4) Likya napları, (5) Beyşehir-Hoyran napları, (6) Denizel tersiyer tortulları, (7) Karasal neojen tortulları, (8) Neojen volkanitleri, (9) Antalya travertenleri, (10) Normal faylar, (11) Bindirme fayları.

Çalışma alanının batı bölgelerinde yaygın olan Pliyosen yaşlı Burdur formasyonu, Burdur grabenini dolduran karasal tortul kayalardan oluşur. Bu formasyon, genellikle flüviyal ve gölsel fasiyeslerde çökelmiş kumtaşı, kiltası ve konglomera bileşenlerinden oluşur. Burdur formasyonuna ait tortullar, alttaki tüm yaşlı birimleri uyumsuz olarak örter.

Çalışma bölgesinin morfolojik ve tektonik karakteri, Neotektonik dönemde oluşan ve kuzeydoğu-güneybatı yönünde uzanan horst-graben yapıları ve fay sistemleri tarafından belirlenmiştir. Bu yapılar içerisinde özellikle Burdur ve Acıgöl fayları, bölgesel jeolojik yapının belirgin unsurlarıdır. Fethiye Körfezi'nden Burdur Gölü'ne kadar uzanan Burdur Fayı, sol oblik atım bileşenine sahip normal bir fay olarak tanımlanabilir ve Burdur grabeninin güney sınırını oluşturur. Acıgöl Fayı da benzer bir uzanım ve karaktere sahip olup, sol oblik bileşenli bir normal faydır. Bu iki fay, bölgedeki yerli ve yerleşik kaya birimlerini keserek, onların yer değiştirmelerine ve deformasyonlarına yol açar. Ayrıca, bölgenin sismik aktivitesi açısından da bu iki fay merkezi bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Burdur ve Acıgöl faylarının uzunluğu, atım miktarı, kinematik özellikleri, sismik potansiyeli ve birbiriyle olan ilişkileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu inceleme, bölgenin sismik ve tektonik anlamda nasıl bir yapıya sahip olduğunu ve bu fayların bölge üzerindeki etkilerini derinlemesine anlamak için kritik öneme sahiptir.

### 3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışma çerçevesinde, Acıgöl ile Burdur Gölü arasında yaklaşık 200 km<sup>2</sup> lik bir alanın jeoloji haritası hazırlanmıştır. Jeoloji haritasının oluşturulması için, bölgedeki otokton ve allokton kaya birimlerinin litolojik, stratigrafik ve tektonik özellikleri arazi çalışmaları yoluyla saptanmıştır. Ayrıca, bölgedeki fayların uzunlukları, atımları, kinematikleri ve sismik potansiyelleri de arazi verileri ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla, fayların yönleri, eğimleri, atım yönleri ve atım miktarları ölçülmüş, fayların kinematik analizi için fay yüzeylerindeki çizgisel yapılar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, fayların sismik aktivitesini değerlendirmek için, fay kesintilerinin yaşları radyometrik yöntemler kullanılarak tespit edilmiştir.

Bölgenin tarihsel dönemlerdeki ve günümüzdeki sismik aktivitesi de ayrıca araştırılmıştır. Bu bağlamda, bölgede meydana gelen depremlerin büyüklükleri, odak derinlikleri, odak mekanizmaları ve hasar durumları gibi parametreler incelenmiştir. Ayrıca, bölgedeki aktif fayların konumları ve birbirleriyle olan ilişkileri, bu veriler ışığında ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir.

### 4. Stratigrafi

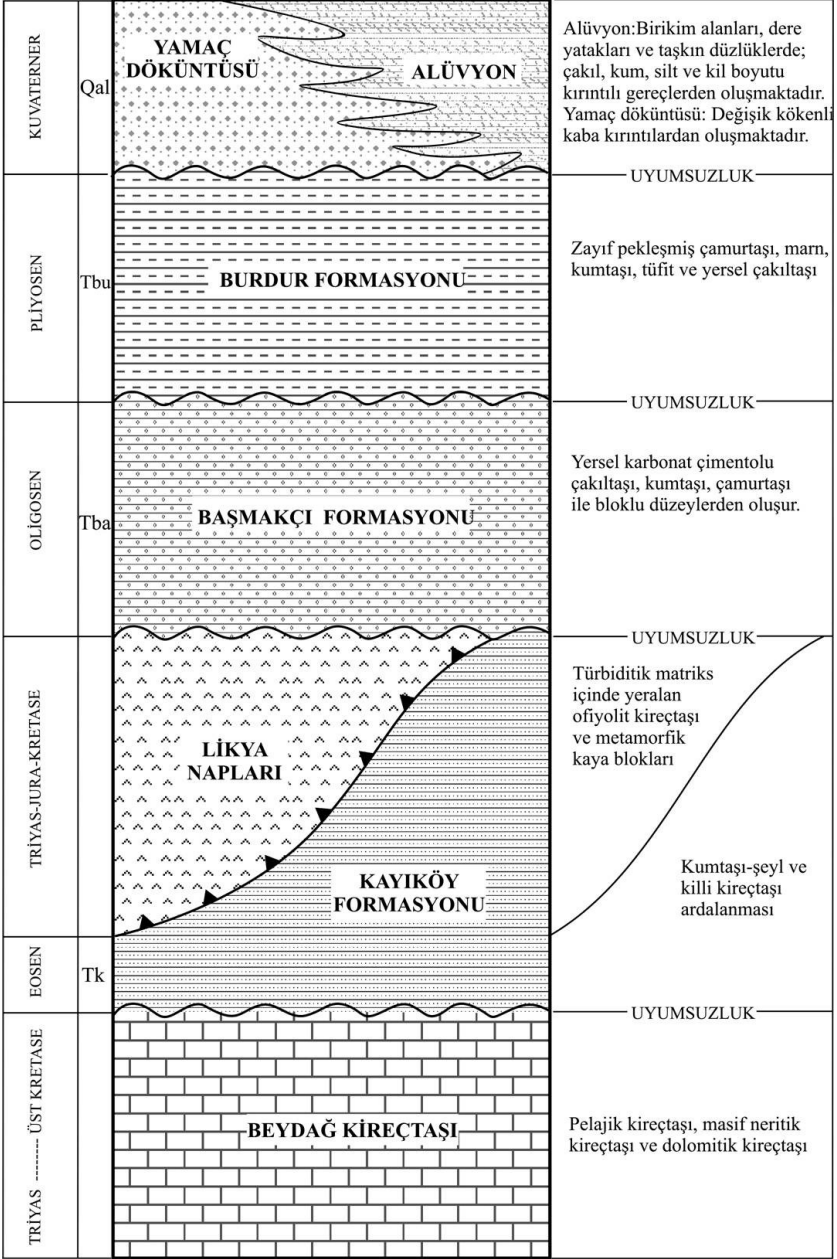
Bu bölgede, Acıgöl ile Burdur Gölü arasında yer alan kaya birimleri, otokton ve allokton olmak üzere iki ana grup altında toplanmaktadır. Otokton birimler, Eosen'den Kuvaterner'e kadar olan dönemlere ait olup, bu bölgede aşağıdan yukarıya doğru sırasıyla Kayıköy Formasyonu, Baş-

makçı Formasyonu, Burdur Formasyonu ve daha genç örtü birimlerini içermektedir (Şekil 2). Allohton birimleri temsil eden Likya napları ise farklı yaşlardaki çeşitli kaya birimleri tarafından oluşturulmuştur.

#### 4.1. Otokton Birimler

##### 4.1.1. Kayıköy Formasyonu (Tk):

Bu formasyon, çok çeşitli kaya birimlerinin ardışık olarak bir araya gelmesiyle oluşan bir türbiditik tortul birimdir. Bu birim, bölgedeki önceki araştırmacılar tarafından farklı isimlerle anılmıştır. Örneğin; Karaman vd., (1989) bu birimi “*Kayıköy Formasyonu*” olarak adlandırmışlardır, Gutnic (1977), Gutnic vd., (1979) ise “*Isparta flişi*” olarak adlandırmışlardır. Karaman (1986ab) ise Burdur çevresinde yaptığı çalışmalarda aynı birime “*Gölbaşı Formasyonu*” adını vermiştir. Ancak, bu incelemede, bu birimin tipik kesitinin Isparta’nın kuzeybatısındaki Kayıköy bölgesinde bulunmasından dolayı “*Kayıköy Formasyonu*” adının kullanılması daha uygun görülmüştür.



Şekil 2: Çalışma alanı ve çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik sütun kesiti (ölçeksiz).

Bu formasyonun yüzeleendiği bölgede, tabanda ofiyolitlerin üzerine ince bir kumtaşı ve çakıltaşı seviyesiyle başladığı gözlenir. Matris ve çakıl-

ların büyük bir kısmı ofiyolitik malzemeden kaynaklanmıştır. Bu seviye koyu gri-yeşil renkte olup, 2-4 metre kalınlığındadır ve giderek kalkarenit özelliklerini taşıyan, bol miktarda ofiyolit kırıntısı içeren kireçtaşlarına dönüşür. Bu kireçtaşları beyaz-bej renkte olup, bol miktarda nummulit içermektedir. Kalınlığı yer yer 10 metreye kadar ulaşabilen bu kırıntılı düzeyde, çakıllar üstte doğru azalır ve kaybolur. Daha sonra, üstte karbonat çimentolu, gri-bej renkte ofiyolit çakıllarını içeren, makrofosil zengini kumtaşı ve çakıltaşı seviyeleri izler. Bunları, kil çimentolu çakıltaşı seviyeleri ve kalın marn, kumtaşı, kumlu kireçtaşı aralanmaları takip eder. Bu kesim, bol miktarda nummulit ve mercan fosillerini içerir. Kumtaşı ve kumlu kireçtaşı kesimleri sertken, marnlı kesimler daha yumuşaktır. Gevşek kesimlerde mercan fosilleri dağınık bir şekilde bulunur. Tabakalar düzensizdir ve genellikle orta-kalınlıktadır. Hem mercanlar hem de nummulit fosilleri birbirlerinin üzerine gelişmiştir. Daha üstte ise marn, kumtaşı, kumlu kireçtaşı aralanmaları ve bunlar arasında az miktarda konglomeratik seviyeler yer alır. Renkleri gri-yeşilimsi olabilir ve malzemeye göre kahverengimsi bir ton taşıyabilir (Şekil 3).



*Şekil 3: Kayıköy formasyonuna ait kalın tabakalı kaba klastiklerinin görünümü (Başmakçı kuzeydoğusu).*

Kayıköy Formasyonu'nun alt dokanağı, en iyi çalışma alanının dışında Isparta'nın kuzeyinde, Büyüksöbü Tepenin batısındaki alanda gözlenir. Bu bölgelerde, Kayıköy Formasyonu'na ait tortullar, alttaki Beydağ otoktonunun Üst Kretase yaşlı pelajik kireçtaşları üzerine paralel uyumsuzlukla gelir (Karaman vd., 1988; Görmüş ve Karaman, 1992, Görmüş ve Öz-

kul, 1995). Ayrıca, Likya nappeleri de Kayıköy Formasyonu'nu bindirmeli bir dokanakla kaplar. Ek olarak, Oligosen yaşlı Başmakçı Formasyonu da bu birimi açısız bir uyumsuzlukla örtüler. Bu ilişkiler bölgede oldukça açık bir şekilde görülür. Bu durum, birimlerin yoğun bir şekilde kıvrımlı olmasından ve bu kıvrımlanmanın her iki formasyonun dokanaklarında gevşek birimlerin oluşturduğu kırıntılar ve döküntülerle ilişkiyi gizlemiş olmasından kaynaklanabilir.

Bu formasyon, fosil içeriği açısından oldukça zengindir. Daha önceki araştırmacılar tarafından toplanan fosillerden bazıları şunlardır: Nummulites beaumonti d'Archiac ve Haime, Nummulites aturicus Joly ve Leymerie, Gypsina marianensis, Assilina türleri, Alveolina türleri, Eofabiania türleri, bol miktarda mercan fosili vb. Bu fosiller, Kayıköy Formasyonu'nun Üst Lütesiyen-Priyaboniyen yaşını yansıtmaktadır.

Kayıköy Formasyonu, litofasiyes özellikleri bakımından daha çok neritik bir ortamda oluşan tortullaşmayı yansıtmaktadır. Formasyonun alt bölümü, ofiyolitik malzemelerden türeyen çakıltaşı ve kumtaşı seviyeleri ile resifal kireçtaşlarını içerir ve karasal kaynaklı akarsu sedimanterleri ile denizel sedimanterlerin karışımını yansıtır. Formasyonun orta bölümünde ise türbiditik karaktere sahip çakıltaşı, kumtaşı, kiltası, çamurtaşı, kumlu kireçtaşı, killi kireçtaşı ve çörtlü kireçtaşı seviyeleri, bol makrofosilli marn, kumtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanmaları ile derin denizel bir ortamda oluşan tortullaşmayı gösterir. Formasyonun üst bölümü ise marn, kumtaşı, kumlu kireçtaşı ardalanmaları ve bunlar arasında az miktarda konglomeratik seviyeler içerir ve daha sık denizel bir ortamda oluşan tortullaşmayı yansıtır (Şekil 4).



Şekil 4: Başmakçı formasyonu içerisindeki konglomeratlarda görülen çapraz katmanlanmalar (Burdur Gölü kuzeybatısı, Yukarıcinbilli Mahallesi doğusu).

#### 4.1.2. Başmakçı Formasyonu (Tba):

Bu birim, Göktaş vd., (1989) tarafından adlandırılmış olup kalın çakıltaş, çamurtaş, çakıllı çamurtaş ve kumtaş birimlerinin yanal ve düşey geçişleri şeklinde karakterize edilir. Özellikle çalışma alanının kuzey-doğusunda geniş bir yüzeylenme sahasına sahiptir.

Formasyonun tabanı, Priyaboniyen çökellerinin üzerine gelen kesimde (Yukarıcınbilli Mahallesi doğusu) konglomeralarla başlar. Bu konglomeralar, bol miktarda ofiyolit taşıyan ve nadiren radyolarit, çört ve çakıllı kireçtaşları içeren birimlerden oluşur. Çakılların kalınlığı 0,5 cm ile 20 cm arasında değişir. Konglomeraların yuvarlaklaşma derecesi düşük ve yönlenme göstermez. Tabakalanma kalın ve pek belirgin değildir, ancak çapraz katmanlamalar bu birim içinde iyi gözlenir (Şekil 4). Konglomeralardaki çakılların ofiyolitik kayalardan türemiş olması, bu kesimde birimin koyu renkli olmasına neden olur. Çimento, sarı renkte olup kumlu ve killi bir karışımdır. Birim içerisinde düzensiz kumtaş mercekleri mevcuttur. İstif oldukça kalındır ve hızlı çökelen bir ortamı yansıtır. Konglomeralar yanal ve düşey geçişler gösterir ve ardalanır. Genellikle birim, konglomera-kumtaş ardalanması şeklinde görülür ve bu ardalanmaya bazen çamurtaş düzeyleri, kiltaş ve marnlar da eşlik eder. Taneler genellikle düzensizdir, ancak alttan üste doğru tane boyutunda incelmeler gözlenir. Bu kesimde birim genellikle kalın tabakalıdır. Birimin üst seviyelerine doğru kumtaş ve marn oranı artar. Birimin rengi, ortama ve gelen malzemeye bağlı olarak boz-gri, yeşil, sarı, kahverengi ve kırmızı tonlarında değişebilir. Tutturulma, bazı yerlerde gevşekken, diğer yerlerde serttir.

Başmakçı Formasyonu, tabandaki Kayıköy Formasyonu ile Priyaboniyen birimlere açısız bir uyumsuzlukla başlar (Başmakçı doğusu). Üst kesimlerde ise Pliyosen yaşlı Burdur Formasyonu tarafından diskordan olarak örtülür.

Bu formasyon oldukça kalın bir istif sunar ancak kesin kalınlığı ölçmek mümkün olmamıştır. Ölçülen kesimlerde tabanı oluşturan konglomeranın yaklaşık 400 metre kalınlığında olduğu ve tüm birimin 1000 metreden daha az olmayan bir kalınlığa sahip olduğu tahmin edilmektedir.

Önceki çalışmalara dayalı olarak, tabandaki konglomeraların hemen yan yana geldiği kumtaş, konglomera, çamurtaş ardalanması olan kesimlerde Nummulites cf., vascus Joly ve Leymerie, Asterigerina türleri, Gypsina türleri, Rotalia türleri, makro kavkı kırıntıları gibi fosil buluntuların bulunduğu gözlenmiştir. Bu durum, Başmakçı Formasyonu'nun alt kesimlerinin Rupeliyen (Alt Oligosen) yaşlı olduğunu ve birimin kalınlığının Oligosen sonuna kadar devam ettiği anlamına gelir.

Başmakçı Formasyonu'nun litoloji ve bileşim özelliklerinin yanı sıra stratigrafi konumu, yayılımı ve geometrisi, bu birimin aslında bir moloz istifi temsil ettiğini göstermektedir. Ayrıca, yanal yönde hızlı kalınlık değişimleri gösteren bu tortul istifin, bölgede çok katmanlı bindirme tektoniği ile yaşıt bir çökelimle oluştuğunu belirten bulgular vardır (Yağmurlu, 1994).

#### 4.1.3. Burdur Formasyonu (Tbu):

Burdur Formasyonu, geç Miyosen-Pliyosen yaşlı gölsel çökellerden meydana gelen bir jeolojik birimdir. Bu birim, karasal çakıltası, kumtaşı, çamurtaşı, marn ve az miktarda killi siltli kireçtaşları içermektedir. İlk olarak Erakman vd., (1982) bu birime güneybatıdaki çalışmalarında “*Üst Miyosen-Pliyosen çökelleri*” adını vermişlerdir. Ancak, daha sonraki ayrıntılı çalışmalar Yalçinkaya vd., (1986) tarafından “*Burdur Formasyonu*” olarak adlandırılmasını önermiştir ve bu çalışmada da bu isim kullanılmıştır.

Burdur Formasyonu, Burdur Gölü çöküntüsünün güneyindeki bölgelerde ve Burdur il merkezinin çevresinde yaygın bir yüzeylenme gösterir. Bu formasyon, Burdur grabeninin asimetrik oluşum biçimine bağlı olarak, graben ekseninin daha çok sadece güney ve güneydoğu kenarlarında geniş bir dağılıma sahiptir. Çalışma sahasının dışında, Başmakçı'nın kuzeyi ve Acıgöl çevresinde de benzer litolojik özelliklere ve yaş konumuna sahip gölsel çökeller bulunmaktadır.

Burdur Formasyonu, kendisinden yaşlı birimleri uyumsuz olarak örten transgresif bir karaktere sahiptir. Alt seviyelerinde bulunan konglomeraların, inceleme alanının batı kesimlerinde daha kalın olduğu ve çakıllardaki sıralamanın birimin kuzeybatıdan beslendiğini gösterdiği gözlenmektedir. Bu nedenle, Burdur Formasyonu'nun oluşumunu kontrol eden havza kenarı fayları, Burdur gölünün kuzeyindeki yüksek kesimleri (Başmakçı horstu) sınırlayan faylardır. Kırıntılı malzeme gelişimi, kuzeybatıdan güneydoğuya doğru olduğu için yüksek alanlar, çalışma bölgesinin kuzey kuzeybatısında yer almaktadır.

Burdur Formasyonu'nun alt bölümündeki gevşek olarak tutturulmuş konglomeralar, alüvyal yelpaze ortamında gelişen bir çökelmeyi yansıtmaktadır. Üst bölümdeki tortullar ise çoğunlukla plaj ve göl ortamına ait bileşenleri içerir. Göl seviyesindeki değişiklikler, mevsimsel koşulların yanı sıra havzanın çökme hızındaki farklılıklara bağlı olarak plaj ve akarsu ortamına ait çapraz katmanlı, tutturulmamış çakıllı kumtaşları ve silttaşlarını da içerir. Alt bölümde yer alan jipsli çamurtaşları ise zaman zaman kuruyabilen playa tipi göl koşullarında meydana gelen tortul çökelmeyi yansıtır. Günümüzde faylar boyunca hala devam eden SO<sub>2</sub> içeren gaz çıkışları, göl

suyundaki jeokimyasal reaksiyonlara bağlı olarak güncel çamurlu tortullar içinde sülfatlı minerallerin (örneğin; jips) oluşumuna neden olmaktadır.

#### 4.1.4. Güncel çökeller

Çalışma alanı ve çevresinde oldukça yaygın bir dağılıma sahip olan Kuvaterner dönemine ait akarsular, plajlar ve birikinti konileri tarafından oluşturulan alüvyonlar ile yamaç döküntülerinden meydana gelen tutturulmamış ve gevşek yapıli tortulları bu çalışmada güncel çökel olarak tanımlıyoruz. Bu tortulların kökeni, güncel akarsuların ve yamaç döküntülerinin etkisi altında şekillenir.

Yeni alüvyonların karakteristik görünüşleri, genellikle güncel düşey hareketlerin etkisi altındaki ovalarda, akarsuların yakın çevresinde, Acıgöl ve Burdur Gölü kıyılarında, ayrıca Ulupınar, Akçaköy, Kayaköy, Ovacık gibi yerleşim alanlarında gözlemlenmektedir.

Bu yeni alüvyonlar, egemen olarak sarımsı bir renge sahiptir ve kötü boyutlandırılmış, zayıf peklik gösteren çakıl, kum ve çamurtaşı tabakalarından meydana gelirler. Kanal dolgularını oluşturan çakıllı tabakalardaki tane bileşenleri, köşeli yapıda, tane değıimli ve çamur destekli özelliklere sahiptir. Ayrıca, blok boyutundaki taneler, çakıllı ve çamurlu tabakalarda sıkça bulunurlar.

Güncel alüvyonlar, genellikle gevşek yapıdaki birimlerin taşınması sonucu göle yakın alanlarda birikinti konileri şeklinde depolanmıştır. Bu bölgelerde oldukça kalın bir istif oluşturan bu tortullar, göl kıyısına yakın bölgelerde ince kum ve kil karışımı tortullar şeklinde bulunmaktadır.

#### 4.2. Alloktan Birimler (Likya Napları)

Güneybatı Türkiye, jeolojik olarak zengin ve çeşitlilik gösteren bir bölgedir. Bu bölge, Menderes Masifi ve Beydağları Otoktonu arasında konumlanan, farklı oluşum süreçlerine tanık olmuş alloktan kaya birimlerinden oluşan Likya Napları ile karakterize edilir. Likya Napları, beş temel tektonik birliğe ayrılarak bölgenin jeolojik yapısını daha da derinlemesine açığa çıkarır. Bunlar; Tavas napı, Bodrum napı, Domuzdağ napı, Gülbahar napı ve Marmaris ofiyolit napı olarak isimlendirilir. Ayrıca, Beydağları otoktonu ile Likya napları arasında yer alan ve ara zon niteliğı taşıyan Yeşilbarak napı da bu jeolojik yapı içinde önemli bir rol oynar.

İlgili çalışma bölgesinde, Likya Napları'nın temsilcileri arasında Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri ve Kızılcadağ olistrostromal melanjı öne çıkar. Bu iki özellikli formasyon, bölgedeki jeolojik çeşitliliğı ve tektonik tarihçeyi zenginleştiren unsurlardır.

Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri, peridotit, gabro ve diyabaz bileşenlerinden oluşurken, Kızılcadağ olistrostomal melanji, türbiditik bir matris içinde düzensiz olarak dağılmış olan kireçtaşı, dolomit, çört ve radyolarit blokları ile metamorfik kaya kütesinden oluşur. Yeşilova-Tefenni Ofiyolitleri (Kmo), çalışma alanında gözlenen ofiyolitler, tabandan tavana doğru eksiksiz ve düzenli bir istif sunmazlar. Tabanda peridotitler (dunit, harzburjit ve piroksenitler içerisinde kromitler), üste doğru ise gabro, diyabaz ve doleritler gözlenir. Yöredeki ofiyolitlere, Şenel vd., (1989) Marmaris-Yeşilova ofiyolitleri, Sarp Yeşilova ofiyolitleri adını vermişlerdir.

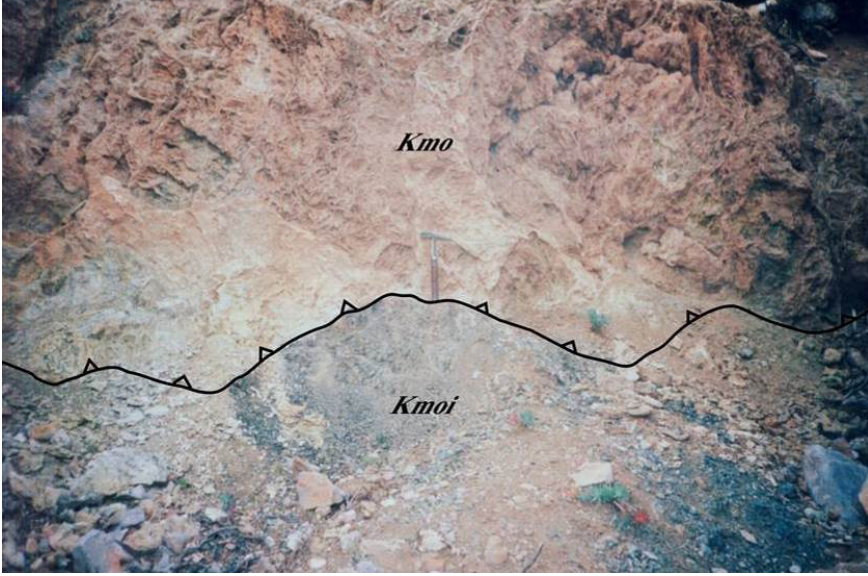
Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri büyük bölümüyle yer yer serpantinleşmiş peridotit bileşimli ultrabazik kayalardan oluşur. Serpantinleşmenin ileri olduğu peridotitlerde hâkim kaya türü harzburjit olup, yer yer harzburjitlerle ardalanan ve kamalanan dunitlerde izlenir. Harzburjitler taze veya hafif derecede serpantinleşmiş bölgelerde zeytin yeşili renge sahiptirler. Daha fazla serpantinleşmenin olduğu kesimlerde bile, ışığı yansıtan, yeşil-kahve renkli ortopiroksen kristalleri ile dunitlerden kolayca ayırt edilirler. Dunitlere göre daha sert ve kayalık bir yapıya sahiptirler. Dunitik seviyelere nazaran daha az kızılımsı-kahverengi renk tonuna sahiptirler.

Tektonik dokulu dunitler, harzburjitler içinde hemen hemen her seviyede iç yapıya uygun katmanlar ve düzensiz mercekler şeklinde bulunurlar. Harzburjitlerle geçişli olan dunitler daha yumuşak bir topoğrafya ve atmosferik oksidasyon nedeniyle kızılımsı bir renk sergilerler. İçlerinde dissemine nodüllü veya çizgisel yapıdaki kromit bantları bulunur. Bu kromit bantları kalınlaşarak ekonomik kromit yataklarını oluştururlar. Çalışma alanında peridotitler, yanal yönde yaklaşık 100-150 metrelik gabro ve diyabaz daykları ile sık sık kesilirler. Diğer kaya türlerine göre daha yaygın olan harzburjitler, çoğunlukla olivin, ortopiroksen ve kromit içerirler. Olivin kristalleri, serpantinleşmenin etkili olmadığı kesimlerde özgün şekillerini korur, ancak çoğu zaman parçalanmıştır. Büyük olivin kristallerinin çevresinde küçük olivin kristalleri görülebilir. Olivinlerin tümüyle serpantine dönüşmesi sonucu, mükemmel gelişmiş bir ağ dokusu sıkça gözlenir. Ortopiroksenler, ikinci önemli yaygın mineraldir ve doğru şekilde söndüklerinde kolayca tanınabilirler. Bükülme ve king-bant yapıları, genellikle ortopiroksenlerde görülen mikro-tektonik özelliklerdir. Olivinlere göre daha az serpantinleşmiş ortopiroksenlerde nadiren bastitleşme izlenebilir. Dunitler, %90'dan fazla oranla olivin ve kromit içerir ve kolayca tanınır.

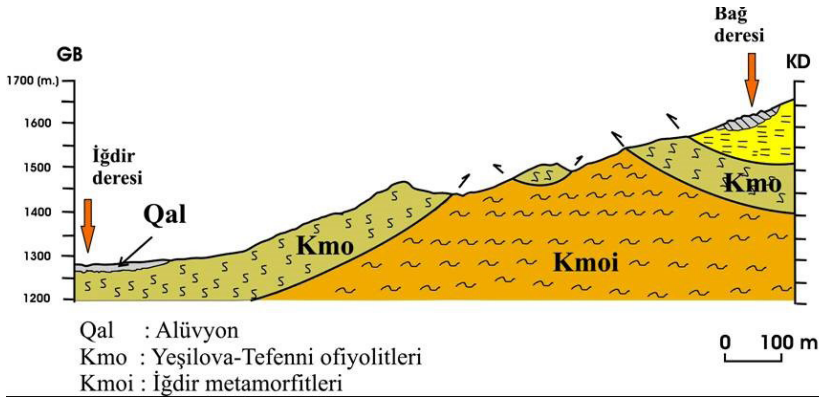
Özgün şekilsiz olivin kristalleri, çoğunlukla serpantinleşmiş ve talklaşmıştır. Dunitlerde genellikle yarı özgül ve özgül şekilsiz kromit taneleri bulunur.

Yeşilova-Tefenni ofiyolitlerinin alt dokanağı, çalışma bölgesinin İğdir

Köyü kuzeyinde açıkça gözlenir (Şekil 5) Bu alanda, Yeşilova-Tefenni ofiyolit topluluğunun alt bölümünde genellikle amfibol-şist, mermer ve kuvarsitlerden oluşan metamorfik kayalar bulunur. Bu metamorfik temel kayalar, Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri tarafından tektonik bir dokanakla üzerlenir (Şekil 6).



Şekil 5: İğdir metamorfitlerinin Yeşilova-Tefenni ofiyolitleriyle olan üst tektonik ilişkisinin görünümü.



Şekil 6: İğdir Köyü kuzeyinde gözlenen dokanak ilişkisinin GB-KD jeoloji kesiti üzerindeki görünümü.

Kızılcadağ Ofiyolitli Melanjı (Kkzm); Poisson (1977) tarafından “Kızılcadağ melanjı” olarak adlandırılan, çeşitli volkanik, kireçtaşı, çört ve radyolarit bloklarının türbiditik matris içinde düzensiz şekilde dağıldığı

karmaşık bir jeolojik birimdir. Bu birimi oluşturan ofiyolitik bloklar, genellikle diyabaz, serpantin, peridotit, gabro, radyolarit, pelajik şarap renkli kireçtaşlar ve spilitik tüf içerirler. Ek olarak, Permien'den Üst Kretase'ye kadar değişen yaşlara sahip kireçtaşı ve çört blokları, bu birim içinde bulunur. Kızılcaadağ ofiyolitli melanjı içindeki olistolit blokları, birkaç metreden kilometreye kadar farklı büyüklüklerde bulunur.

Bu olistolitler, tektonik hareketlerle taşınmış büyük kaya parçalarıdır. Kızılcaadağ ofiyolitli melanjı, tektonik bir dokanakla Yeşilova-Tefenni ofiyolitleri üzerine binmiştir.

Bu dokanak ilişkisi, çalışma bölgesinin çoğu yerinde görülür. Üst dokanak ilişkisi de alt dokanakta olduğu gibi tektonik bir dokanaktır ve Mesozoyik yaşlı kireçtaşları, çoğu yerde Kızılcaadağ karmaşığı üzerine bindirilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7: Kızılcaadağ ofiyolitli melanjının Mesozoyik yaşlı kireçtaşları ile olan tektonik dokanak ilişkisi.

Fosil bulgularına rastlanmamış olsa da önceki araştırmacılar (Sarp, 1976; Poisson, 1977), melanjın Üst Senoniyen yaşta olabileceğini belirtmişlerdir. Bu karmaşık yapının çeşitli ortamlarda oluşmuş birimlerin karışımı sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Bu birimler arasında pelajik kireçtaşı, çört, radyolarit ve türbiditik kireçtaşı gibi yapısal bileşenler, türbiditik bir matriks içinde serpantinize olmuş tektonitler, gabro, diyabaz ve breşik yapıdaki spilitik bazalt dahildir. Kızılcaadağ ofiyolitli melanjı, Likya napları ve özellikle Marmaris-Yeşilova ofiyolitleri ile bileşim ve litolojik benzerlikler taşır. Bu nedenle Likya naplarının kuzey kökenli olma

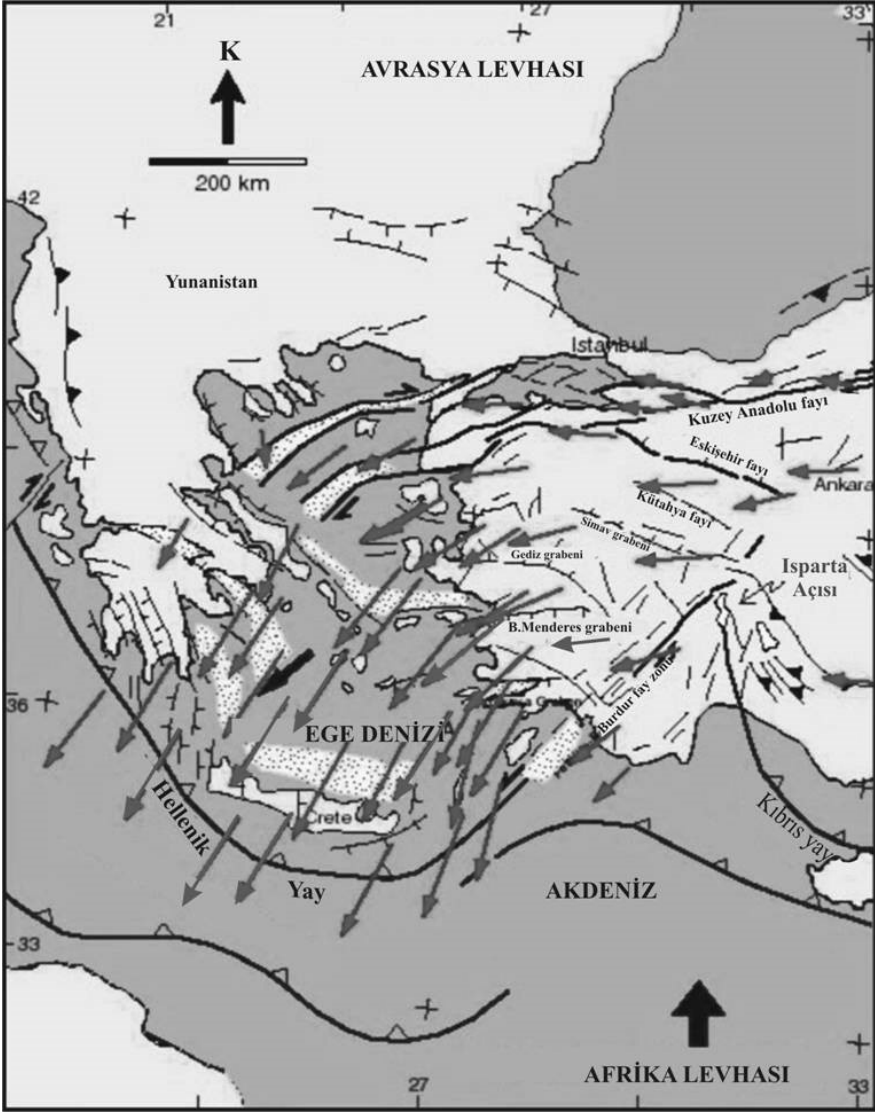
olasılığı yüksektir. Kızılıcağ ofiyolitli melanji, farklı ortamlarda oluşmuş birimlerin tektonik dokanaklarla karışmış olabileceği bir yapıya sahiptir.

### 5. Batı Anadolu'nun Neotektonik Yapısı ve Aktif Faylar

Batı Anadolu ve Ege Denizi, jeolojik ve sismik aktivite açısından dünya çapında dikkat çeken bir bölge olarak karşımıza çıkar. GPS ölçümleri ve jeodezik veriler, bu bölgenin dinamik tektonik yapısal özelliklerini ve sürekli değişen sismik hareketliliğini detaylandırmaktadır. Mc Clusky vd., (2000) tarafından sunulan verilere dayanarak, Ege Denizi ve Batı Anadolu'nun Avrasya levhasına kıyasla yıllık yaklaşık 3 cm'lik bir güneybatı genişleme hızına sahip olduğu belgelenmiştir. Bu genişleme, bölgenin Kuzey Anadolu Fayı, Helenik Yay ve Burdur Fayı gibi önemli tektonik yapılarla çevrili olmasıyla daha da karmaşık bir hal alır.

GPS hız vektörleri, Ege Denizi ve Batı Anadolu Bölgesinde, özellikle kuzeybatı-güneydoğu ve doğu-batı doğrultularında gelişen genişleme rejimlerini gözler önüne serer. Bu genişleme, literatürde Koçyiğit (1984), Şengör (1987) Şengör vd., (1984) ve Barka vd., (1996) tarafından da vurgulanmıştır. Burdur Fayı'nın stratejik konumu, bölgede farklı tektonik rejimler arasında bir ayrıştırıcı rol oynamaktadır ve Isparta Açısı olarak bilinen bölge içinde güneybatı yönünde bir genişlemenin olmadığını veya çok az olduğunu doğrulamaktadır (Şekil 8).

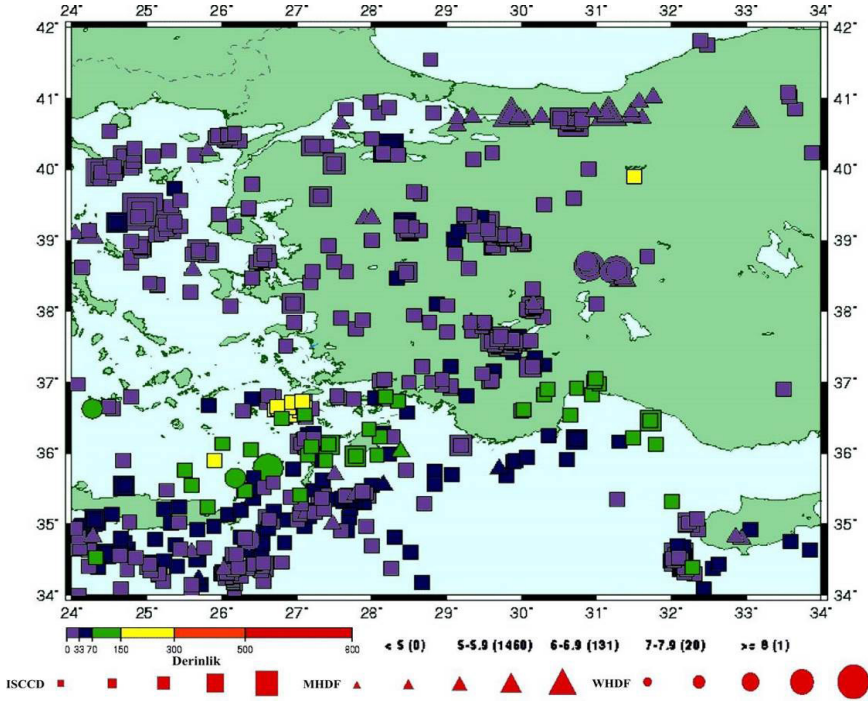
Bu açıdan bakıldığında, Burdur fayının farklı tektonik rejime sahip bölgeleri birbirinden ayıran önemli bir yapısal çizgi olduğunu vurgulamak mümkündür. Burdur fayının kuzeyinde kalan alanda yeralan aktif fayların büyük bölümü egemen olarak D-B ve KB uzanımlıdır.



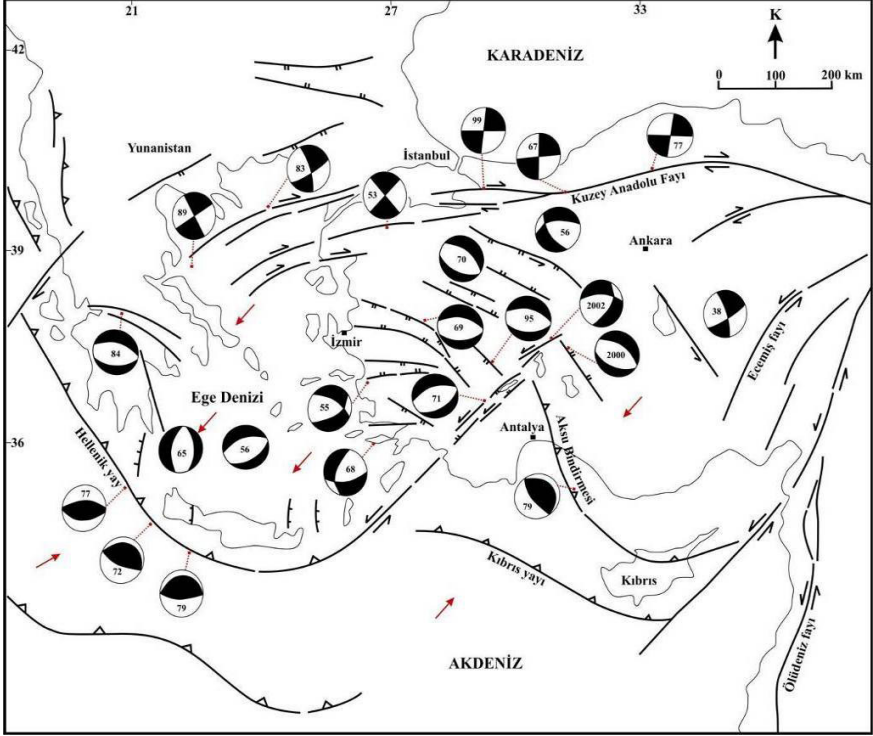
Şekil 8: Ege Denizi ve çevresinin ana tektonik özellikleri ve GPS ölçümlerinden elde edilen hız vektörleri (Barka vd.,1996, McClusky vd.,2000'den).

Son yüzyıl içinde Ege Denizi ve Batı Anadolu'da oluşan 5 Ma ve daha büyük depremlere ait episantr merkezlerinin büyük bölümü ile KB, KD ve D-B gidişli faylar boyunca dizilmiş olduğu görülür (Şekil 9). Bununla birlikte, Burdur fayının güneyinde oluşan depremlerin daha çok bindirme faylarına bağlı olarak geliştiğini, özellikle Aksu bindirme zonu üzerinde yer aldığı söylenebilir (Şekil 10).

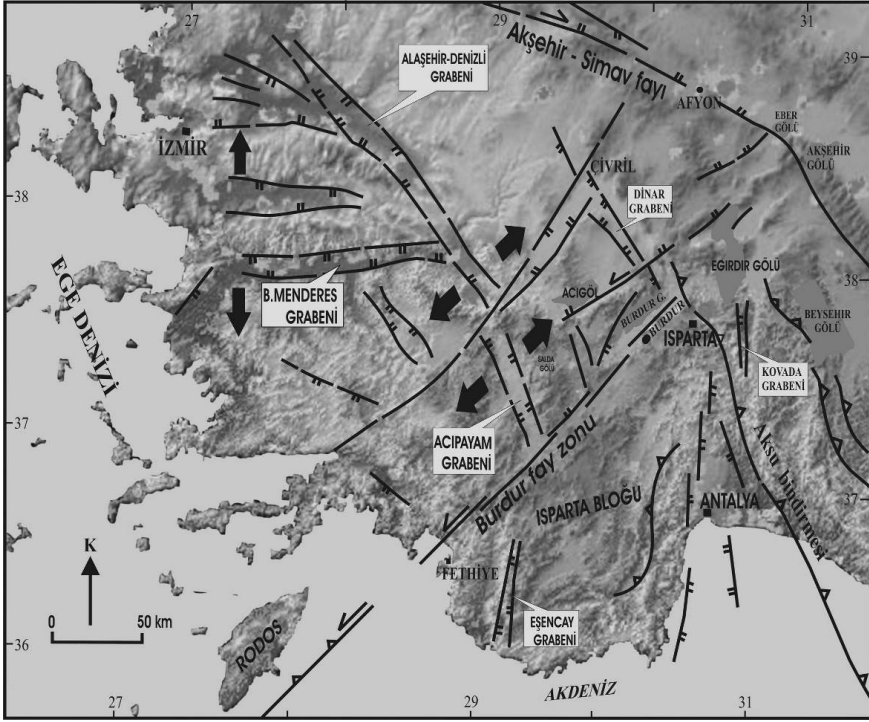
Bölgenin genişleme rejimi, Burdur Fayı'nın güneyindeki farklı graben yapılarına da yansımaktadır. Burdur Fayı'nın güney kesimlerindeki Fethiye-Burdur, Köyceğiz-Dalyan, Gökova ve Bodrum gibi grabenler, bölgesel genişlemenin güneye doğru devam ettiğine işaret ederken, kuzeydeki Akşehir-Simav, Dinar, Acıpayam ve Alaşehir-Denizli grabenleri ise kuzeybatı-güneydoğu yönlü genişlemeye bağlı olarak oluşmuştur (Şekil 11). Bunun yanısıra Ege Bölgesinde etkin olan K-G yönlü açılmaya bağlı olarak Gediz, Küçük Menderes ve Büyük Menderes grabenleri gelişmiştir.



Şekil 9: 1900-2000 yılları arasında meydana gelen ve büyüklüğü 5 ve daha büyük olan depremlerin episantırları ([www.iris.washington.edu](http://www.iris.washington.edu)).



Şekil 10: Ege Denizi ve çevresinde meydana gelen önemli depremlerin fay düzlemi çözümleri (Jackson ve McKenzie, 1984; Taymaz vd., 1991).



Şekil 11: Burdur ve Acıgöl faylarının bölgesel tektonik yapı içindeki konumu (Ertunç vd.,2001).

## 5.2. Burdur ili ve çalışma alanının sismotektonik özellikleri

Burdur ili şehir merkezi tümüyle Batı Anadolu'nun en önemli aktif faylarından biri olan Burdur fay zonu üzerinde kurulmuştur. Fethiye ile Burdur arasında uzanım gösteren Burdur fay zonu, yakın zamanda birçok deprem oluşturmuş önemli kırık hatlarından biridir. 1914, 1957 ve 1971 yıllarında Burdur-Fethiye arasında büyüklükleri 6.1 ile 7.1 arasında değişen üç önemli deprem kaydedilmiştir.

GB Türkiye'nin sismotektonik haritasını incelediğimizde (Şekil 9), 1900-2000 yılları arasında meydana gelen 5 büyüklüğünden büyük depremlerin, Burdur Fayı'nın Fethiye Körfezi'nden sonra Ege Denizi içerisinde de devam ettiğini gözlemlemekteyiz. Bu durum, Burdur Fayı'nın Ege Levhası'nın güney sınırını oluşturduğunu ve Helenik Yay ile Kıbrıs kaybı zonlarını birbirinden ayırdığını açıkça göstermektedir (Barka vd.,1997). Ayrıca, Burdur Fay zonu aynı zamanda egemen bir genişleme tektoniği alanı olan Ege Levhası'nı Batı Toroslar Bölgesi'nden ayıran önemli bir yapısal çizgi olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, Burdur ili ve çevre-

si, sismotektonik açıdan karmaşık ve önemli bir bölge olarak değerlendirilmektedir.

## 5.2. Burdur ve Acıgöl Faylarının Bölgesel Tektonik Konumu

Batı Anadolu ve Ege Denizi, jeolojik açıdan oldukça aktif ve önemli bir bölgedir. Yapılan GPS ölçümleri (Barka vd.,1996, McClusky vd.,2000), bu bölgenin dinamik yapısının ne denli karmaşık ve aktif olduğunu açıkça göstermektedir. Bu ölçümlere göre, Ege Denizi ve Batı Anadolu Bölgesi, Avrasya levhasına göre genellikle güneydoğu yönünde yılda yaklaşık 3 cm hızla genişlemektedir. Bu genişleme rejimi, bölgenin tektonik karmaşıklığını yansıtmaktadır.

GPS verileriyle belirlenen hız vektörleri (Şekil 8), bu genişleme rejiminin GB ve GD-GB doğrultularında meydana geldiğini açıkça göstermektedir.

Özellikle, Batı Anadolu'da bu yöndeki genişlemenin etkili olduğu belirtilmektedir (Şengör, 1987; Barka vd., 1996). Buna ek olarak, Helenik Yay, Burdur Fayı ve Kuzey Anadolu Fayı gibi önemli tektonik yapılar, bu genişleme bölgelerini sınırlamaktadır. Özellikle, Burdur Fayı'nın, bölgedeki farklı tektonik rejimlere sahip bölgeleri birbirinden ayıran kritik bir yapı olduğu görülmektedir (Barka vd., 1997, Yağmurlu, 2000).

Burdur Fay Zonu, Batı Anadolu'nun jeotektonik dinamiklerini şekillendiren önemli bir unsurdur. Bu fay, Fethiye Körfezi'nden Keçiborlu'ya uzanan, yaklaşık 300 kilometrelik bir hat boyunca kuzeydoğu yönünde genişleyen ve sol oblik atımlı bir normal fay yapısına sahiptir (Şekil 10, Şekil 11). Burdur Fayı'nın yapısı, tek bir lineer çizgiden ziyade, paralel ve kesikli segmentlerden oluşan karmaşık bir formasyona işaret eder. Bu segmentler, genellikle 3 ila 10 kilometre arasında değişen genişlikteki bir bant içerisinde kuzeydoğu yönünde sıralanmış durumdadır.

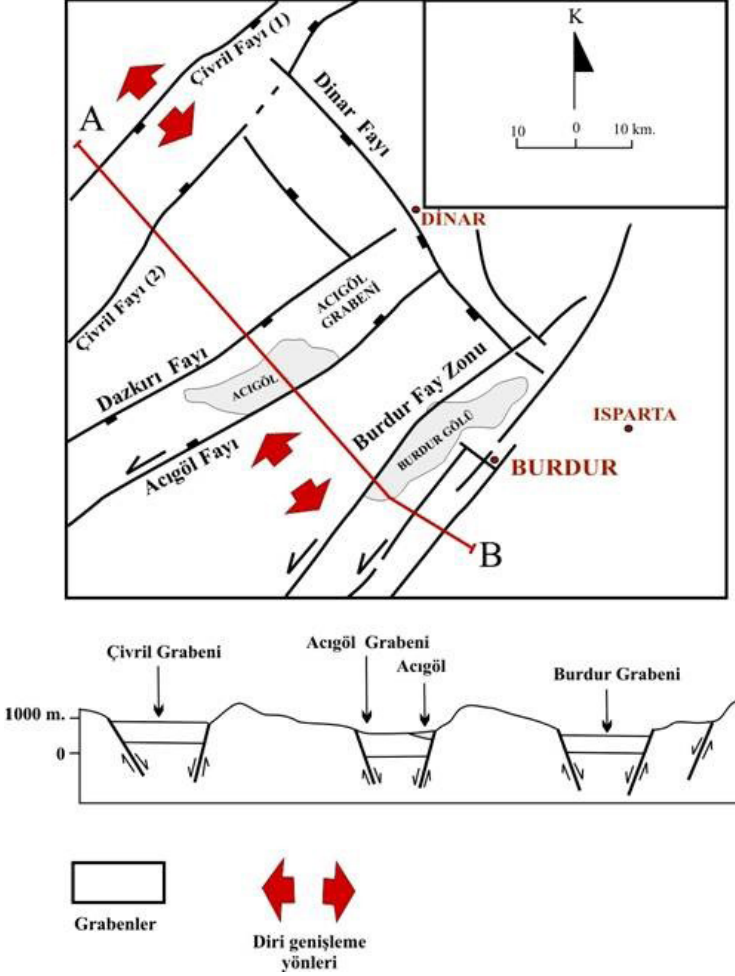
Fayın bu bölümünde yer alan yapılar, bölgedeki Neojen havzalarının sınırlarını oluşturan büyüme fayları olarak işlev görür. Bu kuzeydoğu yönlü segmentler, esas olarak kuzey ve kuzeybatı doğrultusunda yer alan genç normal ve doğrultu atımlı faylarla çevrilmiştir (Şekil 11). Şekil 11'de sunulan haritada görüldüğü üzere, Burdur Fayı'nın oluşturduğu yapısal kavis, Kıbrıs ve Helenik yitim zonlarının Fethiye Körfezi açıklarında kritik bir dirsek oluşturduğunu gösterir. Bu geometrik yapı, fayın sol yönlü atım hareketiyle uyumlu bir şekilde gelişmiştir.

Burdur Fayı, coğrafi olarak Senirkent ve Hoyran Gölü'nü takip ederek, Afyon-Çay bölgesinde Akşehir-Simav Fayı ile birleşir. Bu kesişim, bölgesel jeolojik yapı olan Isparta büklümünün sınırlarını tanımlayan önemli bir kırık hattını oluşturur (Karaman, 1986b; Koçyiğit, 1983; Tay-

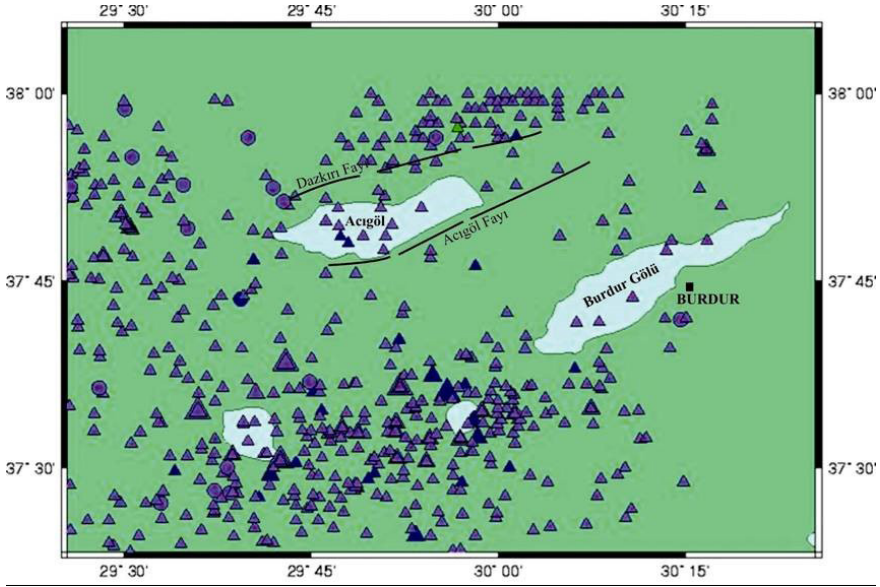
maz ve Price, 1992; Yağmurlu vd., 1997). Ayrıca, Burdur Fayı, Ege Denizi'nin güney sınırını oluşturan Hellenik ve Kıbrıs yitim zonlarını ayıran bir transform fayı özelliği taşır. Bu özellikleriyle Burdur Fayı, genişleme tektoniğinin hâkim olduğu Ege levhasını Batı Toroslar Bölgesi'nden ayıran stratejik bir jeolojik sınırı temsil eder (Şekil 11). Acıgöl grabeni, her iki yanı faylarla sınırlanmış KD-GB gidişli bir çöküntü alanıdır. Bu graben, güneydeki Acıgöl fayı, kuzeydeki Dazkırı fayı ile sınırlanmıştır (Şekil 11 ve 12). Dazkırı fayı, Tersiyer yaşlı birimleri Pliyo-Kuvaterner yaşlı alüvyon ve gölsel tortullardan ayıran, güneye doğru eğimli normal bir faydır. Faya ait en belirgin görünüşler, Acıgöl'ün kuzey kenarı boyunca Dazkırı-Çardak ilçeleri arasında yer alır. Topoğrafya da gözlenen ani morfolojik dikleşmeler, yersel kayma yüzeyleri ve fay boyunca gözlenen biçim değiştirme yapıları Dazkırı fayının varlığını belgeleyen en önemli verilerdir. Topografik veriler, Dazkırı fayının en az 200 metrelik bir düşey yer değiştirme miktarına sahip olabileceğini gösterir. Acıgöl grabenini güneyden sınırlayan Acıgöl fayı, KD uzanımlı ve kuzeye eğimli normal bir fay olup; Burdur fayı ile benzer karaktere sahiptir. Şekil 11'de görüldüğü gibi, Acıgöl fayı gerçekte Burdur fay zonunun bir bileşeni durumundadır. Acıgöl fayına ait en belirgin görünüşler, Acıgöl Gölünün güney kenarı boyunca yer alır. Topoğrafya da 200 metreye ulaşan kuzey eğimli ve oldukça sarp yamaçlar, breşlenme zonları ve Acıgöl'ü besleyen çizgisel dizimli oldukça sık gözlenen su kaynakları fayı belgeleyen en önemli verilerdir. Topografik veriler, Acıgöl fayının 200 metreden fazla bir düşey yer değiştirme miktarına sahip olabileceğini yansıtır.

### 5.3. Burdur ve Acıgöl Fayları Üzerinde Oluşan Depremler

Acıgöl ile Burdur Gölü arasındaki bölgede yüzyıllık deprem dağılımları incelendiğinde bölgede aktivitenin fazla olmadığı ve genelde küçük ölçekte depremlerin olduğu gözlenmektedir (Şekil 13). Ancak Burdur fay zonu üzerinde son yüzyıl içinde (1900-2000) oluşan depremlerin dağılımı ve konumları incelendiğinde aktivitenin oldukça yoğun ve etkili olduğu görülmektedir. Tablo 1'de Burdur-Rodos Adası arasındaki bölgede Burdur fay zonu üzerinde tarihsel dönemlerde ve son yüzyıl içinde oluşan depremlere ait bilgiler verilmiştir. Buna göre Rodos Adası-Burdur arasındaki bölgede son yüzyıl içinde büyüklükleri 5.0 ile 7.0 ma arasında değişen yedi önemli deprem kaydedilmiştir. Bunların içinde özellikle Burdur'u etkileyen 1914 (7.0 Ma) ve 1971 (6.2 Ma) depremleri önemlidir (Tablo 1).



Şekil 12: Acıgöl ve Burdur Gölü çöküntü havzalarını gösteren jeolojik enine kesiti (Koçyiğit, 1984'ten değiştirilerek).



Şekil 13: Acıgöl ve Burdur Gölü arasındaki bölgede son yüzyılda meydana gelen büyüklüğü 4 ve daha büyük olan depremlerin episanırları ([www.iris.washington.edu](http://www.iris.washington.edu)).

Tablo 1: Burdur fay zonu üzerinde oluşan depremlerin yer, zaman ve büyüklük tablosu (Ertunç vd.,2001).

Tarih	Yer	Büyüklük (M)	Büyüklük (Şiddet)
MÖ 227	Rodos Bölgesi	7.2	-
MÖ 197	Rodos Bölgesi	7.0	-
MÖ 183	Rodos Bölgesi	7.0	-
MS 142	Rodos Bölgesi	7.0	-
1851	Rodos'un doğusu	7.2	-
1875	Isparta Kuzey Batısı	7.0	-
03.10.1914	Burdur	7.1	IX
25.04.1957	Fethiye-Muğla	7.1	IX
25.04.1959	Köyceğiz/Muğla	5.7	VIII
14.01.1969	Fethiye/Muğla	6.2	-
12.05.1971	Burdur	6.2	VIII
01.10.1995	Dinar/Afyon	5.9	VIII

1914 yılında meydana gelen ve Burdur şehri ile çevresinde ciddi hasarlara yol açan Burdur depremi, aynı zamanda Burdur'un güney kısmında kayma eşikleri gibi topografik değişikliklere neden olmuştur. Bu deprem, özellikle Burdur Fayı'nın kuzey kesiminde, Gölbaşı-Gökçebağ segmentin-

de meydana gelen önemli sismik olaylardan biri olarak kayıtlara geçmiştir. 1922 ile 1963 yılları arasındaki dönemde, Burdur Fay Zonu'nun güney bölgesinde etkili olan bir dizi deprem gerçekleşmiştir. Bu sismik etkinlik serisi, 1922'de Karpothas'ta (6.7 Ma) başlamış ve kuzeydoğu yönünde ilerleyerek sırasıyla 1926 Rodos, 1957 Fethiye, 1963 Tefenni ve 1971'de yeniden Burdur'u etkilemiştir (Taymaz ve Price, 1992). Karpothas, Rodos, Fethiye, Tefenni ve Burdur'da meydana gelen bu depremler, 50 yıllık bir periyotta, güneyden kuzeye doğru belirgin bir fay ilerlemesi sergilemesi açısından dikkate değerdir (Yağmurlu, 2000). Bu ilerleme, fay zonu içinde yer alan segmentlerin birbirini tetikleyerek gerilim aktarımı yaptığını göstermektedir. 1971'deki 6.2 büyüklüğündeki Burdur depreminden sonra ise, bölgede herhangi bir büyük sismik aktivite gözlenmemiştir.

Şekil 13'te sunulan son yüzyılın deprem episantır dağılımına bakıldığında, Acıgöl Grabeni'nin her iki yanında episantır yoğunluğu dikkat çekmektedir. Bölgedeki episantır dağılımı, grabeni güneyden ve kuzeyden sınırlayan Acıgöl ve Dazkırı faylarının geçtiğimiz yüzyıl içinde kayda değer bir sismik aktivite gösterdiğini işaret eder. Ancak, bu fayların sismik aktivitesi, Burdur Fayı ile kıyaslandığında daha az yoğunlukta olduğu anlaşılmaktadır.



## 6. Sonuçlar

Bu çalışma, Burdur ve Acıgöl faylarının jeolojik, jeotektonik ve sismik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Çalışma bölgesindeki kaya birimleri, tektonostratigrafik özelliklerine göre otokton ve allokton olmak üzere iki ana grupta toplanmıştır.

Bölgede yeralan otokton birimler başlıca türbiditik tortullardan oluşan Eosen yaşlı Kayıköy formasyonu ile bunu uyumsuzlukla üstleyen ve Oligosen yaşlı molaslardan oluşan Başmakçı formasyonundan meydana gelir. Çalışma bölgesinin çoğunlukla batı bölümünde geniş yayılım gösteren allokton birimler büyük bölümüyle Likya naplarına aittir. Yöredeki allokton oluşuklar, çoğunlukla ofiyolit ve flişten oluşan bir matriks içinde düzensiz olarak dağılmış olan ve boyutları birkaç kilometreye ulaşan başlıca; kireçtaşı, çört, çörtlü kireçtaşı ile metamorfik kaya bloklarından yapılıdır.

Bağıl stratigrafi ilişkileri gözetildiğinde, bölgedeki Likya naplarına ait allokton birimlerin Orta Eosen döneminde bölgeye yerleşmeye başladığını fakat bu yerleşimin Miyosen sonuna dek devam etmiş olduğunu belirtmek mümkündür. Yöredeki alüvyon dolguların ve topografyanın yansıttığı genellikle basamaklı genç morfolojik yapılar bölgedeki aktif fay sistemlerine bağlı olarak gelişmiş olmalıdır.

Çalışma alanını kuzeyden sınırlayan Acıgöl fayı KD uzanımlı normal bir fay olup, Burdur fayı ile benzer karaktere sahip aktif bir faydır. Acıgöl fayı gerçekte Burdur fay zonunun bir bileşeni durumundadır. KD uzanıma sahip Acıgöl fayı KB-GD çekme kuvvetleri sonucunda gelişmiş olmalıdır.

Burdur fay zonu içindeki Burdur fayı Fethiye Körfezi ile Keçiözü arasında yaklaşık 300 km boyunca KD yönünde uzanım gösteren ve sol oblik atım bileşeni olan normal bir faydır. Burdur fayı çoğu yerde tek bir yapısal çizgi halinde olmayıp, gölün güney kenarı boyunca birbirine paralel gelişmiş kesikli uzanıma sahip segmentlerden oluşur. Bu segmentler KKB ve K gidişli aktif faylarla sınırlanmaktadır. Başlıca KD gidişli olan bu segmentlerin uzunluğu 12-22 km arasında değişmektedir.

Burdur fay zonu, Fethiye Körfezi ile Burdur ili arasında kesikli uzanıma sahip KD uzanımlı bir transform fayıdır. Sismik veriler bu fayın Fethiye Körfezi içinde de devam ettiğini ve Rodos'a dek süreklilik gösterdiğini belgeler.

Burdur ve Acıgöl fayları aynı zamanda Ege Levhasının güney sınırını oluşturan önemli bir yapısal çizgilerdir. GPS ölçüm sonuçlarına göre, Ege levhası KD-GB doğrultusunda ve GB yönünde yılda 30 mm dolayında hareket etmektedir. Buna karşın Burdur fayının güneyindeki genişleme hızı en çok 5 mm/yıl düzeyindedir. Bu nedenle Burdur fayı yayılma hızları arasında çok büyük farklılık olan iki bölgeyi birbirinden ayıran ve

transform özelliğine sahip önemli bir yapısal çizgidir. Burdur ve Acıgöl faylarının sol oblik atımlı karakterine bağlı olarak Burdur fay zonu içinde gelişmiş pull-apart havzalar ve çöküntü alanları olağan olarak gözlenir.

Burdur Gölünün bulunduğu alan böyle bir pull-apart havzadır. Ancak, Acıgöl havzası daha çok iki yanı normal faylarla sınırlanmış graben niteliğine sahip bir çöküntü alanı özelliği taşımaktadır.

Burdur fay zonu üzerinde 1922-1971 yılları arasında gelişen depremler, güneybatıdan kuzeydoğuya doğru (Rodos'tan Burdur'a) gelişen bir kırılmanın gerçekleştiğini göstermesi bakımından önemlidir. Acıgöl ile Burdur Gölü arasındaki bölge deprensellik açısından sakin bir bölge özelliği taşımaktadır. Son yüzyılda meydana gelen büyüklüğü 4 ve daha büyük olan depremlerin dağılımları göz önüne alındığında, Burdur fayı Acıgöl fayına göre deprensellik açısından daha aktif bir karaktere sahip olduğu gözlenir.

### **Katkı Belirtme**

Bu makale, Burdur Belediyesi ve Süleyman Demirel Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiş bir Yüksek Lisans tez çalışmasının ürünüdür. Bu çalışmayı destekleyen kuruluşların tüm yöneticilerine teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- Barka, A., Reilinger, R., Şaroğlu, F., ve Şengör, A. M. C. (1996). The Isparta Angle: its importance in the neotectonics of the eastern Mediterranean region. IESCA-1995. İzmir.
- Erakman, B., Meşhur, M., Gül, M.A., Alkan, H., Öztaş, Y. ve Akpınar, M. (1982). Fethiye-Köyceğiz-Tefenni-Elmalı-Kalkan arasında kalan alanın jeolojisi, Türkiye Altıncı Pet. Kong. Tebl. Nisan, 1982, Ankara, 23-31.
- Ertunç, A., Karagüzel, R., Yağmurlu, F., Türker, E. ve Keskin, N. (2001). Burdur Belediyesi kent merkezi ve yakın çevresinin depremselliği ve yerleşime Müh.Mim.Fak. Araştırma projesi (yayımlanmamış).
- Göktaş, F., Çakmakoglu, A., Tarı, E., Sütçü, Y.F. ve Sarıkaya, H. (1989). Çivril-Çardak arasındaki jeolojisi: MTA rap.No.8701, Ankara.
- Görmüş, M. ve Karaman, M.E. (1992). "Facies changes and new stratigraphical-paleontological data in the Cretaceous-Tertiary boundary around Söbüdağ (Çünür-Isparta)" Geosound, Ç. Üniv. 21, 43-47, Adana.
- Görmüş, M. ve Özkul, M. (1995). Gönen-Atabey (Isparta) ve Ağlasun (Burdur) açasındaki bölgenin stratigrafisi: SDÜ Fen Bilimleri Enst.Derg., 1, 43-64.
- Gutnic, M. (1977). Geologie du Taurus Pisidien au Nord d'Isparta (Turquie). Tru.Lab., Geol.Hist.Univ., Paris.XI, 112 p.
- Gutnic, M., Monod, O., Poisson, A. ve Dumont, J.F. (1979). "La formation de l'Isparta Géologie des Taurides occidentales (Turquie)" Mem. Soc. Geol. France, 137, 112pp., Paris.
- IRIS, 2003. <http://www.iris.washington.edu>.
- Jackson, J.A., McKenzie, D. (1984). Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 77, 185-264.
- Karaman, M.E. (1986a). Burdur dolayının genel stratigrafisi. Akd.Üniv. Isp.Müh. Fak. Derg. 2, 23-35.
- Karaman, M.E. (1986b). Burdur İli çevresindeki yerleşim alanlarının depremselliği,

Müh.Jeolojisi Türk Milli Komitesi Bült., No.8.,23-30.

Karaman, M.E., Meriç, E. ve Tansel, İ. (1988) “Gönen-Atabey arasındaki bölgenin jeolojisi”

Cum. Üniv. Müh. Fak. Derg., Sivas.

Karaman, M.E.,Meriç, E. ve Tansel, İ. (1989). Gönen-Atabey arasındaki bölgenin jeolojisi:

Cum.Üniv.Müh.Fak.Derg., seri A. Yerbilimleri c.6-7,129-139

Koçyiğit, A. (1983). Hoyran gölü (Isparta büklümü) dolayının tektoniği. TJK. Bült. 26/1, 1-10,

Ankara.

Koçyiğit, A. (1984). Güneybatı Türkiye ve yakın dolayında levha içi yeni tektonik gelişim, TJK

Bült., 24/1, 1-16.

McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., Gürkan, O.,

Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A., Paradissis, D., Peter, Y., Prilepin, M., Reilinger, R., Şanlı, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksöz, M.N., Veis, G. (2000). Global positioning system eastern Mediterranean and Gucasus : Journal of Geophysical Research, V. 105, no.B3, 5695-5719.

Poisson, A. (1977). Recherches geologiques dans les Taurides occidentales (Turquie):These

Univ.Paris.Sud,Orsay, 795p.

Sarp, H. (1976). Etude Geologique petrographique du cortege ophiolitique de la region situee au

Nort-Quest de Yeşilova (Burdur-Turquie): These Univ. Geneve, 377p.

Şenel, M., Selçuk, H., Bilgin, Z.R., Şen.M.A., Karamn, T., Dinçer, M.A., Durukan, E., Arbaş,

A., Örcen, S., Bilgi,C. (1989). Çameli (Denizli)-Yeşilova (Burdur)-Elmalı (Antalya) ve dolayının jeolojisi: MTA.Rap.9429, Ankara.

Şengör, A.M.C., Satır, M. ve Akkök, R. (1984). Timing of tectonic events in the Menderes

massif, Western Turkey: Implications for tectonic evolution and evidencefor Pan-African basement in Turkey. Tectonics, 3, 693-707.

Şengör, A.M.C. (1987). Cross faults and differential stretching of hanging walls in regions of

- low-angle normal faulting: examples from western Turkey. In: Continental extensional tectonics, (Coward M.P., Dewey J.F. and Hancock P.L. eds) Geological Society Special Publication, 28, 575-589.
- Taymaz, T., Jackson, J., and McKenzie, D. (1991). Active tectonics of the north and central Aegean. *Geophysical Journal International*, 106, 433-490.
- Taymaz, T. and Price, S. P. (1992). The 12. 05. 1971 Burdur earthquake sequence: A synthesis of seismological and geological observations. *Geophys. J. Int.* 108. 589-603.
- Yalçınkaya, S., Ergin, A., Afşar, Ö.P. ve Taner, K. (1986). Batı Torosların jeolojisi. MTA.Rap.No.7779, Ankara.
- Yağmurlu, F. (1994). Isparta kuzeyinde yer alan Oligosen yaşlı molas tipi kırıntılı tortulların tektono-sedimanter özellikleri, Ç.Ü.Müh.Mim.Fak.15.yıl Semp.c.II 241-252
- Yağmurlu, F., Savaşın, Y., and Ergün, M. (1997). Relation of alkaline volcanism and active tectonism within the evolution of Isparta Angle, SW-Turkey: *The Journal of Geology*, 105, 717-728.
- Yağmurlu, F. (2000). Burdur fayının sismotektonik özellikleri: Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, Bildiriler, 143-152, İzmir.





**MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ  
DÜNÜ BUGÜNÜ**

*Gülşah ÖNER*

## 1. GİRİŞ

Magnezyum (Mg), tabiatta en çok bulunan sekizinci elementtir ve yerkabuğunun yaklaşık % 2'sini oluşturur. Magnezyum (Mg), günümüzde uçak, uzay ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde en hafif olanıdır. Mg günümüzde, Alüminyum, titanyum ve çeliklerden sonra en yaygın olarak kullanılan yapısal metaldir. Magnezyum elementinin simgesi Mg'dir. 12 atom numarasına sahip olan magnezyum elementi 24,312 atom ağırlığında bulunmaktadır. Yoğunluk seviyesi 1,74–2,0g/cm<sup>3</sup>, alüminyumdan %33 daha hafif ve çelikten %77 daha hafiftir. En hafif metal olarak da bilinmektedir. Ortalama % 0,13 konsantrasyonla deniz suyunda en çok çözünen üçüncü elementtir. Magnezyum 60'tan fazla mineralde bulunmasına rağmen, yalnızca dolomit, manyezit, brusit, karnalit ve olivin ticari öneme sahiptir (Jayasathyakawin et al., n.d.; Kala, 2014; Kramer, 2001; *Manyezit*, n.d.).

Magnezyum ve magnezyum bileşikleri deniz suyu, kuyu ve göl sularından ve ayrıca yukarıda belirtilen minerallerden üretilir. Element olarak keşfi 18. yüzyıla dayanmaktadır. 1755 yılında İskoç kimyager Joseph Black tarafından keşfedilmiştir. 1795 yılında J.C. Delanethrie "manyezit" terimini bir dizi magnezyum tuzuna (karbonat, sülfat, nitrat ve klorür) uygulamıştır. Çekoslovakya'nın Moravya kentinde doğal magnezyum karbonat yatakları keşfedildi ve C.F. Ludwig tarafından 1803'te 'talk karbonatum' olarak adlandırılmıştır. Daha sonra 1808 yılında "D.L.G. Karsten" magnezyum karbonata "manyezit" adını vermiştir (Jayasathyakawin et al., n.d.; Kramer, 2001; *Manyezit*, n.d.).

Magnezyum metalinin ilk kez 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından magnezyum oksidin potasyum buharıyla indirgenmesiyle üretildiği bildirilmiştir. 1833'te Michael Faraday, erimiş susuz magnezyum klorürün elektrolizi ile magnezyum elde etmiştir ve 1852'de Robert Bunsen bu amaçla bir elektrolitik hücre geliştirmiştir. Magnezyumun ilk endüstriyel üretimi 1863 yılında Fransa'da Deville ve Caron tarafından gerçekleştirilmiştir ve susuz magnezyum klorür ve kalsiyum florür karışımının sodyum ile indirgenmesini içermektedir. 1886'da Kaliforniya'da 19. yüzyılın ikinci yarısında da Avusturya ve Yunanistan'da manyezit yatakları keşfedilmiştir. Bunsen'in elektrolitik hücresinin bir modifikasyonu kullanılarak, 1886'da Almanya'da pilot tesis ölçeğinde magnezyum metali üretilmiştir. 1890'lı yıllarda manyezit, Avrupa'da açık ocak fırınlarında refrakter astarlarda kullanılıyordu.

1909'a gelindiğinde ise her yıl önemli miktarlarda kalsine manyezit Amerika Birleşik Devletleri'ne ihraç edilmiştir ve 1912'de Batı Amerika Birleşik Devletleri'nde belirli derecelerde ithal edilen malzemenin yerine öğütülmüş Kaliforniya manyeziti kullanılmıştır. 1913 yılında Pensil-

vanya'da dolomit kullanılarak, çökeltilerek magnezya (magnezyum oksit) üretimine başlanmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk magnezyum fabrikası 1914 yılında General Electric Co. tarafından Schenectady, NY'da inşa edilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde magnezyum üretimi istikrarlı bir şekilde artmıştır. Amerika'da farklı bölgelerde 1929-1937 yıllarında manyezit madenciliği ile birlikte magnezyumun yangın bombalarında kullanılması nedeniyle İkinci Dünya Savaşı sırasında keskin bir artış yaşanmıştır. Yerli magnezyum cevherlerinin madenciliği ve işlenmesi, 1940'ların başında kimyasalların ve magnezyum metalinin yanı sıra refrakter üretimi için malzeme sağlamak amacıyla genişletilmiştir. Ayrıca deniz suyundan elde edilen magnezyum klorür, Freeport ve Velasco, Teksas'taki tesislerde magnezyum metali üretmek için büyük miktarlarda kullanılmıştır. Amerikan Hükümeti tarafından 2. Dünya Savaşına magnezyum sağlamak amacıyla 1940 ile 1943 yılları arasında 13 adet magnezyum metal fabrikası inşa edilmiştir (Kramer, 2001; *Manyezit*, n.d.).

Yirminci yüzyılın ilk yarısında magnezyum alaşımları sivil ve askeri uçak bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra magnezyum alaşımlarının ihmal edilmesi, üretimin 1944'te 228800 ton/A'dan İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra 10000 ton/A'ya düşmesine sebep olmuştur. Yirminci yüzyılın ikinci yarısında magnezyum alaşımlarının en önemli uygulaması, VolksWagen Beetle için hava soğutmalı motor ve dişli kutularının üretiminde kullanılması olmuştur. BMW firması AZ91 alaşımlı motor bloğu üretmiş ve ticari olarak kullanmıştır. R6 adını verdikleri motorda, krank kutusu, kam kapağı alüminyum alaşımlı magnezyum malzemeden imal edilmiş olup, önceki motora göre 10 kg daha hafiflik sağladığı tespit edilmiştir (I. M. Baghni, Wu Yinshun, Li Jiuqing, Du Cuiwei, 2003; Öztürk, Fahrettin; Kaçar, 2012).

Çeliğin yoğunluğunun dörtte biri, alüminyumun yalnızca üçte ikisi kadar olan ve her ikisini de aşan yüksek mukavemet oranına sahip magnezyum alaşımları, iyi sönümleme davranışı ve yüksek sürünme direnci etkinliği nedeniyle otomobil ve havacılık uygulamalarında kullanılan başlıca malzemelerdir. Magnezyum, alüminyumdan % 35 daha hafif bir metaldir. Kullanımı otomobillerle sınırlı olmayıp, bilgisayar bileşenleri VCD/DVD kasaları, telekomünikasyon cihazları, spor malzemeleri ve daha birçok kullanım dahil üzere mikro elektronik endüstrisi gibi birçok başka uygulamalara da uzanmaktadır (I. M. Baghni, Wu Yinshun, Li Jiuqing, Du Cuiwei, 2003; Jayasathyakawin et al., n.d.; Nezamdoust et al., 2019; Öztürk, Fahrettin; Kaçar, 2012; Panigrahi et al., 2012).

## 2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ UYGULAMA ALANLARI

Saf magnezyum, yüksek sıcaklıklarda uçucu hale geliyor olması ve nemli ortamlarda da korozyona uğraması sebebiyle kullanılamamaktadır. Bu nedenle magnezyum alaşımlarının kullanımı havacılık ve otomotiv parçalarını dizayn ederken önemli olmaktadır (DEMİRCİ et al., 2015). Alaşımlama, alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Mg alaşımı, baskın kimyasal özelliğinden dolayı biyolojik olarak parçalanabilen bir malzemedir ve Mg alaşımının plastiklik, sertlik gibi mekanik davranışları biyolojik olarak emilebilir polimerler için benzersizdir (Hou et al., 2014; Jayasathyakawin et al., n.d.). Oda sıcaklığında Mg alaşımının daha az süneklik ve zayıf şekillendirilebilirlik içerdiği belirlenmiştir (Jayasathyakawin et al., n.d.; Le et al., 2019) **33% lighter than aluminium and 77% lighter than steel. The microstructure and mechanical property of Magnesium (Mg).**

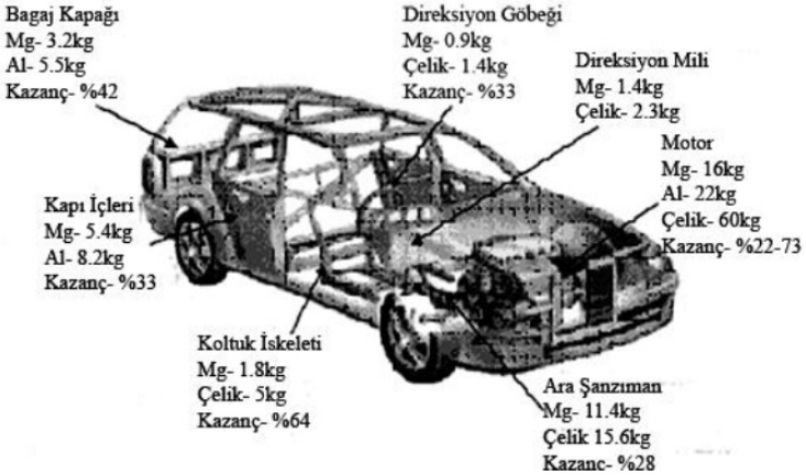
Mg alaşımları, yapısal uygulama açısından çok önemli olan mukavemet-ağırlık oranına, şekillendirilebilirlik özelliklerine, daha iyi sönümleme özelliklerine, akışkanlığa, sıcak şekillendirilebilirliğe, iyi işlenebilirliğe, düşük sıcaklık özelliklerine ve yüksek sürünme direnci aktivitesi nedeniyle otomobil ve havacılık uygulamalarında kullanılan başlıca malzemelerdir (Jayasathyakawin et al., n.d.; Kulekci, n.d.; Unnikrishnan et al., n.d.).

Teknolojik gelişmelere rağmen ulaşım sektörü bugün hala zorluklarla karşı karşıyadır. Bu anlamda en önemli zorluk, yakıt verimliliği ve aracın toplam ağırlığının azaltılması ile doğrudan bağlantılı olmayan CO<sub>2</sub> emisyonlarının çevreye olan zararlı etkileridir. Bu nedenle, otomobil üreticileri, aracın yakıt verimliliğini önemli ölçüde etkileyeceğinden, bileşenlerin ağırlığını azaltma konusunda sürekli bir istek içindedir. Hafif yapılara yönelik bu talep, metallerden daha geniş özelliklere sahip olan alaşımlardan ziyade birçok alaşıma odaklanılmasına neden olmuştur (Unnikrishnan et al., n.d.).

Çelik ve alüminyum alaşımları yerine Magnezyum alaşımı kullanılırsa yaklaşık %70 ve %30 ağırlık tasarrufu sağlanabilir (A. Kumar et al., 2018; Polmear, 1994). Magnezyum (Mg) alaşımları, düşük yoğunluk, hafiflik, mükemmel korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta iyi mekanik özellikler gibi önemli malzeme özellikleri içerir. Alaşımların doğru seçilmesinin tasarımda genel taşıma yükünü önemli ölçüde azaltacağını ve böylece istenen performansın elde edileceğini göstermektedir. Ağırlık azaltma, taşıtta daha iyi performans seviyeleri, düşük emisyonlar, daha iyi yakıt verimliliği vb. gibi pek çok avantaj sunmaktadır. Neredeyse tüm endüstriler çevrenin korunmasına büyük önem vermektedir ve otomobil endüstrisi de bundan farklı değildir. Otomobil ağırlığının büyük bir kısmı şasi, motor

bileşenleri, güç aktarma organları bileşenleri vb. üzerinde yoğunlaşmıştır. Bazı araştırma istatistikleri, ağırlığın yaklaşık %30'unun şasiyle ilgili olduğunu ve aynı zamanda güç aktarma organları bileşenleriyle de aynı olduğunu göstermektedir. Daha iyi dayanıklılık, darbe dayanımı vb. özelliklere sahip uygun ikame malzemeler için sürekli araştırmalar devam etmektedir. Bu talep, Magnezyum alaşımlarının özellikleri ve Alüminyum alaşımlarının özelliklerine benzer olduğundan, otomotiv bileşenleri için özellikle Magnezyum alaşımlarının seçilmesiyle sonuçlanmıştır (Davies, 2012; Unnikrishnan et al., n.d.).

Fren braketleri, fren/debriyaj pedali braketleri, hava yastığı muhafazaları, motor beşiği/alt şasi, Koltuk tabanı, konsol braketleri, gösterge paneli çapraz kirişi, Kilitlenmeyi Önleyici Fren Sistemi (ABS) muhafazası, direksiyon armatürü, direksiyon kolunu braketleri bant göbeği, ceket tertibatı ve muhafazalar gibi çeşitli otomotiv parçaları gibi magnezyum alaşımların çeşitli uygulamaları hakkında bilgi vermekte olup, kilit yuvası, aktüatör muhafazası ve tutucusu, Sunroof kapağı/kapak tertibatı, dış demir donanımı, tavan çerçevesi, Alternatör A/C braketleri, alternatör braketleri, alternatör/avara braketleri, valf kapağı, eksantrik kapağı, EGR valf plakası, debriyaj muhafazası, yağ karteri, kam kapağı, hidrolik direksiyon pompası braketleri gibi dış bileşenlerde de kullanılmaktadırlar (Easton et al., 2012; Unnikrishnan et al., n.d.). Ayrıca gösterge panelleri, direksiyonlar, motor kızakları, koltuklar, transfer kutuları ve birçok farklı muhafaza da yer almaktadır. Şekil 1'de Magnezyumun çelik ve alüminyuma göre sağladığı ağırlık kazancı görülmektedir (*Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları*, n.d.).



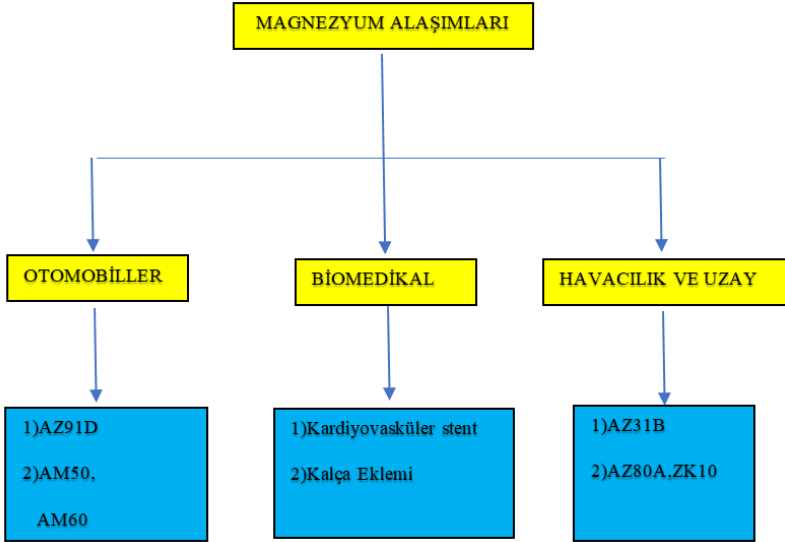
Şekil 1. Magnezyumun çelik ve alüminyuma göre sağladığı ağırlık kazancı (*Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları*, n.d.).

Mg ve alaşımları üstün biyouyumluluk özelliklerinden dolayı sağlık sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Mg bazlı implantlar, klinik uygulamalarda hem vivo (“yaşamın içinde” Bütün bir canlı organizmada gerçekleştirilen iş) hem de vitro (“camın içinde”, yapılan işlem canlı bir organizmanın dışında) olarak çalışmalarda daha iyi biyouyumluluğa sahiptir (Xin et al., 2010) **abstract”:** **“In spite of the immense potential of biodegradable magnesium alloys, the fast degradation rates of Mg-based biomedical implants in the physiological environment impose severe limitations in many clinical applications. Consequently, extensive in vitro studies have been carried out to investigate the materials’ performance and fathom the associated mechanisms. Here, an up-to-date review of the in vitro studies on biomedical magnesium alloys in a simulated physiological environment is provided. This review focuses on four topics: (1.**

Magnezyum (Mg), biyolojik olarak uyumlu olması ve biyolojik dokulara zarar vermemesi nedeniyle implant malzemesi olarak kullanılabilir. Çevre dostu bir metaldir. İnsan vücudundaki doğal magnezyumun yarısı 25 gr ağırlığında olup, kemiklerde bulunmaktadır. Mg alaşımları çekici bir bozunma özelliğiyle in vivo olarak parçalanabilir (N. B. Kumar & Kumar, 2022; Pesode & Barve, 2023; S. Zhang et al., 2009) **stainless steel, titanium, magnesium-based alloys, cobalt-based alloys are used as suitable materials for biomedical implants. Magnesium and its alloys are highly used as a suitable metal for the present-day biomedical implants because of its increased ability to get mixed in the human bodily fluids, eliminating the shortcomings like stress shielding effect, metal toxicity over a certain period of utilization, second surgery caused by other metal implants. The bioabsorbable and bioresorbable properties, mechanical strength, excellent osteogenic properties, degradation, and dissolving property of the magnesium alloys are the unique characteristics that make it a suitable choice for biodegradable bone replacements. Fabrication of complex geometry implants through conventional manufacturing techniques stands challenging. The introduction of the additive manufacturing (AM.** Magnezyum kemik implantları, ilk implantasyon süreci boyunca mekanik kurulum desteği sağlayacak şekilde tasarlanmıştır; Hasar görmüş kemik dokusu onarıldığında, giderek bozulur ve geçici olarak değiştirilerek tedavi edici rolleri mükemmel bir şekilde yerine getirirler. Daha da önemlisi, Mg iyonlarının insan vücuduna herhangi bir zararı olmadığı tespit edilmiştir (Myrissa et al., 2015; Pesode & Barve, 2023).

Biyomalzemeler, insan vücudu ile uyumlu, hasar gören noktalarda kullanılan yüksek derecede fizyolojik olarak vücuda uyumlu malzemelerdir. İmplant malzemelerin bir kısmı insan kemiğinden bile daha yüksek muka-

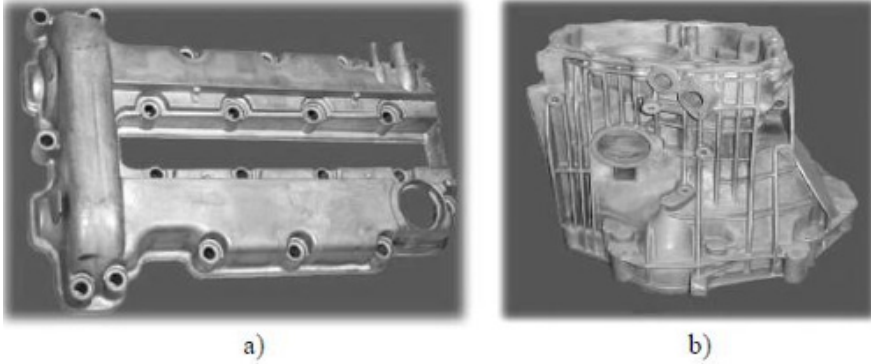
vemet sahip paslanmaz çelik, tungsten, kobalt ve titanyum bazlı alaşımlardır (Chen et al., n.d.; Danacı, 2020; Qizhi Chen, 2015; Sezer et al., 2018; Yuan et al., 2017). Böylesine yüksek mukavemete sahip malzemeler insan vücudundaki, komşu dokuların yakınında stres-koruyucu etki oluştururlar. İnsan vücudundaki yer alan magnezyum iyonlarının konsantrasyonunun yüksek olması sebebiyle magnezyumun biyouyumluluğu çok yüksektir, Magnezyum alaşım malzemeleri biyoimplant uygulamalarında potansiyel olarak tercih edilmektedir. Magnezyum, çözünürlüğü kolay ve toksik olmayan korozyon ürünlerini oluşturmaktadır. Bu ürünler idrar yoluyla zararsız bir şekilde insan vücudundan kolaylıkla atılmaktadır (Danacı, 2020; Fan et al., 2019; Qizhi Chen, 2015; Ramalingam et al., 2020; X. Zhang et al., 2012){"id": "I-TEM-2", "itemData": {"DOI": "10.1007/s12540-019-00346-8", "ISBN": "0123456789", "abstract": "The work reviews the research and development status of magnesium alloy, with more attention to the methodologies and technologies adopted to improve the properties of AZ91 alloy. The drive force of utilizing magnesium alloys for automotive and biomedical application is light weightness and biocompatibility respectively. However, the softness and high activity of magnesium alloys result in high wear and high corrosion rate respectively. One of the essential factors influencing the properties of magnesium alloy is its microstructure. Consequently, the grain size, morphology and distribution of phase constituents influence the properties of magnesium alloys. The modification of microstructure through processing route (hot working and cold working. Şekil 2, Mg bazlı alaşımlarının kullanım alanları görülmektedir(Jayasathyakawin et al., n.d.).



Şekil 2. Magnezyum Alaşımların kullanım alanları (Jayasathyakawin et al., n.d.).

Magnezyumun (Mg) korozyona karşı hassas olduğu göz önüne alındığında, Mg'ye bağlı olarak geri dönüştürülebilir nanokompozitler oluşturmaya yönelik talepte bir artış olmuştur. Saf Mg'nin oksidasyon problemlerini çözmek için uygun organik takviye maddeleri, metal alaşımları veya yüzey değişiklikleri ile kompozitlerin üretilmesi dahil çok sayıda strateji uygulanmıştır. Şimdiye kadar keşfedilen hafif metal olan Mg'nin yapısal alaşımlarda kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Mg bazlı Metal Matris Kompozitler (MMC) ideal seçeneklerdir. Çünkü düşük ağırlıkları, geliştirilmiş sertlikleri, toklukları, mukavemet-ağırlık oranları ve yorulma dirençleri nedeniyle şimdiye kadar mekanik ve biyomedikal alanlarındaki zorlukları çözmüştür. Daha hafif alaşımlar ve nanokompozitler otomotiv ve havacılık endüstrilerine hitap etmekte ve çelik, dökme demir, çinko bileşimleri ve hatta alüminyum (Al) alaşımları gibi daha ağır metallerin yerine geçebilmektedir (Kumar Jha et al., 2023).

Magnezyum Alaşım AZ91D, en yaygın kullanılan magnezyum döküm alaşımıdır ve oda sıcaklığında iyi dayanım, iyi döküm kabiliyeti, iyi atmosferik kararlılık ve mükemmel tuzlu su korozyon direnci özelliklerine sahiptir (AZ91D, n.d.). Şekil 3'te AZ91 alaşımı döküm parçaları görülmektedir (Li, n.d.).



Şekil 3. AZ91 alaşımı döküm parçaları a) üst yağ kapağı b) aktarma parçası (Li, n.d.).

Magnezyum alaşımları hafif özelliklerinden dolayı otomobil ve havacılık sektörlerinde popülerdir. Magnezyum AM50 döküm alaşımı mükemmel sünekliğe, üstün enerji emme özelliklerine ve iyi bir dayanıma ve dökülebilirliğe sahiptir. Magnezyum AM60 döküm alaşımı mükemmel sünekliğe, üstün enerji emme özelliklerine ve iyi bir dayanıma ve dökülebilirliğe sahiptir (Magnesium AM60B Cast Alloy (M10602), n.d.).

AZ31B Magnezyum alaşımları, Sönümlenme kabiliyeti olan, korozyona dayanıklı, haddelenmiş alüminyumdan 5 kata kadar daha fazla işlenebilirlik sağlama, yüzey işleme gerektirmeyen, birim ağırlık başına

mükemmel mukavemet ve sertliğe sahip olan, 350 Fahrenheit dereceden -30 Fahrenheit dereceye kadar geniş bir çalışma sıcaklığı aralığında çalışabilen özelliklere sahiptirler. Düz bir yüzey veya yüksek boyutsal stabilite gerektiren uygulamalar, magnezyum takım plakasının kullanımından yararlanır. Tipik kullanım alanları arasında aparatlar, fikstürler, optik tezgahlar, titreşim test ekipmanı ve muayene göstergeleri yer almaktadır. Magnezyum takım plakası manyetik değildir ve elektronik ve bilgisayar endüstrilerindeki birçok malzeme ihtiyacını karşılayan yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahiptir (*AZ31B-O Magnesium Alloy Sheet AZ31B-H24 Magnesium Hot Rolled Plate Sheet*, n.d.).

Magnezyum alaşımı AZ80A diğer alaşım malzemeleri arasında oldukça yüksek çekme mukavemetine sahip olan ve orta derecede düşük bir elektrik iletkenliğine ve orta derecede düşük bir erime sıcaklığına sahip bir malzemedir (*AZ80A (3.5812, M11800) Magnesium*, n.d.).

AZ80A, alüminyum, çinko ve manganez içeren dövme(işlenmiş) magnezyum bazlı bir alaşımdır. Fabrikasyon formdan yapay yaşlandırmayla mukavemet artışı sağlanmaktadır. AZ80A'daki dövme parçalar, uydular, helikopter dişli kutuları ve rotor göbekleri, bisiklet şasileri, yol tekerlekleri, füze çerçeveleri ve ara kademe kaplamaları, fren muhafazaları ve iniş takımı destekleri için yüksek mukavemetli parçalarda uygulama alanı bulur (*AZ80A (3.5812, M11800) Magnesium*, n.d.; *Magnesium Alloys*, n.d.).

Magnezyum alaşımlı malzemeler giderek daha mükemmel performans göstermesiyle birlikte, havacılık ve uzay uygulamalarının da dikkatini çekerek günümüz teknolojilerinde uygulama imkanı bulmuştur. Uzay teknolojisi geliştikçe, yük taşıma kapasitesini ve uzay aracının kapsamlı performansını artırmak için yapısal malzemelerin ağırlığının azaltılması acil hale gelmiştir (Bai et al., 2023).

Magnezyum (Mg) alaşımları düşük yoğunluk, yüksek spesifik dayanım, iyi biyouyumluluk ve iyi elektromanyetik koruma gibi büyük avantajlara sahiptir ve havacılık uygulamalarında ağırlığın azaltılması için ideal bir metal yapı malzemesidir. Bununla birlikte, Magnezyum (Mg) alaşım malzemeleri ile tasarım planlanırken, uzay aracının fırlatma titreşimi, vakum, atomik oksijen, ultraviyole ışınlama, elektron ışınlama ortamı ve insanlı uzay aracı gibi özel ortamlardan geçmesi gerektiği için, havacılıkta kullanılan yapısal malzemeler, mukavemeti, modülü, uzay ortamına uyurlanabilirliği ve elektriksel iletkenliği veya korozyon önleyici özelliklerinin dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Magnezyum alaşımının gelişmesiyle birlikte, magnezyum alaşımlarının uzay ve havacılık alanındaki uygulamaları giderek daha çeşitli hale gelmiştir. Roketler, gezegen görevleri, kaynak kullanımı ve uzay araçları da dahil olmak üzere yapısal malzemeler ve enerji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar (Bai et al., 2023).

Magnezyumun CO<sub>2</sub>'de yanması birincil enerji üretim döngüsü olarak kabul edilmektedir. Mars görevlerinde gezici araçlar yerine CO<sub>2</sub>/metal(Mg tozu) roket motorlu balistik hazneli araçlar kullanılmaktadır. Mars'taki CO<sub>2</sub> her kalkıştan önce elde edilir; Sıvı CO<sub>2</sub>, Dünya'dan taşınan toz halindeki magnezyum yakıt için doğrudan oksitleyici olarak kullanılmıştır. CO<sub>2</sub>/metal itiş gücünün, Dünya'dan taşınan geleneksel çift itici yakıt kullanan motorlarla karşılaştırıldığında çok daha uzun atlamalar vaat ettiği de tespit edilmiştir. Mars görevleri için kaynağı tam anlamıyla geliştirmek amacıyla, Mg tozu CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girecek şekilde kullanılmaktadır. Mg tozu ve sıvı CO<sub>2</sub> çift yakıtlı roket motorunun, nitelikli bir ateşleme ve iyi bir yanma performansı sunarak düzgün çalışabildiği bulunmuştur (Bai et al., 2023).

25–30 kg CO<sub>2</sub>/Mg roket tahrik sistemi ve 9–13 kg CO<sub>2</sub> toplama ünitesi-ne sahip 200 kg'lık hazne, 180 Mars günü boyunca Mars yüzeyinde toplam 10–15 km menzille 10–15 atlama gerçekleştirebilir. CO<sub>2</sub> toplama verimliliği ve mevcut güç, kritik parametrelerdir ve bunların iyileştirilmesi, besleme hunisinin menzilin önemli ölçüde artırabilecek ve görev süresini kısaltabilecektir (Shafirovich et al., 2006)”abstract”:**”The paper explores the feasibility of using ballistic hopper vehicles with CO<sub>2</sub> /metal rocket engines instead of rovers in Mars missions. The hopper mission scenario involves several ballistic flights and hence visiting several sites on Mars surface. The Martian CO<sub>2</sub> is acquired before every takeoff; the liquid CO<sub>2</sub> is used directly as oxidiser for powdered magnesium fuel transported from Earth. The mission analysis takes into account the power and time required for CO<sub>2</sub> acquisition. The mathematical simulation shows possibilities to fulfil the exploration programme typically assigned for a rover. It is also shown that the CO<sub>2</sub>/metal propulsion promises much longer hops as compared with engines using conventional bipropellant transported from Earth.”**,”author”:[{“dropping-particle”：“”,“family”：“Shafirovich”,“given”：“Evgeny”,“non-dropping-particle”：“”,“parse-names”：false,“suffix”：“”}],{“dropping-particle”：“”,“family”：“Salomon”,“given”：“Michaël”,“non-dropping-particle”：“”,“parse-names”：false,“suffix”：“”}],{“dropping-particle”：“”,“family”：“Gökalp”,“given”：“Iskender”,“non-dropping-particle”：“”,“parse-names”：false,“suffix”：“”}],“container-title”：“Acta Astronautica”,“id”：“ITEM-1”,“issued”：{“date-parts”：[[“2006”]],“page”：“710-716”,“title”：“Mars hopper versus Mars Rover”,“type”：“article-journal”,“volume”：“59”},“uris”：[“http://www.mendeley.com/documents/?uuid=46cfa32-2ac1-3c76-856e-baf56f86aafb”}],“-mendeley”：{“formattedCitation”：“(Shafirovich et al., 2006.

Magnezyum alaşımları için çok çeşitli uygulamalar belirlenmiş olmasına rağmen şu anda kullanımları üç faktörden dolayı sınırlıdır; birincisi, magnezyum ve magnezyum alaşımlarının, düşük erime noktasına sahip,

sıkı paketlenmiş altıgen bir yapıya sahip olmasıdır; kristal yapısının hegzagonal sıkı paket (HSP) olmasından dolayı şekillenebilirlik ve ergitme sırasında yanma gibi döküm problemleri nedeni ile üzerinde Alüminyum kadar çalışmalar yapılamamıştır. İkinci faktör süneklik, tokluk ,sürünme direnci, ve düşük korozyon direncinden kaynaklanmaktadır; sonuç olarak korumasız magnezyum alaşımları sulu çözeltilerde hızla çözünür. Üçüncü faktör ise magnezyum ve magnezyum alaşımlarının fiyatının alüminyum veya plastiğe kıyasla hala yüksek olmasıdır. Magnezyum ayrıca alüminyum bazlı alaşımlara ilave olarak kullanılmaktadır (I. M. Baghni, Wu Yinshun, Li Jiuqing, Du Cuiwei, 2003).

Yine de pek çok olumsuzluklara rağmen günümüzde ekolojik denge, geri dönüşüm, yakıt tasarrufu vb. gibi konularla ilgili yoğun araştırmaların artışı ile birlikte, özellikle son yıllarda Magnezyum kullanımını üzerinde daha fazla yoğunlaşma göze çarpmaktadır. Bu nedenle farklı alaşım özelliklerine sahip magnezyum alaşımları üzerinde son yıllarda yapılan araştırmaların arttığı da görülmektedir (Kala, 2014).



## SONUÇ

Magnezyum alaşımlı malzemeler artık daha mükemmel performans göstermesiyle birlikte, havacılık ve uzay uygulamalarında acil ağırlık azaltma ihtiyacı altında giderek daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak ağır havacılık ortamı nedeniyle magnezyum alaşımlı malzemelerin mukavemetinin, korozyon direncinin ve elektrik iletkenliğinin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Pek çok bilim insanı daha kapsamlı mekanik özellikleri incelemeye kararlıdır. Ayrıca, yüksek emisyonlu oksidasyon ve yüksek korozyon önleyici elektrokaplama gibi uzay uygulama özelliklerine sahip yüzey işleme prosesleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Aynı zamanda havacılıkta kullanılan magnezyum alaşımlı malzemelerin yüzey işlemleri de analiz edilmektedir. Pek çok bilim insanının derinlemesine araştırmaları, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi, yüzey koruma ve fonksiyonel teknolojinin gelişmesiyle birlikte, magnezyum alaşımlarının giderek daha fazla havacılık uygulamalarında kullanılacağına ve havacılık alanına daha fazla katkı sağlayacağına inanılmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının güvenliğini ve güvenilirliğini daha da artırmak ve uygulamalarını genişletmek için araştırmalar sürdürülmektedir. Otomobil, biyomedikal, havacılık ve uzay teknolojilerinde yaygın olarak kullanımları devam etmektedir.



## KAYNAKLAR

- AZ31B-O magnesium alloy sheet AZ31B-H24 magnesium hot rolled plate sheet.* (n.d.). [https://www.cnmagalloy.com/product/205.html?gclid=EAIaIQob-ChMI6NqTuYbkggMVxkFBAh20qAO9EAAAYASAAEgJiYfD\\_BwE](https://www.cnmagalloy.com/product/205.html?gclid=EAIaIQob-ChMI6NqTuYbkggMVxkFBAh20qAO9EAAAYASAAEgJiYfD_BwE)
- AZ80A (3.5812, M11800) Magnesium.* (n.d.). <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AZ80A-3.5812-M11800-Magnesium>
- AZ91D.* (n.d.). <https://www.dynacast.com/en/knowledge-center/material-information/magnesium-casting-metals/az91d>
- Bai, J., Yang, Y., Wen, C., Chen, J., Zhou, G., Jiang, B., Peng, X., & Pan, F. (2023). Applications of magnesium alloys for aerospace: A review://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ ) Peer review under responsibility of Chongqing University. *Journal of Magnesium and Alloys*, 11, 3609–3619. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.09.015>
- Chen, Y.-T., Hung, F.-Y., & Syu, J.-C. (n.d.). *Biodegradable Implantation Material: Mechanical Properties and Surface Corrosion Mechanism of Mg-1Ca-0.5Zr Alloy.* <https://doi.org/10.3390/met9080857>
- Danacı, İ. (2020). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle AZ91 Mg Alaşımının Üretimi ve Sol-Jel Yöntemiyle Ta2O5/Hidroksiapatit Tabakalı Kaplanması ve Karakterize Edilmesi.* Gazi Üniversitesi.
- Davies, G. (2012). *Materials for automobile bodies.* Elsevier.
- DEMİRCİ, M., VANLI, A. S., & AKDOĞAN, A. (2015). Savunma Sanayinde Kullanılan Magnezyum Alaşımları ve Uygulama Alanları. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 7(4), 13–20. <https://doi.org/10.29137/UMAGD.380998>
- Easton, M., Gibson, M., Beer, A., Barnett, M., Davies, C., Durandet, Y., Blacket, S., Chen, X., Birbilis, N., & Abbott, T. (2012). The Application of Magnesium Alloys to the Lightweighting of Automotive Structures. *Sustainable Automotive Technologies 2012*, 17–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24145-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24145-1_3)
- Fan, Y., Wu, G., Gao, H., -, A., Brady, M. P., Leonard, D. N., McNally, E. A., Esmaily, M., Mortazavi, N., Svensson, J. E., Vaira Vignesh, R., Padmanaban, R., & Govindaraju, M. (2019). Investigations on the surface topography, corrosion behavior, and biocompatibility of friction stir processed magnesium alloy AZ91D. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 7, 25020. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab269c>
- Hou, L., Li, Z., Pan, Y., Du, L., Li, X., Zheng, Y., & Li, L. (2014). In vitro and in vivo studies on biodegradable magnesium alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24, 466–471. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.09.002>
- I. M. Baghni, Wu Yinshun, Li Jiuqing, Du Cuiwei, Z. W. (2003). Mechanical Properties and potential applications of magnesium alloys. *Transactions of*

*Nonferrous Metals Society of China*, 13(6), 1253–1259.

Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Anand Chairman, C., & Balasundaram, R. (n.d.). *Mechanical properties and applications of Magnesium alloy-Review*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255>

Kala, A. (2014). *Magnezyum alaşımlarının işlenebilirliğinin incelenmesi*. Şeyh Edebali Üniversitesi.

Kramer, D. A. (2001). *Magnesium, its alloys and compounds*.

Kulekci, M. K. (n.d.). *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>

Kumar, A., Kumar, S., & Mukhopadhyay, N. K. (2018). Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites Peer review under responsibility of Chongqing University. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.05.006>

Kumar Jha, M., Misra, A., & Sharma, V. S. (2023). *Recent trends in biodegradable magnesium matrix composite: Manufacturing techniques, applications, and future scope*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.045>

Kumar, N. B., & Kumar, S. S. (2022). Magnesium role in additive manufacturing of biomedical implants-Challenges and opportunities. *Additive Manufacturing*, 55, 102802. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102802>

Le, Q., Jia, W., & Ning, F. (2019). Heat transfer analysis of magnesium alloy plate during transport process Peer review under responsibility of Chongqing University. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7, 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.01.007>

Li, N. (n.d.). *Automotive Magnesium Applications and Life Cycle Environmental Assessment*.

*Magnesium Alloys*. (n.d.). <https://www.luxfermeltechnologies.com/>

*Magnesium AM60B Cast Alloy (M10602)*. (n.d.). <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9237>

*Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları*. (n.d.). <https://docplayer.biz.tr/166543207-12-hafta-magnezyum-ve-magnezyum-alasimlari.html>

*Manyezit*. (n.d.). <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/manyezit>

Myrissa, A., Agha, N. A., Lu, Y., Martinelli, E., Eichler, J., Szakács, G., Kleinhans, C., Willumeit-Römer, R., Schäfer, U., & Weinberg, A.-M. (2015). *In vitro and in vivo comparison of binary Mg alloys and pure Mg*. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.064>

Nezamdoust, S., Seifzadeh, D., & Rajabalizadeh, Z. (2019). Application of novel sol-gel composites on magnesium alloy Peer review under responsibility of Chongqing University. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7, 419–432. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.03.004>

- Öztürk, Fahrettin; Kaçar, İ. (2012). Magnezyum Alaşımları Ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 12–20.
- Panigrahi, S. K., Kumar, K., Kumar, N., Yuan, W., Mishra, R. S., Delorme, R., Davis, B., Howell, R. A., & Cho, K. (2012). Transition of deformation behavior in an ultrafine grained magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, 549, 123–127. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.017>
- Pesode, P., & Barve, S. (2023). Additive manufacturing of magnesium alloys and its biocompatibility. *Bioprinting*, 36, 2405–8866. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00318>
- Polmear, I. J. (1994). Magnesium alloys and applications. *Materials Science and Technology*, 10(1), 1–16. <https://doi.org/10.1179/MST.1994.10.1.1>
- Qizhi Chen, G. A. T. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R*, 87, 1–57.
- Ramalingam, V. V., Ramasamy, P., Mohan, ·, Kovukkal, D., & Myilsamy, · Go-vindaraju. (2020). Research and Development in Magnesium Alloys for Industrial and Biomedical Applications: A Review. *Metals and Materials International*, 26, 409–430. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00346-8>
- Sezer, N., Evis, Z., Kayhan, S. M., Tahmasebifar, A., & Koç, M. (2018). Review of magnesium-based biomaterials and their applications Peer review under responsibility of Chongqing University. *Journal of Magnesium and Alloys*, 6, 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.02.003>
- Shafirovich, E., Salomon, M., & Gökalp, I. (2006). Mars hopper versus Mars Rover. *Acta Astronautica*, 59, 710–716. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2005.07.018>
- Unnikrishnan, M. A., Raja Dhas, J. E., Anton, K., Lewis, S., Varghese, J. C., & Ganesh, M. (n.d.). *Challenges on friction stir welding of magnesium alloys in automobiles Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the International Confer-ence on Advancements in Materials and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.789>
- Xin, Y., Hu, T., & Chu, P. K. (2010). *In vitro studies of biomedical magnesium alloys in a simulated physiological environment: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.12.004>
- Yuan, Q.-H., Zhou, G.-H., Liao, L., Liu, Y., & Luo, L. (2017). *Interfacial structure in AZ91 alloy composites reinforced by graphene nanosheets*. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.090>
- Zhang, S., Zhang, X., Zhao, C., Li, J., Song, Y., Xie, C., Tao, H., Zhang, Y., He, Y., Jiang, Y., & Bian, Y. (2009). *Research on an Mg-Zn alloy as a degradable biomaterial*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.06.028>
- Zhang, X., Yuan, G., Niu, J., Fu, P., & Ding, W. (2012). *Microstructure, mechanical properties, biocorrosion behavior, and cytotoxicity of as-extruded Mg-Nd-Zn-Zr alloy with different extrusion ratios*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.02.002>





# EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ ÜZERİNE YENİ BİLGİLER

*Gülşah ÖNER*

Eklemeli imalatın ortaya çıkışı ile birlikte parça üretiminde devrim niteliğinde gelişmeler olmuştur. Bu teknoloji sayesinde tasarımda büyük iyileşmeler ve bileşenlerin oldukça seri bir şekilde üretilmesi sağlanmıştır. Özellikle kompleks parçaların üretilmesi ve tamiratının hızlı bir şekilde yapılması oldukça kolay hale gelmiştir. Örneğin endüstriyel gaz türbin parçaları en süratli bir şekilde ve tam tasarım özgürlüğü ile onarılabilmektedir. Kompresör türbin kanadı tasarımı için Eklemeli Üretim (AM) teknolojisinin kullanılması, karmaşık çok elemanlı bileşenlerin üretiminde yüksek hassasiyete ve çoğu durumda da daha yüksek performansla ulaşabilmeyi sağlamıştır (Özsolak, 2019).

Kuşkusuz, eklemeli imalatın başlangıcını belirleyen dönüm noktası, 9 Mart 1983'te, Charles W. Hull'un ilk eklemeli üretim sistemi olan ve kendisinin inşa ettiği stereolitografi aparatı SLA-1'e başarıyla bir çay fincanı basmasıyla gerçekleşmiştir (3D Systems, n.d.). **Tablo1**'de kronolojik olarak eklemeli üretim alanındaki ilerlemeler gözükmektedir(Jiménez et al., 2019).

**Tablo 1.** Eklemeli üretim alanındaki ilerlemeler (Jiménez et al., 2019)

Teknoloji	Mucitler	Patent	Geliştirme Merkezi	Patent Talebi	Patentin Yayınlanması	Çalışma Prensipleri
Stereolitografi SL	Charles W. Hull	Stereolitografi ile üç boyutlu nesnelerin üretimi için yöntem ve aparat	3D Systems	08.08.1984	12.02.1986	İşığa duyarlı bir reçemenin UV ışığı kullanılarak fotopolimerizasyonu
Seçmeli Sinterleme SS	Carl R. Deckard	Seçmeli sinterleme ile üretilen parçalar için method ve aparatlar	University of Texas	17.10.1986	21.04.1988	Tozun seçici sinterlenmesi (füzyon – lazer kullanılarak katılaştırma)
Malzeme Brikimi MD	Scott S. Crump	Üç boyutlu nesnelere oluşturmak için aparat ve yöntem	Stratasys, Inc.	30.10.1989	01.05.1991	Malzemenin plastik halde (elektrik direnciyle istilan) bir mame kullanılarak brikitirilmesi)
Jet Prototipleme (enjeksiyon) JP	Emanuel M. Sachs; John S. Haggerty; Michael J. Cima; Paul A. Williams	Üç boyutlu baskı teknikleri	Massachusetts Inst. Technology	08.12.1989	09.06.1991	Toz halindeki malzeme yatağına bağlayıcı madde ve renkli mürekkebin enjeksiyonu
Lamine İmalatı (kesim) LM	Feygin, Michael; Pak, Sung Sik	Laminasyonlardan yekpare nesnelere oluşturulması - laminasyonlardan yekpare bir nesne oluşturmaya yönelik aparat	Helsys, Inc.	05.10.1988	18.04.1996	Laminasyonların her katman için belirlenen geometride kesilmesi ve yapıştırılması

Texas Üniversitesi'nden Carl R. Deckard, 1986 yılında seçici sinterleme (SS) yoluyla katmanlı imalatın geliştirilmesinde ilk adım olan “seçici sinterleme yoluyla parça üretmek için bir yöntem ve aparat” geliştirmiştir. 1988 yılında Michael Feygin ve Helisys, Inc.'deki ekibi, elektronik dosya tarafından işaretlenen boyutlarda katmanlar üreten bir otomatik laminasyon kesme sistemi (lamine üretim - LM) olan “laminasyonlardan entegre nesnelere oluşturmak” için bir yöntem geliştirmiştir; daha sonra nihai prototipi oluşturmuştur. 1989'da Stratasys, Inc. şirketinde Scott S. Crump, kaynaştırılmış biriktirme modelleme (FDM) yoluyla eklemeli imalatın geliştirilmesinde ilk adım olan “üç boyutlu nesnelere oluşturmak için bir aparat ve yöntem” geliştirmiştir. 1989 yılında Emanuel M. Sachs ve ekibi, Massachusetts Inst. Teknoloji, geleneksel bir mürekkep püskürtmeli yazıcının enjektörlerini kullanarak, toz halindeki malzemeden oluşan bir yatak üzerine bağlayıcı madde ve renkli mürekkebin enjekte edilmesi işlemi olan “üç boyutlu baskı tekniklerini” geliştirmiştir (Jiménez et al., 2019).

3 boyutlu baskı gibi eklemeli üretim (AM) teknolojisi, dijital 3 boyutlu model verilerinden neredeyse her şeklin veya yapının üretilmesine olanak tanımaktadır (Alshahrani, 2021). Yöntem, çeşitli malzemelerin alternatif katmanlarının basılmasını içerir. Charles Hull 1986'da stereolitografi (SLA), toz yataklı füzyon, kaynaşık biriktirme modelleme (FDM), mürekkep püskürtmeli baskı ve kontur işçiliği dahil olmak üzere bu teknolojinin diğer çeşitleri ortaya çıkmıştır. Zamanla 3D baskı, üretim ve dağıtım dinamiklerini kökten değiştirme potansiyeli taşıyan daha çeşitli yöntemleri, malzemeleri ve ekipmanı kapsayacak şekilde genişlemiştir (Vafadar et al., 2021). Teknolojinin önceki sürümlerine ilişkin patentlerin süresinin dolması, üreticilerin yeni 3D baskı ekipmanı oluşturmasına olanak tanıyarak teknolojinin geniş çapta kullanılabilirliğine katkıda bulunmaktadır. Son gelişmelerin ışığında, 3D yazıcıların maliyetinin düşmesi ile birlikte 3D yazıcıların sınıflardan kütüphanelere ve evlere kadar çeşitli bağlamlarda daha yaygın şekilde kullanılmasına imkan sağlamaktadır (Bhuvanesh Kumar & Sathya, 2021)

3D baskının hızla gelişmesi ve düşük maliyeti nedeniyle, mimarlık ve tasarım alanları bu teknolojiyi erken benimseyenlerden biri olmuştur. 3D baskı, genellikle bir ürün geliştirmeye ilgili hem maliyetleri önemli ölçüde azaltması hem de zamanı daha hızlı kullanma açısından tercih edilir olmasını sağlamıştır. Üretimdeki mevcut eğilim, bir amacı olan ve tüketicinin taleplerine göre özelleştirilmiş ürünler üretmeye yöneliktir. Özellikle sağlık alanlarında daha da çok ilgi görmeye başlamıştır. Tıp dünyasındaki pek çok kişi, geniş bir yelpazedeki tıbbi implantların üretilmesi için bir başlangıç noktası olarak bilgisayarlı tomografi (CT) ile görüntülenen doku kopyalarının kullanılmasıyla ilgilenmektedir (Buchanan & Gardner, 2019).

Son yıllarda inşaat sektörü 3D baskıyı büyük ölçekte benimsemiştir. İnşaat sektörü, prototip oluşturma ve biyomekanik, eklemeli üretimle başarıya ulaşan alanlardan sadece biridir. Kalite, maliyet, özgünlük ve kişiselleştirme

üzerinde benzeri görülmemiş bir kontrol ile karmaşık geometrilerin üretimi sağlanmıştır. Türünün tek örneği olan ürünler üretme kapasitesi, 3D üretimin geleneksel tekniklere göre sağladığı pek çok avantajdan sadece bir tanesidir. Metaller, polimerler, seramikler ve hatta beton 3D baskıya uygun malzemelerden bazılarıdır. Bir zamanlar sadece inşaatlarda kullanılan beton malzemesi büyük bir değişime uğramıştır. Eklemeli üretimde beton, karmaşık mimari yapıların hassas bir şekilde ve minimum malzeme israfıyla inşa edilmesi için kullanılmaktadır. Bu buluş, karmaşık ve çevre dostu yapıların geliştirilmesini mümkün kılarken, aynı zamanda çevre sorunlarına da değinmesi nedeniyle mimari tasarım açısından çok önemli olmuştur (Ngo et al., 2018).

Birkaç 3D baskılı kompozit, polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerlerini birleştirmektedir. Havacılık sektörü, modası geçmiş uygulamalara bağlı kalmak yerine çağdaş metal ve alaşımlara geçerek zamandan, paradan ve enerjiden tasarruf edebilir. Eklemeli olarak üretilen binalarda sıklıkla beton kullanılırken, 3D baskılı iskeleler için tercih edilen malzeme seramiktir. Seramikler, mükemmel sıcaklık direnci ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle elektronik, havacılık ve sağlık gibi sektörlerde kendine yer bulmuştur. Eklemeli üretim tekniği kullanılarak, daha önce geleneksel tekniklerle üretilmesi imkansız olan karmaşık seramik bileşenler artık üretilmektedir. Ancak, seramiklerle çalışmak zor ve kırılabilir olduğundan dolayı, kırılmayı azaltan ve dayanıklılığı artıran baskı teknikleri oluşturmak önemlidir. Metal alaşımları, otomotiv, havacılık ve tıp gibi alanları dönüştürerek eklemeli imalatta öncülük etmiştir. Eklemeli üretim, hafif ve inanılmaz derecede dayanıklı bileşenler üreterek yakıt tüketimini azaltır ve araç performansını artırır (Ngo et al., 2018).

3D baskının temel faydalarından bazıları daha fazla tasarım özgürlüğü, kitlesel kişiselleştirme ve karmaşık yapıları hızlı ve az atıkla yapabilme yeteneğidir. Erimiş biriktirme modelleme veya FDM, ucuz, kullanımı kolay ve hızlı olduğundan 3 boyutlu nesnelere yazdırmanın popüler bir yoludur. Yakın zamana kadar 3 boyutlu modelleri basmak için kullanılabileceği tek şey polimer filamanlardı. En son güncellemeyle birlikte daha geniş bir malzeme yelpazesinden model üretilmektedir. Erimiş biriktirme modelleme veya FDM, hızlı prototipler oluşturmanın bir yoludur. Seçici lazer eritme (SLM) ve lazer sinterleme (SLS) gibi toz yataklı işlemler kadar mekanik veya genel olarak iyi değildir. Toz yatağı teknikleri daha iyi çözünürlüklere izin vermemektedir, çünkü birbirine yakın tozlar kaynaşabilir, eriyebilir veya birbirine yapışabilir. Doğrudan enerji biriktirme (DED), metal parçacıkları eritmek için odaklanmış bir lazer veya elektron ışını kullanır. Seçici lazer eritme, metal tozunu (SLM) eritmek için odaklanmış bir lazer ışını kullanır. Baskıdan sonra öğeler daha fazla ısıl işleme ihtiyaç duyarlar. İlk 3D baskı türü olan stereolitografi, çok fazla ayrıntıya sahip nesnelere üretmek için sıklıkla fotopolimerleri kullanır. Kaynaklar sınırlı olduğundan süreç sıkıcıdır ve uzun zaman almaktadır (Ngo et al., 2018).

Son olarak, lamine ürünler, malzeme levhalarının veya rulolarının kesilmesi ve bunların katmanlar halinde lamine edilmesi (LOM) yoluyla yapılmaktadır. 3D baskıda filament, tel, toz, macun, tabaka ve mürekkep gibi birçok malzeme kullanılabilir. Akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kopolimerleri, poliamid (PA), polikarbonat (PC) ve polilaktik asit (PLA) gibi polimerler sıklıkla 3D baskı (PLA) için kullanılmaktadır. Polimerlere fiber ve nanopartiküller eklenerek polimerlerin mekanik özellikleri iyileştirilmiştir. Metal tozları genellikle en yaygın üç 3D baskı türünde kullanılır: seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM) ve doğrudan enerji biriktirme (DED) (Ngo et al., 2018). Endüstride yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerin kısa tanımları **Tablo 2**'de gösterilmiştir (Aktürk et al., 2021; İ., 2019).

**Tablo 2.** Eklemeli Üretim Yöntemleri (Aktürk et al., 2021; İ., 2019)

<b>Eklemeli imalat Yöntemleri</b>	<b>Tanımı</b>
Binder Jetting (BJ)	Yapıştırıcı(bağlayıcı) püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital ışık işleme
Direct Metal Deposition (DMD)	Direkt metal depozisyonu
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Direkt metal lazer sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron ışını ile eritme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Birleştirmeli yağma modellemesi
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer metal biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine nesne imalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok jetli modelleme
Plaster Based Printing (PP)	Alçı esaslı baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçici ısıtmalı sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Melting (SLM)	Seçici lazer eritme
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçici lazer sinterleme

Metal alaşımlarındaki zorluk, sabit bir malzeme kalitesini korumak ve yüzey bitirme ve ısıl işlem gibi işlem sonrası problemlerle uğraşmaktır. Her ne kadar 3D baskı uzun bir yol kat etmiş olsa da, üretilen nesnelerin sınırlı mekanik özellikleri ve anizotropik davranışı hala yaygın olarak benimsenmesini engellemektedir (Al Rashid et al., 2021; Ngo et al., 2018; Vafadar et al., 2021). Tablo 3'te 3D yönteminde kullanılan malzemeler, özellikleri, uygulama ve bunların imalat yöntemlerine ilişkin karşılaştırma tablosu görülmektedir(Ngo et al., 2018).

**Tablo3.** İşlem çeşidine göre eklemeli üretim teknolojileri

Malzemeler	Yaygın Tipi	Özellikleri ve Uygulamaları	3D Metodu
Polimerler	PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon, PVA, Polycarbonate	Hafif ve çok yönlü, Uygulama: Tüketici ürünlerinde ve tıbbi cihazlarda kullanılan hızlı prototip oluşturma ve konsept modelleme için idealdir.	FDM, SLA
Metaller	Alüminyum, Çelik, Titanyum, Inkonel, Bakır	Yüksek mukavemet ve dayanıklılık. Uygulama: Havacılık bileşenleri ve otomotiv parçaları Hassas mühendislik ve tıbbi implant.	SLS, SLA, Toz yatak füzyonu
Seramikler	Alümina, Zirkonya, Silikon, Karbür vb.	Yüksek sıcaklık dayanımı, Uygulama: Elektronik, havacılık ve sağlık uygulamalarında kullanılır.	FDM, DLP
Kompozitler	Karbon Elyaf Takviyeli, Cam Elyaf Kompozitler	Hafif ve sağlamdır. Uygulama Alanları: Spor ekipmanlarında kullanılır.	EBM, Toz yatak füzyonu, SLS
Biyomürekkep	Hidrojel, Aljinat, Kolajen, Selüloz, Fibrin vb.	Doku, mühendislik ve organ basımı için biyoyumlu Uygulama: Rejeneratif tıpta ve farmasötikte, araştırmada kullanılır.	Toz yatak füzyonu

Kompozit malzemeler için geleneksel yöntemler, karmaşık kalıpların ve ikincil işlemler gerektiren uygulamaların kullanılmasını gerektirir. Bu nedenle basit ve etkili bir kompozit üretim prosesi geliştirilmelidir. Üç boyutlu (3D) baskı olarak da adlandırılan eklemeli imalat (AM), karmaşık yapıya sahip yapı bileşenlerinin kalıp olmadan yapılmasını sağlayan yeni bir imalat tekniğidir. Şu anda pek çok araştırmacı tarafından kısa karbon fiber takviyeli SiC (Csf/SiC) seramik matrisli kompozitlerin eklemeli üretimi yöntemiyle daha kolay üretildiği bildirilmiştir (Wang et al., 2024).

Araştırmacılar, eklemeli üretim tekniklerinin yaygın kullanımını kısıtlayan engelleri daha iyi anlamak ve ortadan kaldırmak için çalıştıkça, 3D baskının faydaları ortaya çıkmaya devam edecektir. Bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM), tam protez kaidesi imalatında özelleştirilmiş, verimli ve doğru iş akışları sağlayan değerli bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Bhargav et al., 2018; Revilla-León & Özcan, 2019) Eklemeli üretim yöntemine özel olarak tasarlanmış bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemleri, daha kullanıcı dostu ve güçlü simülasyon ye-

tenekleri oluşturmaya odaklanmıştır (Sepasgozar et al., 2020). Kitlesele kişiselleştirme, büyük miktarlarda tek seferlik ürünler yapmak için 3D baskının kullanılması anlamına gelir. 3D baskı olmasaydı üreticiler ürünleri için alet ve kalıplara binlerce dolar daha fazla para harcarlardı. Tek bir şeyin çoğunu yapmak, birçok farklı şeyi üretmek kadar ucuz olabilir. Bu nedenle benzer bileşenlerin seri üretimi iyi bir seçenek olabilir. Eklemeli üretim yöntemi, ekstra zaman harcayan ekipman, işlem sonrası gerektiren teknikler ve döküm gibi geleneksel üretim tekniklerine uygulanması zor olan kafes yapıları gibi karmaşık geometrileri toplu olarak üretebilmektedirler (Ngo et al., 2018).

Son zamanlarda araştırmaların odak noktası, (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vs. gibi) geleneksel üretim teknolojilerinden eklemeli üretim teknolojisine doğru kaymıştır. Talaşlı imalatın aksine, eklemeli üretim tekniğinin çalışma prensibi karmaşık geometrilerin imalatına olanak tanımaktadır. AM teknikleri, yapılması zor şeyleri 3D olarak basmayı mümkün kılmıştır. Eklemeli üretim teknolojisi çok büyük yapıları yüksek mekanik kalitede ve az sayıda baskı hatasıyla basabilir. Birleştirilmiş biriktirme modellenmesi (Zhou et al., 2020) artık nesnelere üç boyutlu olarak yazdırmanın en yaygın yoludur. “Eklemeli üretim”, mürekkep püskürtmeli baskı, stereolitografi, doğrudan enerji biriktirme, lamine ürün üretimi, seçici lazer sintereleme, seçici lazer eritme ve 3D baskıda eklemeli üretim teknolojisine sıvı bağlama gibi çok çeşitli teknikleri kapsar (Goodacre et al., 2016; Stansbury & Idacavage, 2016; Wimmer et al., 2018)

Çeşitli eklemeli üretim teknikleri arasında stereolitografi (SLA) ve dijital ışık işleme (DLP), tam protez üretimi için yaygın olarak tanınmaktadır (Unkovskiy et al., 2021). SLA teknolojisinde bir lazer ışını raster, lokalize polimerizasyonu tetiklemek için fotopolimerize edilebilir reçinenin spesifik yüzey bölgelerini ışınlar. Sıvı reçine ayrıca katman katman istenilen 3 boyutlu nesneye dönüştürülür. DLP teknolojisi SLA'ya benzer bir çalışma mekanizmasına sahiptir. Bununla birlikte, ışığa duyarlı sıvı reçinenin katman halinde tamamen birikmesini sağlamak için yüksek güçlü bir ışık kaynağına sahip bir mikro ayna cihazı kullanılmaktadır (Stansbury & Idacavage, 2016). Bunlara ilave olarak, Elektrohüdrodinamik baskı (EHDP), iki fotonlu polimerizasyon (TPP) ve projeksiyon mikro stereolitografi (PSLA), temassız mikro ve nano baskıya yönelik en ileri yöntemlerin örnekleridir (Ngo et al., 2018; Plocher & Panesar, 2019).

Bugüne kadar, SLA ve DLP teknolojileri, daha iyi doku yüzeyi adaptasyonu, yeterli mekanik mukavemet ve mükemmel klinik sonuçlar nedeniyle protez kaidesi imalatında giderek daha fazla uygulanmaktadır (S. Lee et al., 2019; Piedra-Cascón et al., 2021; Unkovskiy et al., 2021). Ayrıca, 3D baskılı protez kaideleri, enjeksiyonla kalıplanmış protez kaidelerine kıyasla üstünlüklerini kanıtlanmıştır (S. Lee et al., 2019). Özellikle, bir

linik araştırmasında, on sekiz aylık takip sonrasında 3D baskılı protezlerden yüksek hasta memnuniyeti düzeyleri rapor edilmiştir. Yakın zamanda yapılan bir çalışma, deneme protezlerinin çok merkezli bir analizini de bildirmiştir; bu, 3D baskılı protezlerin doğruluğunun, deneme protezleri için klinik olarak kabul edilebilir bir aralığa sahip olduğunu göstermektedir (Cristache et al., 2020).

Bununla birlikte, dijital protez tabanı umut verici bir yaklaşım olarak görölse de, hastayla ilgili uzun vadeli sonuçlar ve klinik performans hala eksiktir. Protezle ilişkili iltihap, %15 ila %71 arasında değişen hastaları etkileyen, esas olarak mikroorganizmaların protezin yüzeyine yapışması ve çoğalmasının neden olduğu tipik bir oral mukozal lezyondur (Gendreau & Loewy, 2011). *Candida albicans* (*C. albicans*), protez kaynaklı iltihap, fırsatçı bir patojen olarak geniş çapta tanınmaktadır. *C. albicans* sıklıkla stomatit hastalarının protez biyofilmlerinde tanımlanır (Gendreau & Loewy, 2011; KULAK et al., 1997).

Hiç şüphesiz ki, protez üretim malzemelerinin kendileri bakteri ve maya kolonizasyonunda ve iltihap gelişimini belirleyen biyofilm oluşumunda kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel protez akrilik reçinelerinin bir dezavantajı da, gözenekli yüzey yapısından dolayı ağız ortamında mikrobiyal kolonizasyona karşı yüksek duyarlılık oluşturmasıdır (KULAK et al., 1997; Redding et al., 2009).

Elektrokimyasal enerji depolama, Eklemeli üretim ve 3D baskının benzersiz yapı özelliklerinden yararlanılabilecek başka bir önemli alanı temsil etmektedir (C. Y. Lee et al., 2019). Dikkatle tasarlanmış 3 boyutlu yapıların pillerde ve süper kapasitörlerde daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir (Osiak et al., 2014; Rolison et al., 2008). Geleneksel elektrokimyasal enerji depolama cihazı (EESD) yapısı, elektrot imalatını, elektrolit ilavesini ve cihaz montajını içermektedir. Bu süreçler bir montaj hattı üretimi için iyi optimize edilmiş olsa da, 3D baskılı EESD'ler özelleştirme, esneklik ve tasarım karmaşıklığı açısından yüksek talebin olduğu pazarlarda tercih edilmektedir. Üstelik, ek adımlardan kaçınarak EESD'ler ve harici elektronikler için entegrasyon platformu da sağlayabilir. Bununla birlikte, tam bir 3D baskılı enerji depolama sistemini gerçekeştirmeden önce pek çok teknolojik zorluğun ele alınması gerekmektedir (Gulzar et al., 2020)

## SONUÇ

Betonun 3D baskısı pek çok açıdan yardımcı olsa da inşaat sektöründe benimsenme süreci yavaş olmuştur. Avantajlarından bazıları; süreçlerin otomatikleştirilmesi, formlara olan ihtiyacın ortadan kaldırılması ve toplu kişiselleştirmenin sunulmasıdır. Betonda yapılan son gelişmeler betonun kullanımını daha kolay, daha sağlam ve daha iyi görünmesini sağlamıştır.

Eklemeli üretim yöntemi inşaat sürecini otomatikleştirebildiği için işçiler olmadan inşaat yapmak artık boş bir hayal değildir. Ancak, eklemeli imalatın yaygın olarak kullanılabilmesi için bazı sorunların çözülmesi gerekmektedir. Üretim sırasında malzeme katmanları arasında boşluklar büyüyebilir, bu da basılı katmanlar arasındaki bağı zayıflatır ve çok fazla gözenekliliğe ve mekanik performansta düşüşe neden olabilir. 3D baskı çoğunlukla izotropik değildir, dolayısıyla mekanik davranışı genellikle dikey eksen boyunca değişir ancak yatay eksen boyunca aynı kalır. Bu durum üretim sırasında hata ve kusur meydana getirebileceği için önemlidir.

Biyomateriyallerdeki son araştırma ve geliştirmeler, karmaşık yapıları hastaların ihtiyaçlarına daha uygun hale getiren eklemeli üretimden (AM) önemli ölçüde faydalanılmıştır. Havacılık ve uzay şirketleri de eklemeli üretim (AM) kervanına katılmıştır, çünkü eklemeli üretim tekniği uçak bakımını hızlandırırken ve üreticilerin ihtiyaçlarını karşılarken hafif, yüksek mukavemetli parçalar üretebilmektedir. Ana sorunlar, halihazırda mevcut olanlarla karşılaştırıldığında yüksek fiyat ve zayıf mekanik performanstır.

Bir araya getirilme şekli nedeniyle binalar, oyuncaklar ve uçaklar eklemeli üretim tekniği ile üretimine uygun değillerdir. 3D baskının birçok gündelik malzemelerin üretiminde geleneksel endüstriyel yöntemlerle rekabet edebilmesi için daha kat edilmesi gereken uzun bir yol vardır. Ancak, önemli ihtiyaçlar ve özel ürünler için oyunun kurallarını değiştirmiştir. Eklemeli üretim son birkaç yılda çok yol kat etmiştir. Araştırma ve geliştirmeye daha fazla para harcanırsa, 3D baskı gelecekte işlerin yapılma şeklini büyük ölçüde değiştirebilir (Ngo et al., 2018).

## KAYNAKLAR

3D Systems. (n.d.). <https://es.3dsystems.com/our-story>

Aktürk, M., Korkmaz, M. E., Üniversitesi, K., Fakültesi, M., & Karabük, T. (2021). *Ekllemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme*. 2(1), 2717–2747.

Al Rashid, A., Khan, S. A., G. Al-Ghamdi, S., & Koç, M. (2021). Additive manufacturing of polymer nanocomposites: Needs and challenges in materials, processes, and applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 910–941. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.07.016>

Alshahrani, H. A. (2021). Review of 4D printing materials and reinforced composites: Behaviors, applications and challenges. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 6(2), 167–185. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMD.2021.03.006>

Bhargav, A., Sanjairaj, V., Rosa, V., Feng, L. W., & Fuh YH, J. (2018). Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B, Applied Biomaterials*, 106(5), 2058–2064. <https://doi.org/10.1002/JBM.B.33961>

Bhuvanesh Kumar, M., & Sathiya, P. (2021). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures*, 159, 107228. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2020.107228>

Buchanan, C., & Gardner, L. (2019). Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180, 332–348. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.11.045>

Cristache, C. M., Totu, E. E., Iorgulescu, G., Pantazi, A., Dorobantu, D., Nechifor, A. C., Isildak, I., Burlibasa, M., Nechifor, G., & Enachescu, M. (2020). Eighteen Months Follow-Up with Patient-Centered Outcomes Assessment of Complete Dentures Manufactured Using a Hybrid Nanocomposite and Additive CAD/CAM Protocol. *Journal of Clinical Medicine*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/JCM9020324>

Gendreau, L., & Loewy, Z. G. (2011). Epidemiology and etiology of denture stomatitis. *Journal of Prosthodontics : Official Journal of the American College of Prosthodontists*, 20(4), 251–260. <https://doi.org/10.1111/J.1532-849X.2011.00698.X>

Goodacre, B. J., Goodacre, C. J., Baba, N. Z., & Kattadiyil, M. T. (2016). Comparison of denture base adaptation between CAD-CAM and conventional fabrication techniques. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 116(2), 249–256. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2016.02.017>

Gulzar, U., Glynn, C., & O'Dwyer, C. (2020). Additive manufacturing for energy storage: Methods, designs and material selection for customizable 3D printed batteries and supercapacitors. *Current Opinion in Electrochemistry*, 20, 46–53. <https://doi.org/10.1016/J.COEELEC.2020.02.009>

- İ., Ö. (2019). *Endüstri 4.0'da Robotik ve Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Farklı Rekabet ve Üretim Senaryoları Altında Stratejik Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Jiménez, M., Romero, L., Dom-Nguez, I. A., Espinosa, M.-A. D. M., Dom-Nguez, M., & Luis García-Alcaraz, J. (2019). *Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects*. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- KULAK, Y., ARIKAN, A., & KAZAZOGLU, E. (1997). Existence of *Candida albicans* and microorganisms in denture stomatitis patients. *Journal of Oral Rehabilitation*, 24(10), 788–790. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2842.1997.00550.X>
- Lee, C. Y., Taylor, A. C., Nattestad, A., Beirne, S., & Wallace, G. G. (2019). 3D Printing for Electrocatalytic Applications. *Joule*, 3(8), 1835–1849. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2019.06.010>
- Lee, S., Hong, S. J., Paek, J., Pae, A., Kwon, K. R., & Noh, K. (2019). Comparing accuracy of denture bases fabricated by injection molding, CAD/CAM milling, and rapid prototyping method. *The Journal of Advanced Prosthodontics*, 11(1), 55–64. <https://doi.org/10.4047/JAP.2019.11.1.55>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012>
- Osiak, M., Geaney, H., Armstrong, E., & O'Dwyer, C. (2014). Structuring materials for lithium-ion batteries: advancements in nanomaterial structure, composition, and defined assembly on cell performance. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(25), 9433–9460. <https://doi.org/10.1039/C4TA00534A>
- Özsolak, O. (2019). EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ VE KULLANILAN MALZEMELER. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3, 9–14.
- Piedra-Cascón, W., Krishnamurthy, V. R., Att, W., & Revilla-León, M. (2021). 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *Journal of Dentistry*, 109, 103630. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2021.103630>
- Plocher, J., & Panesar, A. (2019). Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures. *Materials & Design*, 183, 108164. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.108164>
- Redding, S., Bhatt, B., Rawls, H. R., Siegel, G., Scott, K., & Lopez-Ribot, J. (2009). Inhibition of *Candida albicans* biofilm formation on denture material. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 107(5), 669–672. <https://doi.org/10.1016/J.TRIPLEO.2009.01.021>

- Revilla-León, M., & Özcan, M. (2019). Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *Journal of Prosthodontics*, 28(2), 146–158. <https://doi.org/10.1111/JOPR.12801>
- Rolison, D. R., Long, J. W., Lytle, J. C., Fischer, A. E., Rhodes, C. P., Mc Evoy, T. M., Bourg, M. E., & Lubers, A. M. (2008). Multifunctional 3D nanoarchitectures for energy storage and conversion. *Chemical Society Reviews*, 38(1), 226–252. <https://doi.org/10.1039/B801151F>
- Sepasgozar, S. M. E., Shi, A., Yang, L., Shirowzhan, S., & Edwards, D. J. (2020). Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review. *Buildings 2020*, Vol. 10, Page 231, 10(12), 231. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10120231>
- Stansbury, J. W., & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2015.09.018>
- Unkovskiy, A., Schmidt, F., Beuer, F., Li, P., Spintzyk, S., & Fernandez, P. K. (2021). Stereolithography vs. Direct Light Processing for Rapid Manufacturing of Complete Denture Bases: An In Vitro Accuracy Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, 10(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/JCM10051070>
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences 2021*, Vol. 11, Page 1213, 11(3), 1213. <https://doi.org/10.3390/APP11031213>
- Wang, W., Gao, X., Li, Z., Shen, C., Wang, G., & He, R. (2024). Fiber-laying-assisted material extrusion additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced SiC ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 890, 145944. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2023.145944>
- Wimmer, T., Eichberger, M., Lümekemann, N., & Stawarczyk, B. (2018). Accuracy of digitally fabricated trial dentures. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 119(6), 942–947. <https://doi.org/10.1016/J.PROSDENT.2017.06.020>
- Xu, Y., Huettig, F., Schille, C., Schweizer, E., Geis-Gerstorfer, J., & Spintzyk, S. (2020). Peel bond strength between 3D printing tray materials and elastomeric impression/adhesive systems: A laboratory study. *Dental Materials*, 36(7), e241–e254. <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2020.04.015>
- Zhou, W., Qiao, Z., Nazarzadeh Zare, E., Huang, J., Zheng, X., Sun, X., Shao, M., Wang, H., Wang, X., Chen, D., Zheng, J., Fang, S., Li, Y. M., Zhang, X., Yang, L., Makvandi, P., & Wu, A. (2020). 4D-Printed Dynamic Materials in Biomedical Applications: Chemistry, Challenges, and Their Future Perspectives in the Clinical Sector. *Journal of Medicinal Chemistry*, 63(15), 8003–8024. [https://doi.org/10.1021/ACS.JMEDCHEM.9B02115/ASSET/IMAGES/LARGE/JM9B02115\\_0007.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACS.JMEDCHEM.9B02115/ASSET/IMAGES/LARGE/JM9B02115_0007.JPEG)



# KURU SÜRTÜNMELİ YATAKLARIN ÜRETİMİ VE ENDÜSTRİDEKİ KULLANIMI

*Kadir Güngör<sup>1</sup>*

*Ahmet Demirer<sup>2</sup>*

---

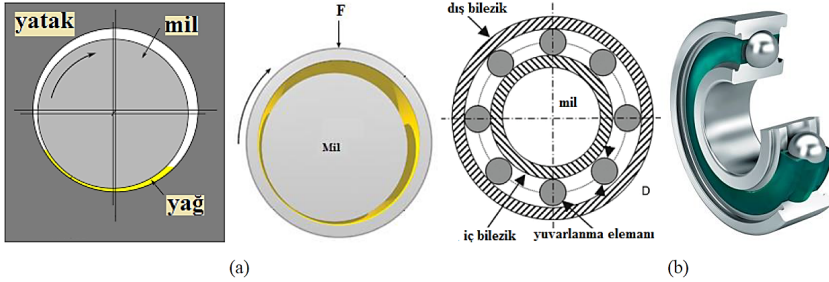
1 Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, ORCID:  
0000-0003-4392-4521

2 Doç.Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye,  
ORCID: 0000-0003-1252-9203

## 1. GİRİŞ

Yataklar, birbirlerine göre izafi harekette bulunan iki mekanik parça arasındaki doğrusal veya dönme hareketi esnasında, sürtünmeyi azaltmak, parçaları hareketlerine uygun konumlandırmak ve kuvvet doğrultusunda hareketlerine engel olmak için kullanılan tribolojik makina elemanlarıdır. Yatak tasarımlarında sürtünme ve aşınmayı azaltarak optimum verim alınan bir mekanizma, belirli faktörlerin kombinasyonu ile elde edilebilir. Bunlar, kaymalı yatağın şekilsel tasarımı, malzeme seçimi, mekanik parçaların çalışma durumlarına bağlı olarak temas yüzeylerinin yağlama sistemi, yağlayıcı bir katman, yağlanabilir bir yüzey veya elektro manyetik alan gibi tasarımlardan yararlanılarak birbirlerinden ayrılma durumları gibi faktörler sayılabilir [1].

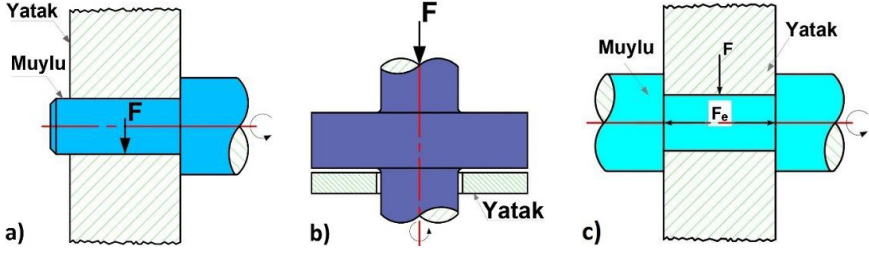
Yataklar, konstrüksiyon tasarımlarına bağlı olarak kayar sürtünme prensibine göre tasarlanan kaymalı yataklar ve yuvarlanma sürtünme tasarımının uygulandığı rulmanlı yataklar (yuvarlanma elemanlı) olarak sınıflandırılırlar. Kaymalı ve rulmanlı yataklara ait şematik resim Şekil 1’de gösterilmektedir [2].



Şekil 1. Yatakların şematik gösterimi a) Kaymalı yatak b) Rulmanlı yatak [3].

Kaymalı yatak sistemlerinde sürtünme çiftlerinin (mil ve yatak) çalışma yüzeyleri yağ filmi veya yağlayıcı bir katman ile ayrılırken, rulmanlı yataklarda yüzeyler arasında bulunan yuvarlanma elemanları vasıtasıyla ayrılır. Bu durum, kaymalı yataklarda kayma hareketinin kolaylıkla yapılabilmesi, rulmanlı yataklarda ise yuvarlanma hareketinin gerçekleştirilmesi içindir. Birbirleriyle izafi harekette bulunarak çalışan bu sürtünme çiftlerinin çalışma yüzeylerinin birbirinden ayrılması, metal-metal temasını önlerken dönme hareketini de kolaylaştırır. Bu sayede sürtünme ve aşınmanın optimum düzeyde tutulması sağlanabilmektedir. Yatakların dönme hareketi kolaylaştırılırken mil veya aksı destekleme görevlerinden dolayı maruz kaldıkları kuvvetler de azaltılmış olur. Yatakları, taşıdıkları/karşıladıkları kuvvet yönlerine göre sınıflandırabiliriz. Yatak etkiyen kuvveti kendi eksenine dik yönde karşılıyorsa radyal yatak; kendi eksenine aynı doğrultuda karşılıyorsa aksiyel yatak veya bu durumu her iki yönde de gerçekleştiriyorsa radyal-aksiyel yatak olarak adlandırılır. Şekil 2’de

kaymalı yatakların taşıdığı kuvvet yönüne bağlı olarak şematik resimleri verilmiştir.



Şekil 2. Taşımış oldukları kuvvet yönüne göre yatak sınıflandırması:

a) Radyal yatak b) Eksenel yatak c) Radyal - Eksenel yatak [4].

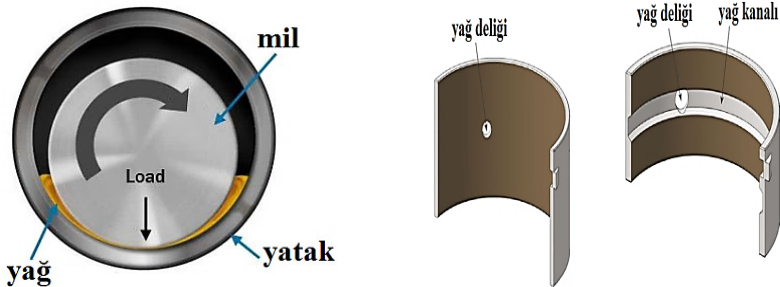
Birbirleriyle temas halinde hareket eden parçalar (mil ve yatak), temas yüzeyleri arasında kayma sürtünmesinin oluşturduğu direnci, yenerek kayarlar. Bu nedenle, yatak elemanlarının yağlama koşullarını, istenilen düzey olan işletme devir sayısının sınırlı devir sayısından daha büyük olma durumunda ( $n_{iş} > n_{sınırlı}$ ) gerçekleştirilmesi veya temas yüzeylerinin düşük sürtünme katsayılarına sahip yapılarda olmaları, oluşan sürtünme direncinin azalmasına katkı sağlar [5]. Kaymalı yataklar, dönmekte olan milleri desteklemek için tek parça halinde burç olarak “Kaymalı Yatak” (*plain bearing*) veya yarım ay şeklinde yapılan iki parçalı yatak olarak “Muylu yatağı” (*journal bearing*) formunda üretilerek kullanılmaktadırlar [6].

## 2. Kaymalı Yataklar ve Sınıflandırılması

Kaymalı yatakların yağlama durumlarına göre yağlamalı ve yağlamasız (kendinden yağlamalı/kuru sürtünmeli) yataklar olarak iki ana sınıfta incelenir [7].

### 2.1. Yağlamalı Yataklar

Yatak temas yüzeylerinin yük taşıma ve yağlama görevini üstlenen yağ filminin, çalışma sistemine uygun bir şekilde, gresle yağlama veya sıvı yağla yağlama yapılarak oluşturulduğu kaymalı yataklardır.



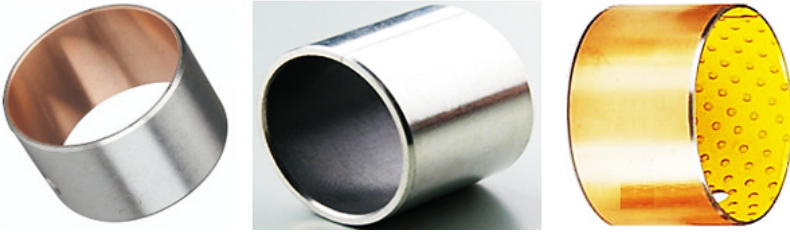
Şekil 3. Film yağlamalı yataklar

## 2.2. Kuru Sürtünmeli (kendinden yağlamalı) Yataklar

Yağlamasız veya Kuru sürtünmeli yataklar, yatak malzemesinin kendinden yağlamalı özelliğinden yararlandıkları için veya çalışma yüzeylerine, sonradan kendinden yağlama özelliği kazandırılmalarından dolayı bu isimle bilinirler. Bu yataklar yağlama imkânı olmayan makine elemanlarının yataklanmalarında kullanılmaktadır. Kendinden Yağlamalı Yatak, dönme hareketi esnasında ortaya çıkan kuvvetleri karşılayan ve kendinden yağlama özellikli çalışma yüzeyinde milin kolayca kayarak dönmesine destek olan, kaymalı yatak çeşitlerinden biridir. Bu yataklarda katı yağlayıcı özellikli polimer malzemeler, yatak profiline uygun formlarda üretilerek kullanıldıkları gibi yatağın kayar tabakasına emdirme, kaplama veya gömülme işlemleri vasıtasıyla da kullanılmaktadır. Bu katı yağlayıcıların oluşturduğu kayar katman, yatak yüzeyinde yağlama görevini görür. Kayar tabakanın hazırlanmasında genellikle Polyamid (PA), Polytetrafloroetilen (PTFE), Polioksimetilen (POM), Grafit, Molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) vb. gibi katı yağlayıcı maddeler kullanılır. Bu maddeler kayar çalışma yüzeylerinin yağ veya yağlama işlemi olmadan çalışabilmelerini sağlar [8]. İmalat şekillerine göre, kendinden yağlamalı özelliğe sahip bimetal yataklar, ön yağlamalı sinter yataklar, katı yağlayıcı gömülmüş yataklar ve katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer yataklar olarak sınıflandırılırlar.

### 2.2.1. Kendinden Yağlamalı Özelliğe Sahip Bimetal Yataklar

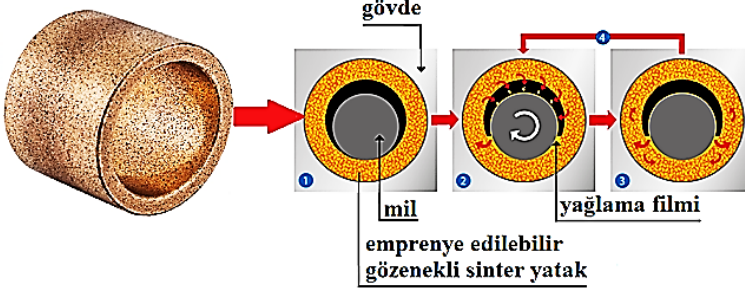
Genellikle hazırlanmış olan çelik şerit altlık malzeme yüzeyine bronz, pirinç gibi bakır esaslı malzemelerin sinterlenmesi veya döküm işlemiyle uygulanması ile elde edilir. Yatak malzemesinin çalışma yüzeyi olan kayar tabakayı oluşturmak için de en üst katmanına katı yağlayıcıların kaplanması şeklinde üretilen yataklardır. Katı yağlayıcı madde olarak genelde PA, PTFE, grafit veya molibden disülfür gibi malzeme ile emprenye edilir [9-10]. Kayar çalışma yüzeylerine sahip olan bu yataklar yağ veya yağlama durumu olmadan çalışabilen yataklardır.



Şekil 4. Kendinden yağlamalı bimetal yataklar [11]

### 2.2.2. Ön Yağlamalı Sinter Yataklar

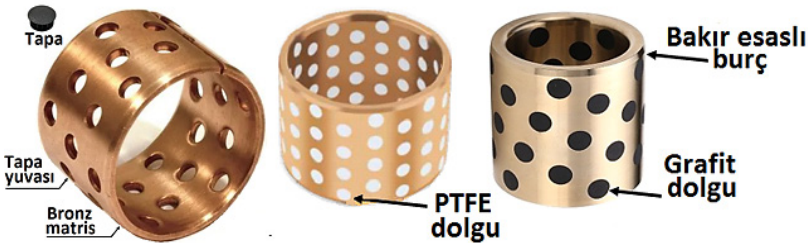
Sinterlenmiş bronz yataklar olarak da bilinen ön yağlamalı sinter yataklar, bakır esaslı tozlardan sinterlenerek üretilen gözenekli bronz veya pirinç matrise, yağlama yağı emdirmek için belirli bir basınç altında emprenye işlemi suretiyle yağlama özelliğinin kazandırıldığı sinterlenmiş yataklardır [12-14].



Şekil 5. Ön yağlamalı sinterlenmiş bronz yataklar[15]

### 2.2.3. Katı Yağlayıcı Gömülmüş Yataklar

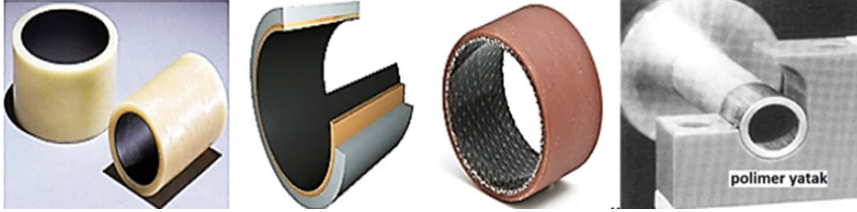
Yatağı oluşturan bakır esaslı matris yüzeyine talaşlı imalat yoluyla delikler açılarak, bu deliklere grafit, PTFE veya molibden disülfür gibi katı yağlayıcılardan hazırlanmış tapa şeklindeki küçük silindirik parçaların tıkanarak/gömülerek yerleştirildiği ve bu sayede yatak çalışma yüzeylerine kendinden yağlama özelliğinin kazandırıldığı yataklardır. Kendiliğinden yağlamanın istendiği veya sıvı yağlayıcıların yetersiz kaldığı yüksek yük ile yüksek sıcaklık şartlarında ve aşınma direncinin önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Uygulamalarda, bronz malzeme bu yataklara mukavemet ve dayanım sağlarken, deliklere gömülen grafit tapalar da aşınmanın azaltılmasına katkı sağlar. Grafit tapalar sürtünme çiftinin kayar temasında katı yağlayıcı görevi görür ve grafit varlığını devam ettirdiği sürece de yağlama görevini sürdürür [15]. Bununla birlikte asitli veya damıtılmış/deniz suyu gibi korozif çalışma koşullarında grafit, bronz matrisi bu olumsuz çalışma ortamına karşı korunaklı hale getirir. Çünkü metalik matriste grafit parçacıklarının varlığı aşınmanın azaltılmasına ve kayan temasın önemli ölçüde yağlanmasına yardımcı olur. Bakır-grafit kompozit yüzeyinde, aşınmış grafit döküntülerinin matrisi koruyabildiği ve sürtünmenin daha da azaldığı görülmüştür [16].



Şekil 6. Katı yağlayıcı gömülmüş yataklar

### 2.2.4. Katı Yağlayıcı Özelliğe Sahip Polimer Yataklar

Katı yağlayıcı özelliği taşıyan polimer malzemelerin kendinden yağlama özelliklerinin kullanıldığı yataklardır. Polimer kaymalı yataklar, kullanım ömürleri dolduğunda geri kazanımı yapılarak yeniden işlenebilirler. Bu yataklar ekstrüzyon veya enjeksiyon yöntemiyle, fonksiyonel plastikler olan mühendislik polimerlerinin kullanılmasıyla üretilmişlerdir [17].



Şekil 7. Katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer yataklar [18]

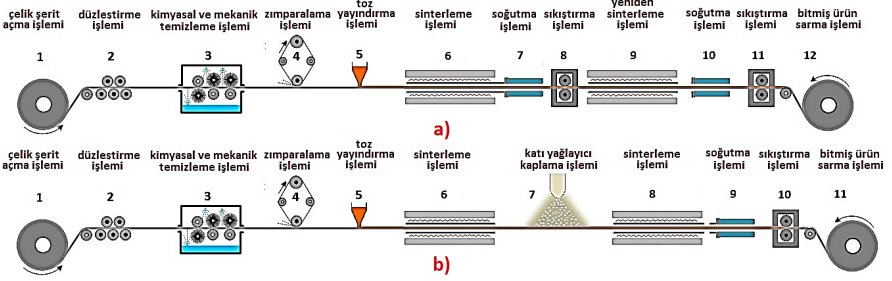
## 3. Kendinden Yağlamalı Yatakların İmalatı

### 3.1. Bimetal yatakların üretimi

Bimetal yatak malzemelerinin üretimi, şerit levha biçiminde hazırlanan çelik altlık malzeme yüzeyine, bronz malzemenin (toz, tel örgü veya levha halinde) sinterlenmesi veya ergitilmiş bronz alaşımın döküm metoduyla uygulanması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, yatak malzemesinin çalışma yüzeyini oluşturan en üst katmanda, katı yağlayıcı kaplama işlemi sonrası kayar tabaka oluşturularak bimetal yatak malzemesi üretimi tamamlanmış olur. Son katmana kayar tabakanın oluşturulması için yapılan kaplama işleminde, genellikle PTFE, grafit,  $MoS_2$  vb. gibi katı yağlayıcılar kullanılmaktadır. Bu katı yağlayıcılar kayar çalışma yüzeylerinin, yağ veya yağlama işlemi olmadan çalışabilmelerini ve kendinden yağlama özelliği kazanmalarını sağlar. Bu yataklar için üretilmiş sinterlenmiş yatak malzemeleri, olası boşluklar ve gözenekler nedeniyle aynı bileşime sahip döküm yatak malzemelerinden daha az dayanıklıdır. Bakır alaşımının sinterlenmesinde kullanılan toz alaşım, atomizasyon tekniği ile hazırlanır. Dökme yatak alaşımlarının tane yapısı, yatak yüzeyine dik olarak yönlendirilmiş bakır dendritlerden oluşur [19].

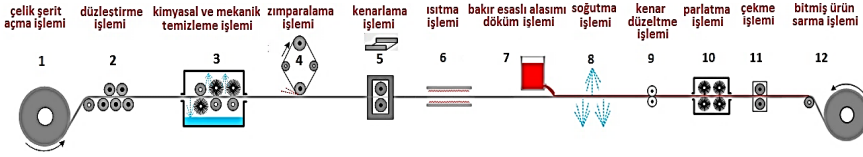
Şekil 8 ve Şekil 9’ da bimetal yatak malzemelerinin üretim sürecine ait şematik resim verilmiştir. İlk aşamada çelik şerit sac malzeme açılır ve devamında düzleştirme işlemi gerçekleştirilir. Çelik şerit malzemenin sinterleme ve döküm işlemi esnasında bakır alaşım ile yapışma bağı engelleyen yüzey kirleri ve sac yüzeyini korumada kullanılan koruyucu yağlar bulunabilir. Sac malzeme, yüzeyinde istenmeyen bu maddelerden arındırma işlemi için sıcak alkali çözelti banyosunda çelik telli silindirik fırçalar vasıtasıyla mekanik temizlemeye tabi tutulur. Arındırma işlemi

sonrası, temizlenmiş şerit malzeme yüzeyi aşındırıcılar ile bir miktar zımparalanarak/kumlanarak sonraki katmanla yapışma için hazır hale getirilir. Üretimin ilk aşama olan ara katmanın üretimi; sinterleme metodu ile yapılacaksa, hazırlanan toz alaşımın yüzeye yayınımlı şeklindedir, döküm metodu ile üretilecekse de, hazırlanan alaşımın ergiyik halinin yüzeye dökülmesi şeklindedir.



Şekil 8. Bimetal yatakların şerit sinterleme metoduyla üretimi, a) kaplama prosesi olmayan, b) katı yağlayıcı kaplama işlemi uygulanan [20].

Sinterleme yöntemiyle oluşturulacak ara katman alaşımına ait tozun, şerit malzemenin yüzeyine ayarlanabilir bir kalıp yardımıyla optimal bir şekilde yayılması sağlanır. Burada toz alaşımın oluşturacağı kalınlığın tespiti, tozun görünür yoğunluğu ile alaşımın teorik yoğunluğu oranına bağlı olarak ve haddeleme esnasında şerit malzemenin uzama oranı da dikkate alınarak önceden hesaplanır [21]. Burada ara katmanın oluşturulmasında kullanılan alaşımın sinterlenme işlemi, 780 - 880°C arasındaki sıcaklıklarda sürekli sinterleme fırınında gerçekleştirilir. Bu işlem, çelik altlık malzeme ve alaşımın oksitlenmesini önlemek amacıyla indirgeyici atmosfer olan Hidrojen ( $H_2$ ) ve Azot ( $N_2$ ) ortamında gerçekleştirilir. Çünkü bu ortam çelik malzeme ve alaşım atomlarının karşılıklı difüzyon yaparak fiziksel olarak birbirlerine hatasız bir şekilde bağlanmasını/kaynaklanmasını sağlar [22]. Bu bağlanmanın kalıcılığını artırmak için sıkıştırma işlemi uygulanır. Üretilen Çelik-Bakır alaşımlı bimetal malzemenin mukavemet özelliklerini, çelik altlığın mekanik özellikleri belirler [23]. Sinterleme sonrası bronz katmanın gözenekliliği %30'a yakındır. Ancak, soğuk haddelemede indirgemenin %70 oranına çıkarılması, kaplanan bakır alaşım tabakasının çelik altlık malzemeye yapışma kabiliyetini artırır. Fakat sıkıştırma işlemi ile şerit malzemenin haddeden geçmesi parçacıklar arasındaki gözeneklerin kapanmasına yol açabilir. Burada, sonradan yapılan Yeniden sinterleme işlemiyle mekanik olarak kapanan bu gözeneklerin yüzeyler arasındaki fiziksel birleşimi sağlanmış olur. Yeniden sinterleme sonucunda bakır alaşımlı katmanın sağlam (gözeneksiz) sinter yapısı oluşur. İkinci faz (kurşun, bizmut), bakır taneleri arasında yer alan küçük parçacıklar (0,001-0,002"/25-50  $\mu m$ ) halinde bakır esaslı matris boyunca homojen olarak dağılır.



Şekil 9. Bimetal yatakların şerit döküm metoduyla üretimi[20]

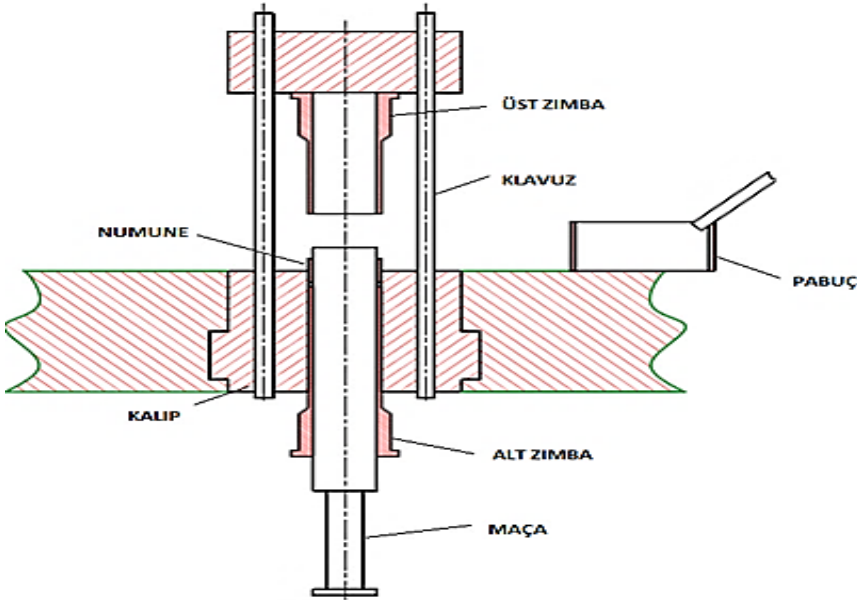
Döküm yöntemiyle oluşturulacak ara katman alaşımının dökümü öncesi çelik şerit malzeme optimal döküm kalınlığına uygun olarak ve kenarları oluk biçiminde şekillendirilir. Bu şekillendirmenin amacı kenarların, yanlardan akabilecek sızıntıları önlemesini sağlamaktır. Döküm işlemi esnasında oluşabilecek oksidasyonu önlemek için yaklaşık 1000°C indirgeyici bir atmosfer altında şerit malzeme ısıtılmaktadır. Bakır alaşım, 1250°C ısıtıldığı eriyik haliyle, şerit malzeme yüzeyine dökülür. Sonrasında soğutma işlemi için şerit malzeme yüzeyine su püskürtülme işlemi uygulanır. Bu işlem bakır alaşımının katılaşmasını sağlamaktadır. Bakır alaşımının elde edilen döküm yapısı incelendiğinde, dendrit kolları arasında yer alan ikinci faz parçacıkları (kurşun, bizmut) ile çelik yüzeye dik olarak yönelmiş bakır dendritlerden oluşmaktadır. Kenarları şekillendirilerek yüzeyine döküm işlemi gerçekleştirilen şerit malzemenin, döküm sonrasında kenarlarını düzgün hale getirmek için kenar düzeltme işlemi ve ardından da yüzey parlatma işlemi uygulanır. Son olarak üretimi tamamlanan bimetal şerit malzeme, hem çelik sırtını hem de sinterlenmiş bakır alaşımını güçlendirmek (pekleştirmek) amacıyla çekme merdaneleri tarafından çekilerek sarılır [19-23].

### 3.2. Ön Yağlamalı Sinter Yatakların üretimi

Sinterleme metoduyla üretilen gözenekli burçlar hacimlerinin yaklaşık %25'i kadar yağ/yağlayıcı depolayabilme kapasitesine sahiptirler. Gözeneklere empenye edilmiş bu yağlayıcılar çalışma esnasında yatak yüzeylerine çıkararak yağlama yaparlar. Bunun yanında, eklenebilecek ilave bir yağlama sistemi de gözeneklerin yeniden dolmasını sağlayarak sürekli bir yağlama yapabilir. Bu metod genellikle bronz yataklarda, yağlayıcı özellikteki polimerlerin veya yağların burç gözeneklerine emdirilmesi şeklinde uygulanmaktadır. Bu sayede, yatak burçlarında aranan önemli özelliklerden olan kendinden yağlayabilme özelliği kazandırılmış olur [24]. Genel olarak uygulamalarda en yaygın kullanılanı kalay bronzu olarak bilinen Cu %10-15 Sn dir. Bu yataklar katı yağlayıcı kompozisyonundan oluşan kendinden yağlamalı gözenekli bronz yataklardır ve ASTM B 438 standartlarını içerir. Bronz tozlarının (ön alaşımlandırma) ham yoğunluğu 6,0 ila 7,2 g/cm<sup>3</sup> olup 138 ila 345 MPa sıkıştırma basınçlarında kalıplanır ve sonrasında koruyucu atmosfer altında kademeli olarak sinterlenirler. Sinterleme sıcaklığı ilk bölge yani ön ısıtma bölgesinde 425 ila 650°C arasında; ikinci bölge yani yüksek ısıtma bölgesinde ise 730 ila 850°C arasındadır [25-26].

Toz metalurjisi metoduyla sinterlenerek üretilen bakır esaslı kompozitler, tribolojik parçalarda (yataklar, burçlar vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Yağlayıcının türü, oranı ve üretim tekniği gibi farklı uygulamalar kullanılarak katı yağlayıcılarla birlikte bakır esaslı kompozitler üretilmektedir. Bakır-kalay esaslı kompozit malzemeler, aşırı yük, atmosfer ve sıcaklık şartlarında kendi kendini yağlayabilen yatak malzemeleri olarak halen geliştirilmeye çalışılmaktadır [27]. Bu metotla üretilen kompozitlerde optimum tribolojik özellikler elde etmek için (sürtünme, aşınma ve yatak sıcaklığı gibi) katkı olarak grafit, molibden disülfid, PTFE gibi katı yağlayıcılar kullanılmaktadır [28].

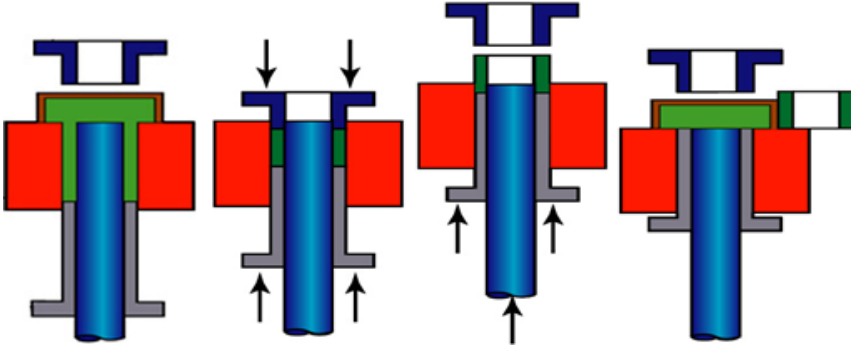
Yatak üretimi dört ana aşamadan oluşur bunlar sırasıyla, karıştırma ünitesi, presleme ünitesi, sinterleme ünitesi ve kalite kontrol ünitesidir. Bu üretim sisteminde yatak burcunun istenilen tribolojik özelliklerde ve kalitede nihai bir ürün olarak üretilebilmesi için ilk aşamada hammaddenin doğru seçilerek hazırlanması gereklidir. Yatak burcu üretiminin ilk basamağı karıştırma ünitesidir. Bu aşamada hammaddeyi oluşturan metal veya alaşım tozları istenilen toz partikül aralığında ve oranlarında homojen olarak karışım hazırlanır. Karışıma ihtiyaca bağlı olarak katkılar, yağlayıcılar ve bağlayıcıların ilave edilir. Bu aşamanın doğru ve özenli yapılması, sonraki aşama olan presleme işleminde ham ürünün kolaylıkla şekillendirmesini sağlar. Ham yatak burçlarını üretmek için hazırlanan kalıp prese bağlanır. Kalıp dört ana parçadan oluşur. Bunlar “kalıp gövdesi, üst zımba, alt zımba ve maça”dır (Şekil 10).



Şekil 10. Kalıp setinin montaj resmi [8]

Karıştırma ünitesinde hazırlanmış homojen toz karışım presleme ünitesinin toz haznesine doldurulur. Pres kalıbında ham yatak burçlarının üretim işlemi dört aşamada gerçekleştirilir. (Şekil 11).

- Homojen toz karışım dolu pabucun kalıp üzerine gelmesi ve kalıp boşluğunun doldurulması,
- Kalıp boşluğuna dolan toz karışımı sıkıştırma işlemi,
- Toz karışımın sıkıştırılarak şekillendirildiği ham ürünlerin, alt zımbanın yukarı doğru hareketi ile kalıptan çıkarılma işlemi,
- Yeni bir üretim döngüsü için bir yandan pabucun kalıp üzerine gelirken diğer yandan ham numuneyi çalışma alanından uzaklaştırması şeklindedir.



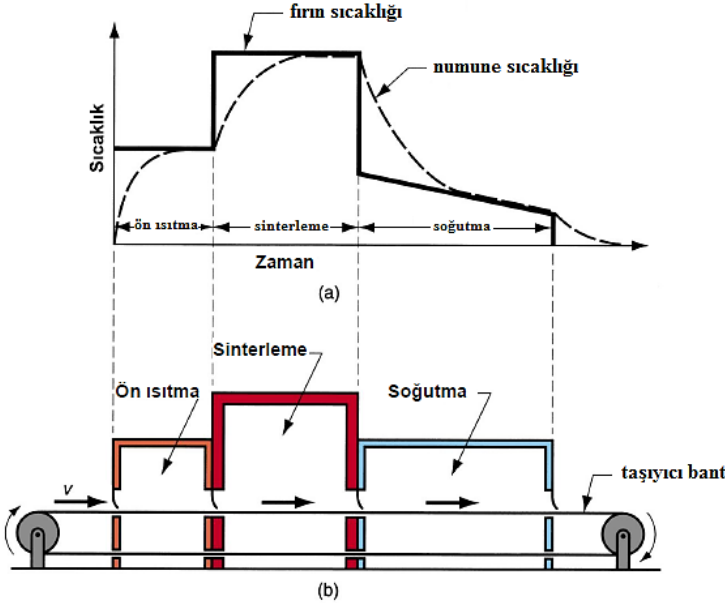
Şekil 11. Yatak burçlarının ham olarak üretim aşamaları [8].

Şekil 11’de ham numunenin üretiminde işlem basamakları şematik olarak verilmiştir. Presin çalışmaya başlamasıyla birlikte, presin toz haznesindeki homojen toz karışım, pabucun toz haznesine dolar ve içi karışım dolmuş pabuç, kalıp boşluğunun üzerine gelerek içerisindeki karışımı kalıp boşluğuna aktarır. Pabuç bu işlemi tamamladıktan sonra geri çekilirken, üst zımba, kalıp içerisine doğru, tozları sıkıştırma işlemi için ilerler. Sıkıştırma işlemi, bakır esaslı tozların sertlik ve numunelerde istenen gözeneklilik özelliklerine bağlı olarak genelde 100 MPa veya altında bir basınç değerinde basılması tercih sebebidir. Üst zımba sıkıştırma görevini tamamlamasının ardından kalıp içerisinden üst noktaya doğru geri çıkarken ve sıkıştırma işlemiyle kalıbın şeklini almış ham numune ise alt zımbanın itmesiyle kalıp içerisinden dışarı çıkarılır. Sonrasında, yeni bir döngünün ilk işlemi için haznesi toz dolu pabuç, kalıp boşluğunun üst yüzeyine gelir. Pabuç, bu noktada bir taraftan kalıp içerisinden çıkmış olan ham ürünü çalışma alanı dışına iterken diğer taraftan da yeni döngüye başlamış olur. Üretilmiş ham numuneler daha sonraki aşamada sinterleme ünitesine gönderilir (Şekil 12).



Şekil 12. Sinterleme fırını (Konveyörlü-bantlı sistem)

Sinterleme ünitesi, sinterleme işleminin yapıldığı bir fırın ünitesidir. Ünitenin ilerleme sistemi Şekil 12’de görüldüğü gibi bant mekanizmasıyla sağlanır. Bu süreç seri üretime uygundur. Sinterleme ünitesi üç bölgeden oluşur. Bunlar; “ön ısıtma, sinterleme ve soğutma” olarak isimlendirilir. Sinterleme işleminde ilk önce ham numuneler taşıyıcı bant üzerine yerleştirilir ve bant sistemi çalıştırılarak hareketi başlatılır. Ön ısıtma bölgesinde, küresel toz tanelerinin istenilen formda birbirleriyle bağ oluşturabilmeleri ve kalıplama esnasında şekillendirilebilmenin kolaylıkla yapılabilmesi için karışım içindeki bağlayıcı katkıların uçurulma işlemi yapılır. Bu işlem için ön sinterleme sıcaklığı genellikle  $450-650^{\circ}\text{C}$  aralığındadır. Ön hazırlık bölgesi de olan bu bölge sinterleme bölgesine geçiş aşamasıdır ve burada ham ürün sıcaklıkları Şekil 13’den de anlaşılacağı üzere artış halindedir [8,29,30].



Şekil 13. Sinter fırının üç bölgesi ve ısıl çevrimi [8]

Sinterleme hattının ikinci bölgesi sinterleme aşamasıdır. Bu aşamada sinterleme sıcaklığı, ana metal olan bakır alaşımının ergime sıcaklığı altında tutulur. Çünkü alaşımdaki katkıları sıvı faz sinterleme sonucu eriyebilir ve ergime noktası düşük olan bileşenlerin oluşturduğu sıvı – katı parçacık sınırlarına nüfuz ettikçe iç yapıda makro düzeyde boşluk oluşur [31]. Parçacıkların temas ettikleri bölgelerde difüzyon oluşumu gerçekleşir. Bu durum yapısal parçalar için uygun değilken, gözenekli parçalar için uygundur [10,32,33].

Sinterleme hattının üçüncü bölgesi olan soğutma bölgesi, ürünlerin ham halden, sinterlenmiş ürün halini aldığı son bölgedir. Burada sinterleme bölgesinden çıkan ürünler, sıcaklıklarının düşürülmesi ve hava ile temas ederek oksitlenmelerini önlemek için, 20–37 °C koruyucu gaz atmosferinde 5 - 10 Hertz fan desteğiyle soğumaya bırakılmaktadırlar. Soğutma işlemi sonrası sinterlenmiş ürünler, kalite kontrol işlemi için hazırlanır. Sinterleme sonrası yatak burç ürünlerinde küçük oranlarda ölçüsel değişimler olabileceğinden, belirlenen tolerans aralığında hazırlanmış özel takımlar preste kalıba bağlanarak boyutlandırma ve çap kontrolünden geçirilir. Kontrol işlemi sonrası yatak burçları yağ/yağlayıcı emdirme işlemine tabi tutulacaksa bu işleme devam edilir [8].

Sinterlemeyle üretilen gözenekli yatak numunelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek için yapılan yağ veya yağlayıcı emdirme/emprenye işlemi 110°C sıcaklıkta hazırlanan yağ banyolarında 10 - 15 dakika vakum altında yapılır. Tam emprenye işlemi sinterlenmiş ürünlerin gözeneklerini doldurmak için yapılır. Sinterlenmiş ürünlerin bir yağlayıcı veya katkı maddelerinin eklenerek özel hazırlanmış karışım ile emprenye edilmesi, spesifik uygulamalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir [84]. Bununla birlikte, katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer malzemeler daldırma metodu, spreylendirme metodu gibi metotlar vasıtasıyla da kaplanabilmektedir. Örneğin; PA (Poliamid), PVC (Polivinilklorit) ve PE (Polietilen), Poliüretan, PTFE (Politetrafloretin) vb. polimer tozlarının oluşturduğu akışkan yatağa ısıtılmış metalin daldırılması ile kaplama işlemi yapılabilir. Polimerin yatak malzemesi yüzeyine film şeklinde kaplanması sağlanabilir. Polimer ve ilave edilecek katkı maddeleri karıştırılarak ve eritilerek hazırlanan karışım kaplama ünitesi/yatağına hazırlanır. Kaplanacak malzeme eriyen polimer ünitesinden geçirilir, sonrasında kütleme işlemine tabi tutulur. Benzer uygulama olan akışkan kaplama metodunda ise, 50- 100 mikron boyutlarında polimer toz konularak hazırlanmış kaplama ünitesi inert gaz akımı ile akışkanlaştırılır. Ön ısıtmaya tabi tutulan kaplanacak yatak malzemesi bu kaplama ünitesine daldırılır. İyi bir yapışma sağlamak için parça kaplanacak polimere uygun yapışma sıcaklıklarında ısıtılmaktadır [34].

Polimer malzemelerden korozyona karşı dirençli ve kendinden yağlama özelliğine sahip polimer PTFE'dir. PTFE 250°C' ye kadar asit, al-

kali ve çözücülere dayanabilmektedir. PTFE, endüstriyel plastikler içinde  $-260^{\circ}\text{C}$  ila  $+270^{\circ}\text{C}$  olarak en geniş çalışma sıcaklık aralığına sahiptir. Bunun yanında, kimyasal dayanımı, en düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip oluşu, kayan/yapışmaz (non-stick) özelliği ve yeterli mekanik özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanına sahiptir.

Farklı metotlar ve sprey kaplama metoduyla PTFE'nin metal yüzeyine uygulanabilirliği endüstriyel uygulamalarda sıklıkla görülmektedir. PTFE ve PTFE katkılı katı yağlayıcılar, bronz gibi sinterlenerek gözenekli mikro yapı elde edilen bakır esaslı malzemelerin çalışma yüzeylerindeki gözeneklere, katı yağlayıcı olarak kaplanmaları/emdirilmeleri sonucunda, yatak uygulamaları için mükemmel tribolojik özelliklere sahip kompozit bir malzeme olarak üretilebilmektedirler. PTFE'nin yanında PE, POM, PA6, PA66 gibi polimerler de sürtünme katsayısını azaltmakta başarılı olduklarından kompozit yüzeylerde düşük sürtünme özelliği kazandırmak için kullanılmaktadır [35].

Çoğu araştırmacılar PTFE'nin avantajlarını kullanmak ve dezavantajlarını azaltmada, PTFE ile birlikte grafit, karbon, cam fiber, bronz ve bazı metal oksitler gibi ticari katkıları tribolojik uygulamalar için kullanmışlardır [36,37,38]. Öte yandan, PTFE'nin belli özellikleri katkılarla birleştirilip farklı metotlar (emprenye veya kaplama gibi) uygulanması yüzeyin aşınma direnci gibi özelliklerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Kornopol'tsev ve ark., çelik altlık yüzeyine sinterlenen bronz yapının gözeneklerine, hazırladıkları PTFE ve kurşun bazlı kompozit karışımı doldurarak basınç altında preslemiş ve ardından sinterlemişlerdir [39]. Seri imalata uygun olarak tasarlanan diğer bir metot ise; şerit formunda tasarlanan çelik altlık malzeme yüzeyi zımparalama veya kumlama işlemi uygulanarak pürüzlendirilir ve yatak tasarımına uygun şekilde hazırlanan bakır esaslı tozlar çelik altlık malzeme yüzeyine yayılır ve ardından sinterlenir [40]. Sinterleme işleminden sonra da haddeleme işlemi uygulanır. Yatak malzemesi imalatı için hazırlanmış şerit malzeme yüzeyine bakır esaslı malzemenin sinterlenmesi neticesinde üretilen bimetal malzemenin yüzeyine sprey kaplama metoduyla polimer katkılı kompozit malzemeler kaplanarak kendinden yağlama özelliği kazandırılabilir. "POM, POM+Pb, PTFE, PTFE+Grafıt, PTFE+Pb, PTFE+PA, PTFE+MoS<sub>2</sub> gibi", katı yağlayıcıların kaplanması ile çalışma yüzeylerine kendinden yağlama özelliği kazandırılır. Bu yataklar makine ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Saf PTFE, yük altında deformasyona uğrayıp görevini yapmada yetersiz kalabildiği için farklı katkıları kullanılarak dezavantajı minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu maksatla optimum yük, hız ve sıcaklık şartlarında, deformasyona uğramadan yüksek aşınma direnci ve düşük termal genleşme gösterebilmesi amacıyla grafit katkılı, bronz katkılı, cam elyaf katkılı, karbon katkılı, kompozit bir yapıda enjeksiyon tekniğiyle üretilirler. Diğer

yandan, PTFE' nin katı yağlayıcı ve yapışmaz kayma özellikleri yatak çalışma yüzeylerine kaplama şeklinde spreyci kaplama [14], elektro depolama [37,42], vakum emdirme [44], daldırma veya dispersiyon [43] gibi emdirme/kaplama teknikleri ile Grafit, Polyamid,  $\text{MoS}_2$  gibi katı yağlayıcılar, pirinç veya bronz alaşımları,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaF}_2$ , gibi talk partikülleri ile birlikte kaplanması gibi farklı çalışmalar yapılmaktadır.

### 3.3. Katı yağlayıcı gömülmüş yatakların üretimi

Kendinden yağlamalı katı yağlayıcı gömülmüş yataklar, sürekli döküm veya santrifüj döküm metoduyla üretilmiş yatak profilinin talaşlı imalat yoluyla istenilen ölçülerde ve çevresine açılan eşit aralıklı deliklerin işlenmesiyle elde edilir. Sonrasında istenilen katı yağlayıcı bazlı tapalar bu deliklere gömülür. Dökümle üretilmiş bronz gövdeye, genellikle grafit veya PTFE'den yapılmış katı yağlayıcılar bu şekilde yerleştirilir. Bronzun şok yüklere uygun olması, yüksek yük kapasitesi gibi avantajlarına destek olarak düzenli aralıklarla yerleştirilen katı yağlayıcı depoları, yatak parçasının uzun bakım aralıklarına sahip olmasını sağlar. Bu depolar aynı zamanda bronz kaymalı yatağın kir parçacıklarını emebilir ve katı yağlama sayesinde yatağın sürtünme katsayısı da azaltılmış olur [16].



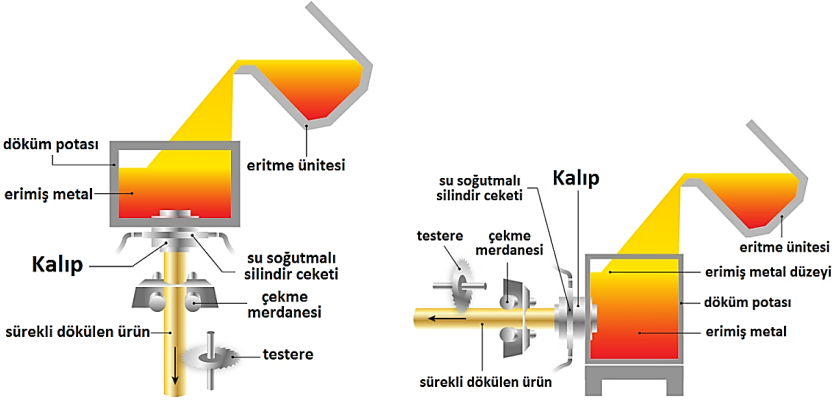
Şekil 14. Katı yağlayıcı gömülmüş kaymalı yatak üretim süreci:

a) Yatak burcunun işlenmesi

b) Yağlayıcı deliklerinin açılması

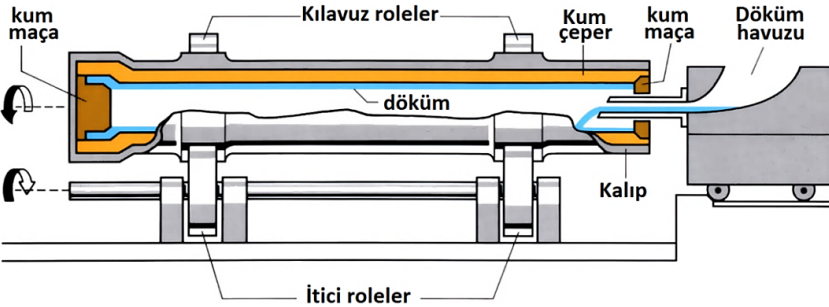
c) Katı yağlayıcı tapaların montajı

Sürekli döküm Şekil 15'de görüldüğü gibi dikey veya yatay yöntem olarak iki şekilde gerçekleştirilir. Üretilmek istenen malzeme türü ve boyut aralığına uygun olan metot seçilir. Sürekli döküm işleminde pota devamlı bir ergitme ünitesinden (fırından) beslenir. Erimiş metal, tamamen kapalı olan potada besleme sıcaklığında tutulur. Bu sayede, mevcut kir, cüruf veya gazlar eriyiğin üst kısmına yükseltilmiş olur.



Şekil 15. Sürekli döküm metodu, a) Dikey sürekli döküm b) Yatay sürekli döküm [43]

Dikey sürekli dökümde ergimiş metal alaşımın, bir taraftan döküm potasının altında bulunan su soğutmalı kalıba akması sağlanırken diğer taraftan kalıptan geçmesiyle beraber alaşımın katılaşması sağlanır. Yatay sürekli dökümde ise, ergimiş metalin döküm potasının önünden su soğutmalı kalıba doğru akışı sağlandıktan sonra kalıptan geçmesiyle birlikte ergimiş alaşımın katılaşması gerçekleşir. Her iki metotta da ileri hareketini sağlayan çekme silindirleri, çubuğu döküm sırasında ağırlığını destekleyerek silindir boyunca çeker. Sıcaklığın hassas kontrolü ile istenilen tane yapısı ve metalurjik özellikler elde edilir. Devam eden sürekli döküm işlemiyle senkronize olan gezici bir testere, üretilen çubuğu otomatik olarak istenilen uzunlukta keser. Sonuç olarak, yatay sürekli döküm, malzemenin metalurjisinden dolayı alüminyum bronzlar için en uygun olanıdır.

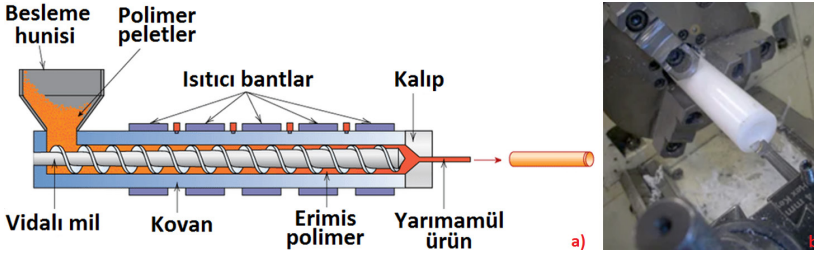


Şekil 16. Bakır esaslı yatak burcunun santrifüj döküm metodu üretimi[44]

Şekil 16' da gösterilen, bir diğer metot santrifüj dökümdür. Bu metot içi boş silindirleri veya boruları dökmek için kullanılır. Döküm işlemi merkezkaç kuvvetinin etkisiyle gerçekleştirilir. Ergimiş metal, yüksek hızda döndürülen kalıba doğrudan dökülür. Kalıp yatay bir eksen etrafında döndürüldüğünden merkezkaç kuvveti, ergimiş metali dönme ekseninden kalıbın duvarlarına doğru fırlatarak kalıp çeperinde istenilen kalınlıkta ürünü meydana getirmiş olur. Santrifüj döküm, içi boş silindirik ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır.

### 3.4. Katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer yatakların üretimi

Katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer malzemelerden yapılmış kaymalı yataklar bakım gerektirmeyen plastik kaymalı yataklar olarak da bilinmektedir. Polimer bir malzemeye katkı maddeleri ve katı yağlayıcıların eklenmesi ile oluşturulan kompozit hammadde enjeksiyon kalıplama metodu kullanılarak doğrudan yatak burcu olarak üretilebilir ya da Şekil 17’ de gösterildiği gibi ekstrüzyon yöntemiyle belirli çap ve uzunlukta üretilen yarı mamuller, sonradan talaşlı imalat yöntemi kullanılarak istenilen çap ve boyutlarda işlenir ve burç olarak kullanıma hazır son ürün haline getirilirler.



Şekil 17. Katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer yatakların ekstrüzyon metodu ile üretimi

a) yarı mamül yatak malzemesinin üretimi

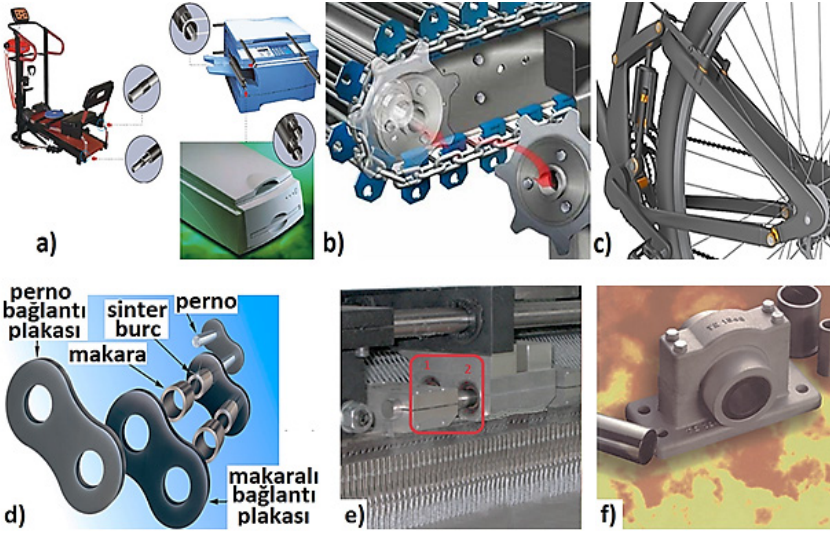
b) Yatak burcunun talaşlı imalat yöntemiyle işlenmesi

Katı yağlayıcı özelliğe sahip polimer yataklar, yağlamanın mümkün olmadığı özel makina parçalarında, su altı uygulamalarında, gıda, ilaç, kimya endüstrileri gibi düşük sıcaklık, kimyasal ve korozif ortam dayanımının istenildiği alanlarda metal malzemelerle birlikte kullanıma uygun, ek yağlama gerektirmeden güvenilir bir kayma ve yataklama sağlayan kaymalı yatak çeşitlerinden biridir. Kendinden yağlamalı olan bu plastik yataklar tribolojik olarak optimize edilmiş polimer karışımlarından yapılırlar. Bileşimleri RoHS (*Restriction of Hazardous Substances/ Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması*)’a uyumlu olarak hazırlanırlar. Bu sayede, yüksek basınç dayanımı, yüksek mekanik sönümleme, korozyon direnci sıcaklık direnci, iyi bir ısı dağılımı, kimyasal dayanım, aşınmaya dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, hafiflik (düşük ağırlık) özellikleriyle birlikte, bakım gerektirmeyen kuru çalışma ortamlarında çalışabilen uygun maliyetli yatak olarak üretilebilirler.

### C- Kendinden Yağlamalı Yatakların Kullanım Yerleri

Dünya çapında çevre bilinci ve yasal gerekliliklerin yaygınlaşmasının yanı sıra artan bakım maliyetleri ve rekabet her alanda çevre dostu çözümler olan ilgi artırmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda az bakım gerektiren veya bakım gerektirmeyen sistemlerin kullanımını da giderek yaygınlaşmaktadır. Kendi kendini yağlayan, bakım gerektirmeyen yatak tasarımları çevreye zararlı yağlayıcıların atıklarını etkin bir şekilde azaltılmasına ve bakım maliyetlerinden tasarruf edilebilmesini amaçlamaktadır.

Yağlamanın zor olduğu ve devamlı yağlama imkânı olmayan uzun yatak ömrü istenen ve bakım gerektirmeyen düşük sürtünmeyle dinamik yükleri karşılayarak aşınmanın kontrol altında olması istenen, makine veya cihazların yatak uygulamaları için tasarlanmış yataklardır. Otomobil, rüzgâr türbinleri, elektrik motorları, dikiş makineleri, bilgisayar, yazıcılar, tarım ve paketleme makinelerinin parçalarında kendinden yağlamalı yataklar kullanılmaktadır. Kaymalı yataklar, endüstriyel sektörde, rulmanlı yataklara avantaj sağladıkları yerlerde, yavaş dönen, salınan veya doğrusal hareketlerin yüksek mekanik yükler altında gerçekleştirilmesi istenen yerlerde tercih edilirler. Çünkü rulmanlı yataklara göre sessiz çalışır, merkezi veya merkezi olmayan yağlama sistem maliyetlerini ortadan kaldırmaları ve sade bir tasarıma sahip olmaları nedeniyle daha az maliyetlidirler. Kirlenmeye karşı daha az duyarlı olmaları nedeniyle, üretim endüstrisi, tarım, madencilik gibi olumsuz çevre koşullarına sahip uygulamalarda kullanılabilirler. Düşük hız ve yüksek yük içeren uygulamaların yanı sıra düşük gürültülü çalışmanın, kompakt ve hafif tasarımın önemli olduğu uygulamalarda da kullanıma uygundur. Endüstride kullanım alanı çok fazla olan kuru sürtünmeli (kendinden yağlamalı) yataklardan bazı örnek uygulamalar Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Kendinden yağlamalı yatakların örnek kullanım yerleri:

- a) Yazıcılar ve koşu bantları hareket ünitelerinde, b) Konveyör burçlarında, c) bisikletlerin fren mekanizma bağlantılarında, d) Zincir bakla bağlantılarında, e) Takım tezgâhlarının kayıt ve kızaklarında, f) Mil göbek bağlantılarında

## SONUÇLAR

Kendinden yağlamalı yataklar endüstride yukarıda belirtildiği üzere genelde dört farklı şekilde üretilmektedir. Her üretim şeklinin kendine özgü zorluklar içerdiği bilinmektedir. Son zamanlarda polimer esaslı yatakların yanı sıra ve polimer ve grafit katkılı yatakların üretiminde çok ciddi bir artış gözlenmektedir. Bu durum üretim tekniklerini de geliştirmektedir.

Kendinden yağlamalı bimetal yataklar, birçok uygulamada düşük hızlarda, çalışma sıcaklığı -200 ila +280 °C aralığında yağlama gerektirmeden çalışabilmektedir. Bimetal yataklar; PTFE bileşiğinden yapılmış kayar bir çalışma katmanı, sinterlenmiş ara katman ve çelik altlıktan oluşan kompozit yapılarıdır.

Özellikle polimer esaslı PTFE bazlı yağlayıcı yüzeye sahip yataklar, hidroteknik uygulamalarda örneğin su altı ve deniz suyu uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Toz metalürjisi tekniğiyle üretilen kompozitlerde PTFE, POM, PA, Grafit, MoS<sub>2</sub> gibi katı yağlayıcıların kullanılması sürtünme ve aşınmayı azaltmada etkin rol oynamaktadır.

Gözenekli bronz malzemelerin yüzeyine farklı kaplama metotlarıyla emdirilmiş katı yağlayıcılar sürtünme katsayısı ve aşınma parametrelerine olumlu sonuçlar vermektedir.

Kuru sürtünmenin gerçekleştiği kompozit bir yapının çalışma yüzeyinde, sürtünme katsayısı ve aşınma miktarı açısından PTFE gibi katı yağlayıcı polimerlerin bazı uygulamalarda tek başına yeterli olmadıkları görülmüştür. Bu gibi durumlarda birbirlerine katkı olarak kullanımları ve farklı katkılarla oranlanarak tatbik edilmesi daha üstün özellikli optimum performans parametrelerine sahip yağlayıcı yüzeyler ortaya çıkarmıştır.

Güngör yaptığı doktora çalışmasında PTFE emprenye edilmiş bronz yatağın aşınma ömrünü artırmada PTFE'ye farklı oranlarda grafit katkısı ekleyerek daha uzun ömürlü bir çalışma yüzeyi elde etmiştir. Ticari yataklarla karşılaştırarak %30 oranında ömür artışı tespit etmiştir [8].

PTFE kaplı yatak burçlarındaki deneysel çalışmalarda hızın ve yüklerin artışlarına bağlı olarak yatak sıcaklıklarının azaldığı da görülmüştür.

Kuru sürtünmeli yataklar, çevreye zararlı yağlayıcıların ve atıkların etkin bir şekilde azaltılmasının gerekli olduğu günümüzde, kendi kendini yağlayan ve bakım gerektirmeyen özellikleriyle yavaş dönen, salınan veya doğrusal hareketlerin yüksek mekanik yükler altında gerçekleştirilmesi istenen pek çok farklı endüstriyel uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Bu bölümde anlatılan kuru sürtünmeli yataklar özellikleri, çeşitleri ve geniş uygulama alanlarında kullanım olanaklarıyla bakım maliyetlerinden tasarruf edebilmeyi de sağlamaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Harris, T. and Kotzalas, M. (2007) *Advanced Concepts of Bearing Technology*, Fifth Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [2] Koç, E. (2006) *Makina Elemanları*, Cilt-II, Nobel Yayınları, Adana.
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Plain\\_bearing](https://en.wikipedia.org/wiki/Plain_bearing).
- [4] *Makine Elemanları Cilt: I-II*, (2005) Birsen Yayınevi, İstanbul
- [5] Rende, H., Hanyaloğlu, C. (2012) Rulmanlarda ve kaymalı yataklarda seramiklerin kullanımı, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 53 (633), 28-35.
- [6] Ai, X. and Moyer, C. A. (2001) *Modern Tribology Handbook*”, Vol. I & II, CRC Press, London.
- [7] Welsh, R. J. (1983) *Plain Bearing Design Handbook*, The Thetford Press Ltd., UK.
- [8] Güngör, K. (2016) Sinterlenmiş bronz esaslı kaymalı yataklarda polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [9] Zhao, S., Yu, A., Zou, P., Wang, G., Li, K., Wang, J., Ye, J. (2023) Tribological properties of dopamine-modified dimple textured surfaces filled with PTFE. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 237(3), 655-666.
- [10] Güngör, K., Demirer, A. (2021). Effects of impregnating PTFE filled with added graphite on wear behavior of sintered bronze plain bearings. *International Journal of Materials Research*, 112(8), 623-635.
- [11] <https://www.csb-gleitlager.de/gerollte-wartungsarme-trockengleitlager.html>
- [12] Khoddamzadeh, A. (2007) *Development of lead-free PTFE based sliding bearing materials* (Doctoral dissertation, Carleton University).
- [13] Vieira, L.E., Goncalves, A.L., Arraya, N.I.R., Rodrigues Neto, J.B., Dias, A., Klein, A.N. (2021). Characterization of Sintered Bronze–MoS<sub>2</sub> Composite With Solid Lubrication Effect. *Journal of Tribology*, 143(7), 071402.
- [14] Güngör, K., & Demirer, A. (2022). Investigation of Dry Sliding Friction Wear Behavior of CuSn11 Bronze Plain Bearing Applying Impregnated Graphite-Filled PTFE. *Tribology Transactions*, 65(5), 880-891.
- [15] Vilumsone-Nemes, I. (2021) *Advanced lubrication systems for industrial sewing machines*. 8th International Joint Conference of Environmental Light Industry Technologies, Obuda University, Budapest, Hungary.
- [16] Jiang, J., et. al. (2022) A case study on the wear mechanism and stress evolution of graphite plugged bronze wear plate from the field trial. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105836
- [17] Sarı, A., Nteziyaremye, Ö.S. (2016). Polimer Yatak Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve*

Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2), 446-453.

- [18] <https://www.igus.at/info/plain-bearings-polymer-bearings-vs-metal-bearings>
- [19] Totten, G.E. (2017) Friction and Wear of Sliding Bearing Materials. Friction, Lubrication, and Wear Technology, 18, 559-757.
- [20] [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=manufacturing\\_bi-metal\\_strips\\_for\\_copper\\_bearings](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=manufacturing_bi-metal_strips_for_copper_bearings)
- [21] Tallafuss, P., Johnston, J. (2018) Defects, causes and prevention controls in the continuous bronze/steel bimetal strip sintering process. Engineering Failure Analysis, 92, 32-43.
- [22] Soflaei, H., Vahdat, S.E. (2016) Microstructure study of diffusion bonding of centrifuged structural steel-bronze. Archives of Foundry Engineering, 16(2), 99-104.
- [23] Katrus, O.A., Aleshina, A.V., Gribkov, V.K., Ocheretyanskii, V.M. (1984) Some properties of thin steel-copper bimetal sheet. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 23, 370-372
- [24] Susilowati, S.E., Fudholi, A., Sumardiyanto, D. (2022) Mechanical and microstructural characteristics of Cu–Sn–Zn/Gr metal matrix composites processed by powder metallurgy for bearing materials. Results in Engineering, 14, 100377.
- [25] Pelletiers, T., Nadkarni A., Ijeoma, R., Murphy T. (2007) Improving performance from self-lubricating bronze bearings, Metal Powder Report, 62, 26-31.
- [26] Bartz, W.J. (1993) Selbstschmierende und wartungsfreie Gleitlager: Typen, Eigenschaften, Einsatzgrenzen und Anwendungen, Vol. 422, expert verlag.
- [27] Tavakoli, A., Liu, R., Wu, X.J. (2008) Improved mechanical and tribological properties of tin–bronze journal bearing materials with newly developed tribaloy alloy additive. Materials Science and Engineering 489, 389–402.
- [28] Katoa, H., Takamaa, M., Iwaib, Y., Washidac, K., Sasaki, Y. (2003) Wear and mechanical properties of sintered copper–tin composites containing graphite or molybdenum disulfide, Wear, 255, 573-578.
- [29] Egorov, M.S., Pustovoi, V.N., Tsordanidi, G.G., Egorova, R.V. (2022) Manufacturing Technology of Sliding Bearings from Ferro-Graphite Compositions. Safety of Technogenic and Natural Systems, 60.
- [30] Chen, F., Yan, Z., Wu, X., Liu, B., Liu, Y. (2021) Microstructures and properties of Cu-10Sn oil bearings reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. Advanced Powder Technology, 32(3), 710-717.
- [31] Turriff, D.M.R. (2007) Process kinetics of transient liquid phase sintering in a binary-isomorphous alloy system, PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [32] Dearn, K.D., Hoskins, T.J., Petrov, D.G., Reynolds, S.C., Banks, R. (2013)

Applications of dry film lubricants for polymer gears. *Wear*, 298, 99-108.

- [33] Güngör, K., Ozsert, I., Demirer, A., Fiçici, F., Demir, A. (2015) Experimental optimization of wear parameters of sintered bronze based materials. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 22, 288–296.
- [34] Carlsson, P., Bexell, U., & Olsson, M. (2000). Tribological behaviour of thin organic permanent coatings deposited on hot-dip coated steel sheet—a laboratory study. *Surface and Coatings Technology*, 132(2-3), 169-180.
- [35] Chernets, M., Kornienko, A., Fedorchuk, S., Chernets, Y. (2022) Investigation of the Effect of Temperature on the Contact Characteristics and Resource of Metal-Polymer Plain Bearings. *Tribology in Industry*, 44(1), 16.
- [36] Khedkar, J., Negulescu, L., Meletis, E.I. (2002) Sliding wear behavior of PTFE composites, *Wear*, 252, 361-369.
- [37] Balaji, R., Malathy P., Kumar, K. Y., Subramanian K. (2006) Electrodeposition of bronze–PTFE composite coatings and study on their tribological characteristics, *Surface and Coatings Technology* 201, 3205–3211.
- [38] Nunez, E. E., Gheisari, R., Polycarpou, A.A. (2019). Tribology review of blended bulk polymers and their coatings for high-load bearing applications. *Tribology International*, 129, 92-111.
- [39] Kornopol'tsev, V.N., Kornopol'tsev, N.V., and Mognonov, D.M. (2007) Metal-PTFE material for dry friction bearings, *Journal of Friction and Wear*, 28, 187-192.
- [40] Wang, Y., Gao, Y., Li, Y., Zhai, W., Sun, L., Zhang, C. (2019) Review of preparation and application of copper–steel bimetal composites, *Emerging Materials Research*, 8(4), 538-551.
- [41] Li, F., Yan, F.Y., Yu, L.G., Liu, W.M. (2000) The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites. *Wear*, 237(1), 33-38.
- [42] Ghorbani, M., Mazaheri, M., Afshar, A. (2005). Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite–bronze composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 190(1), 32-38.
- [43] Liu, P., Lu, R., Huang, T., Wang, H., Li, T. (2012) A study on the mechanical and tribological properties of carbon fabric/PTFE composites. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 51(4), 786-797.
- [44] Su, Y., Wang, Y., Liu, H., Yan, F. (2023). Preparation and tribological properties of different kinds of metal foam-polytetrafluoroethylene co-continuous phase composites. *Tribology International*, 109090.





# ALGORİTMA PARAMETRE SEÇİMİNİN MİKRODALGA TRANSİSTÖRÜNÜN OPTİMİZASYON PROBLEM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

*Yazar: Doç. Dr. Ahmet Arif ULUSLU<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

ORCID ID: 0000-0002-5580-1687

\*Doktora Tezinden Üretilmiştir.

## 1. GENETİK ALGORİTMALAR İLE OPTİMİZASYON

Optimizasyon, daha iyi bir şey yapma süreci olarak adlandırılır. Bir mühendis ya da bilim adamı yeni bir fikir geliştirir ve optimizasyon bu fikir üzerinde gelişir. Optimizasyon, bir ilk fikir üzerindeki çeşitlikleri denemekten ve o fikir üzerinde iyileştirmek için elde edilen bilgileri kullanmaktan oluşur. Amacı etkileyen fikir veya değişken elektronik formatta girilebildiği sürece, bilgisayar optimizasyon için mükemmel bir araçtır. Bilgisayarı bir miktar veri ile beslenerek ve problem çözülebilir. Burada akla gelen “Tek çözüm bu mu?” sorusuna yanıt, “Çoğu zaman değil” olarak cevaplanmaktadır ve akla gelen bir başka zor soru ise “En iyi çözüm mü?” olabilir. İşte optimizasyon, bu cevapları almak için kullandığımız matematik aracıdır.

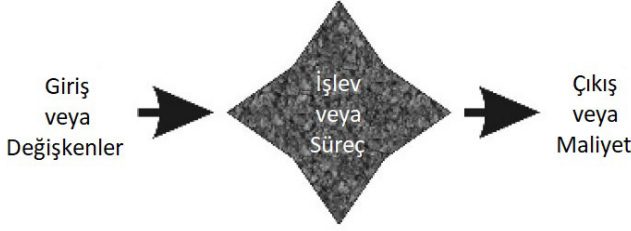
“En iyi” çözüm terminolojisi birden fazla çözümün bulunduğunu ve çözümlerin eşit değerde olmadığını anlamına gelir. En iyinin tanımı; eldeki probleme, çözüm metoduna ve izin verilen toleranslara göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle optimal çözüm, problemi formüle eden kişiye bağlıdır. En iyi tanımı etkileyen faktörlerdir: Eğitim, düşünce, rüşvet ve uyku miktarıdır. Bazı problemlerin kesin cevapları veya kaynakları vardır yani en iyi bir tanımı vardır. Örneğin, doğrusal birinci mertebeden diferansiyel denklemlere bir çözümü vardır. Diğer problemlerin optimal nokta veya ekstrem olarak bilinen çeşitli minimum veya maksimum çözümlere sahiptir yani böyle problemler için en iyi göreceli bir tanım olabilir. Örneğin, en iyi sanat eseri veya müzikal beste gibi göreceli kavramlardır.

Bu bölüm, optimizasyonun temel bir açıklaması ile başlar, daha sonra aşamaları ile devam eder ve temel optimizasyon yaklaşımlarına birkaç örnek verilerek sonuçlanır. Görünüşte basit bir örnek, tipik asgari arayıcıların birçok eksikliğini ortaya koymaktadır. Geçmiş verilerle optimizasyon yerel sınırlara takıldığından ötürü, insanlar biyolojik süreçlere dayanan daha küresel yöntemlere yönelmişlerdir.

## 2. OPTİMİZASYON

Hayat içerisinde, optimizasyon için birçok fırsatla karşıımıza çıkmaktadır. Örneğin; sabah ne zaman uyanırız, bu uyku miktarı ile en üst düzeyde çalışabiliyor muyuz? İşe gitmek için en iyi yol hangisidir? İlk olarak hangi projeyi ele alıyoruz? Veya bir şeyi tasarlarken, maliyeti azaltmak veya bir ürünün çekiciliğini en üst düzeye çıkarmak istediğimizden, bunun uzunluğunu kısaltır veya bunun ağırlığını azaltırız. İşte tüm bunlar birer optimizasyondur. Optimizasyon, bir cihazın, matematiksel sürecin veya deneylerin minimum veya maksimum çıktısını veya sonucunu bulmak için girişleri veya özelliklerini ayarlama işlemidir (Şekil 1). Süreçlerde veya fonksiyonlarda giriş değişkenleri; maliyet fonksiyonu, amaç fonksiyonu veya uygunluk fonksiyonu olarak, çıkış değişkenleri maliyet veya uygunluk (fitness) değeri olarak bilinir. Eğer süreç bir deney ise, değişkenler den-

eye fiziksel girişlerdir.



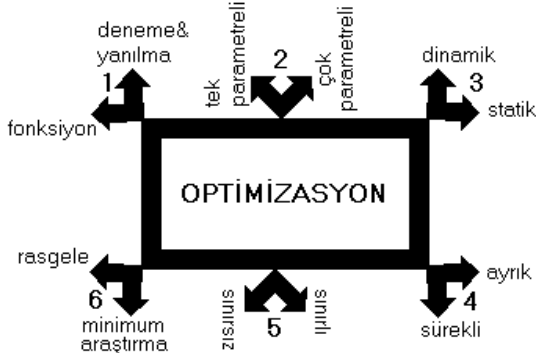
Şekil 1 Optimize edilecek bir fonksiyon veya işlemin diyagramı

Bu çalışmada, çıkış değeri maliyet olarak tanımlanmıştır. Maliyet minimize edilecek bir şey olduğu için, optimizasyon en aza indirgenir. Bazen bir fonksiyonu en üst düzeye çıkarmak daha mantıklıdır. Bir fonksiyonu en üst düzeye çıkarmak için, çıkışın ön tarafı eksi işaretle çapılarak minimize edilir. Örnek olarak,  $(1 - x^2)$ 'yi belirlenen aralık da  $(-1 \leq x \leq 1)$  maksimize edilmesi aynı aralıktaki  $(x^2 - 1)$  minimize etmekle aynıdır.

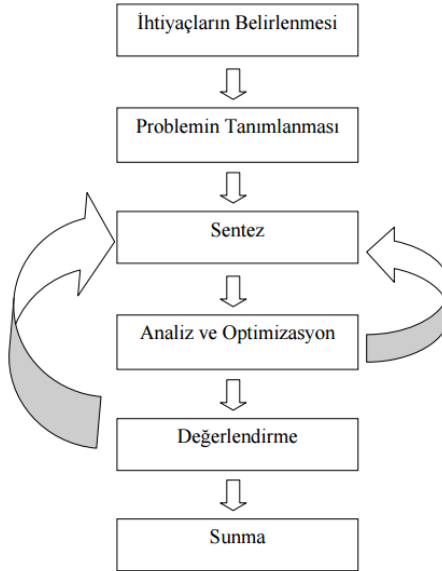
Hayat birçok karardan ve gerçekleşen rastlantısal olaylardan dolayı ilginçtir. Kuantum teorisi, sonsuz sayıda boyut olduğunu ve her bir boyutun bir karara karşılık geldiğini öne sürmektedir. Hayat da doğrusal değildir, bu yüzden karışıklıklarda burada önemli bir rol oynar. İlk durumdaki küçük bir pertürbasyon (bozulma, sapma), çok farklı ve öngörülemeyen bir çözümle sonuçlanabilir. Bu teoriler, doğayı incelerken veya ürünleri tasarlarırken yüksek oranda karmaşıklık olduğunu düşündürmektedir. Bilim, doğanın belirli sınırlı yönlerini temsil etmek için basit modeller geliştirdi. Bu basit ve genellikle doğrusal modellerin çoğu optimize edilmiştir. Gelecekte, bilim adamları ve mühendisler geçmişin çözülemeyen sorunlarını çözmek için optimizasyon, entelektüel araç kutusunda ihtiyaç duyulan temel bir araç olacaktır. Optimizasyon birçok alanda kullanılabileceği gibi özellikle anten alanında birçok çalışma mevcuttur [1-3]. Ayrıca vekil model çalışmaları da son zamanda popüler olmaya başlamıştır [4].

### 3. OPTİMİZASYONUN AŞAMALARI

Optimizasyon algoritmaları altı kategoriye ayrılır (Şekil 2). Bu altı görüşten ya da dallarından hiçbiri karşılıklı olarak ayrıcalıklı değildir. Örneğin, dinamik bir optimizasyon problemi kısıtlanmış ya da kısıtlanmamış olabilir. Ek olarak, bazı değişkenler ayrık ve diğerleri sürekli olabilir. Şekil 3'de bir sistemin tasarım aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2 Optimizasyon algoritmalarının kategorileri



Şekil 3 Bir sistemin tasarım aşamaları

**Deneme yanılma optimizasyonu**, çıkışı üreten süreç hakkında çok fazla şey bilmeden çıkışı etkileyen değişkenleri ayarlama sürecini ifade eder. Basit bir örnek; en iyi görüntü ve ses alımını elde etmek için televizyon anteni tavşan kulakları şeklinde ayarlanır. Bir anten mühendisi, tavşan kulaklarının belirli miktarda bükülme neden diğer bükülmelerden daha iyi bir görüntü aldığını tahmin edebilir. Genellikle deneyiciler bu yaklaşımı (deneme yanılma optimizasyonu) tercih ediyor. Penisilin'in bir antibiyotik olarak keşfi ve iyileştirilmesi gibi birçok büyük keşif, deneme yanılma optimizasyonunun bir sonucudur. Bu optimizasyonun aksine, bir matematiksel formül optimizasyonunda amaç fonksiyonunu tanımlanır. Fonksiyonun çeşitli matematiksel manipülasyonları optimal çözüme yol açar. Teorisyenler bu teorik yaklaşımı severler.

**Tek boyutlu optimizasyonda**, tek bir değişken vardır. Birden fazla değişkeni olan bir problem çok boyutlu optimizasyon gerektirir. Boyutlar arttıkça optimizasyon giderek zorlaşır. Birçok çok boyutlu optimizasyon yaklaşımı, bir dizi tek boyutlu yaklaşımları genelleştirmektedir.

**Dinamik optimizasyon**, çıkışın zamanın bir fonksiyonu olduğu anlamına gelir; statik ise, çıkışın zamandan bağımsız olduğu anlamına gelir. Navigasyon da trafik durumuna bakıldığında bir yerden bir yere giderken en hızlı ve rahat şekilde gidebilmek için birkaç yol vardır. Amaç en iyi rotanın belirlenmesidir. Teorik olarak düşünülürse sorun statiktir ve çözüm bir harita veya bir arabanın kilometre sayacı kullanılarak bulunabilir. Fakat pratikte, bu problem, yollardaki sayısız çeşitlilik nedeniyle basit değildir. En kısa rota mutlaka en hızlı rota olmayabilir. En hızlı rotayı bulmak, çözümü günün saatine, hava durumuna, kazalara vs. bağlı olan dinamik bir sorundur. Sorunu statik problem olarak ele almak en iyi çözüm bulmak için zordur, bununla birlikte zamanın eklenmiş boyutu dinamik problemi çözmeye zorluğunu artırır.

**Optimizasyon**, ayrık veya sürekli değişkenlerle de ayırt edilebilir. Ayrık değişkenler sınırlı sayıda olası değere sahipken, sürekli değişkenler sonsuz sayıda olası değere sahiptir. Bir listedeki bir dizi görevin hangi sırayla yapılacağına karar verilirse, ayrık optimizasyon kullanılır. Ayrık değişkenli optimizasyon, kombinatoriyal optimizasyon olarak da bilinir, çünkü optimum çözüm tüm olası değişkenlerin sonlu havuzundan belirli değişkenler kombinasyonundan oluşur. Bununla birlikte, bir sayı çizgisinde  $f(x)$ 'in minimum değerini bulmaya çalışıyorsak, problemi sürekli olarak görmek daha uygun olacaktır.

**Değişkenler**, genellikle sınırlara veya kısıtlara sahiptir. Kısıtlı optimizasyon, değişken eşitlikler ve eşitsizlikler içeren maliyet fonksiyonundan oluşur. Kısıtsız optimizasyon, değişkenlerin herhangi bir değer almasına izin verir. Kısıtlı bir değişken, değişkenlerin bir dönüşümü ile genellikle kısıtlanmamış bir değişkene dönüşür. Sayısal optimizasyon rutinlerinin çoğu, kısıtlanmamış değişkenlerle en iyi şekilde çalışır.  $-1 \leq x \leq 1$  aralığında  $f(x)$  değerini en aza indirmenin basit kısıtlı örneğini düşünülecek olursa: Değişken  $x$ 'i  $x = \sin(u)$  'ya bırakarak ve  $u$ 'nun herhangi bir değeri için  $f(\sin(u))$  değerini en aza indirerek  $x$ 'i sınırsız bir değişkene dönüştürür. Kısıtlı optimizasyon, değişkenleri lineer denklemler ve doğrusal kısıtlamalar açısından formüle ettiğinde, doğrusal bir program olarak adlandırılır. Maliyet denklemleri veya kısıtlar doğrusal olmadığında, problem doğrusal olmayan bir programlama problemi haline gelir.

**Bazı algoritmalar**, bir başlangıç değişken değerleri kümesinden başlayarak maliyeti en aza indirmeye çalışır. Bu minimum arayıcılar, hızlıdır fakat yerel minimum sınırlara kolayca takılırlar. Bunlar geleneksel optimizasyon algoritmalarıdır ve genellikle matematiksel yöntemlere dayanır. Bir değişken setinden diğerine geçmek, bazı belirleyici basamaklar dizisine dayanmaktadır. Öte yandan, rasgele yöntemler değişken kümeleri bulmak

için bazı olasılık hesaplamaları kullanır. Daha yavaş olma eğilimindedirler, ancak küresel minimum değeri bulmada daha büyük başarıya sahiptirler.

#### 4. TEMEL OPTİMİZASYON YAKLAŞIMLARI

Uygulanabilecek temel optimizasyon yaklaşımlarına birkaç örnek verecek olursak:

- Genetik Algoritma (GA)
- Karınca Koloni Optimizasyonu (ACO)
- Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)
- Suni Arı Kolonisi (ABC)
- Diferansiyel Gelişim Algoritması (DEA)
- Tavlama Benzetimi Algoritması (SA)
- Yerçekimsel Arama Algoritması (GSA)
- Isı Transferi Arama Algoritması (HTS)
- Elektromanyetik Alan Optimizasyonu (EFO)
- Optikten İlhamlanan Optimizasyon (OIO)
- Ağırlıklı Bir Süperpozisyon Çekim Algoritması (WSA)
- Orman Optimizasyon Algoritması (FOA)
- Kasırga Tabanlı Optimizasyon Algoritması (HBOA)
- Kara Delik Optimizasyonu Algoritması (BHOA)
- Su Döngüsü Optimizasyonu Algoritması (WCOA)
- Maksimum-Minimum Karınca Sistemi (AS)
- Yarasa Algoritması (BA)
- Ateş Böceği Algoritması (FA)
- Ağaç Tohumu Algoritması (TSA)
- Yapay Alg Algoritması (AAA)
- Köpekbalığı Koku Alması Algoritması (SOA)
- Guguk Kuşu Optimizasyonu

#### 5. GENETİK ALGORİTMALAR

Genetik algoritma (GA), genetik ve doğal seleksiyon prensiplerine dayalı bir optimizasyon ve arama tekniğidir. Bir genetik algoritma (GA), birçok bireyden oluşan bir popülasyonun, belirlenen seçim kuralları altında, “uygunluğu” en üst düzeye çıkararak bir duruma getirmesine izin ver-

ilir, yani maliyet fonksiyonunun minimize edilmesidir. Yöntem, 1960 ve 1970'ler boyunca John Holland tarafından 1975 yılında geliştirilmiştir ve son olarak, tezi için gaz-boru hattı iletiminin kontrolünü içeren zor bir problemi çözebilen öğrencilerden biri olan David Goldberg tarafından popüler hale getirilmiştir [5]. Bu durum Holland'ın orijinal eseri kitabında özetlenmiştir [6]. Holland şema teoremiyle genetik algoritmalar için teorik bir temel geliştirmeye çalışan ilk kişi oldu. De Jong'un (1975) çalışmasında [7], fonksiyon optimizasyonu için GA'nın yararlılığı gösterilmiş ve optimize edilmiş GA parametrelerini bulmak için ilk ortak çalışma yapılmıştır. Goldberg, başarılı uygulamaları ve yazmış olduğu mükemmel kitabı [5] ile muhtemelen GA'a en fazla katkıda bulunan araştırmacıların başında gelmektedir. Süregelen zaman içerisinde, evrimsel programlamanın birçok versiyonu, çeşitli derecelerde başarı ile denenmiştir.

Bir genetik algoritmanın (GA), avantajlarından bazıları şunlardır:

- Sürekli veya ayrık değişkenlerle optimize edilir
- Türev bilgisi gerektirmez
- Maliyet yüzdesinin geniş bir örneklemeden eşzamanlı arama yapar
- Çok sayıda değişken içeren fırsatlar vardır
- Paralel bilgisayarlar için çok uygundur
- Değişkenleri son derece karmaşık maliyetli yüzeylerle optimize eder, yani yerel bir minimumda takılabilir
- Sadece tek bir çözüm değil, optimum değişkenlerin hepsini sağlar
- Değişkenleri kodlayarak, optimizasyonun kodlanmış değişkenler ile yapılmasını sağlayabilir
- Sayısal olarak oluşturulmuş veriler, deneysel veriler veya analitik fonksiyonlarla çalışır

Bu avantajlar, geleneksel optimizasyon yaklaşımlarının başarısız olduğu durumlarda ilgi çekici ve çarpıcı sonuçlar doğurmaktadır.

Tabii ki, genetik algoritmalar her problemi çözenin en iyi yolu değildir. Örneğin, geleneksel yöntemler sadece birkaç değişkenli kolay bir dışbükey analitik fonksiyonun çözüm bulmak için ayarlanmıştır. Bu gibi durumlarda, matematik temelli yöntemler genetik algoritmayı geride bırakabilir. Genetik algoritma (GA) hâlâ ilk nüfusun maliyetini analiz ederken, matematik temelli yöntemler hızlı bir şekilde minimum bulabilir. Bu problemler için optimizasyon geçmişteki deneyimini kullanmalı ve bu hızlı yöntemleri tercih etmelidir. Ancak, birçok gerçekçi problem bu kategoriye girmemektedir. Ayrıca aşırı zor olmayan problemler için, diğer yöntemlerle çözüm genetik algoritmadan daha hızlı sonuca varabilir. Bir seri bilgi-

sayarda hız fonksiyonu söz konusu olduğunda genetik algoritmaya katkı sağlayan, geniş çözüm grubu verir ve bu çözümlerin her biri değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, paralel bir bilgisayar varsa, her işlemci ayrı bir işlevi aynı anda değerlendirebilir. Böylece genetik algoritma, bu gibi paralel hesaplamalar için optimal olarak uygundur.

Bu kısımda kısaca, sorunları optimize etmek için bir genetik algoritmanın nasıl kullanıldığını göstermektedir. İlerleyen kısımlarda optimal algoritma parametre seçimi ile ilgili bir çalışma örneği sunulurken çalışma sonuçlandırılacaktır.

## 6. OPTİMAL ALGORİTMA PARAMETRE SETİ SEÇİMİ

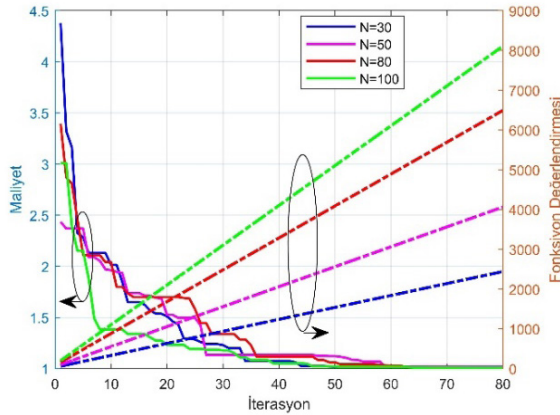
Bir optimizasyonun başarısında öncelik probleme uygun algoritma seçmek olmasına karşın giriş parametrenin doğru atanması da azımsanamayacak derece öneme sahiptir. Bu nedenden ötürü; NSGA-III algoritmasının yazılımcı tarafından açık kaynak olarak paylaşılan 1 amaç fonksiyonlu (objective function) kod [8] içerisinde varsayılan parametreler Maksimum İterasyon = 50, Popülasyon = 50, Çaprazlama Yüzdesi = 0,5 ve Mutasyon Yüzdesi = 0,5 olarak verilmesine karşın, yapılan çalışmada amaç fonksiyonu sayısı 4'e çıkarılarak mevcut parametrelerinde optimum olanını bulmak için bir çalışma yapılmıştır. Değiştirilebilen parametre sayısı 4 olması nedeni ile 2 aşamada en başarılı optimum parametreleri buluyoruz. Optimum algoritma parametre seti seçimi için yapılan denemelerde ( $F_{req} = 1,3$ ,  $V_{inopt}$ ,  $G_{Tmak}$ ,  $V_{outreq} = 1,2$ ) performans dörtlüsü için  $V_{DS} = 2V$ ,  $I_{DS} = 10 \text{ mA}$  ve  $f = 12 \text{ GHz}$  olarak alınmıştır.

### 6.1. OPTİMUM MAKSİMUM İTERASYON VE POPÜLASYON

Öncelikle varsayılan Çaprazlama Yüzdesi = 0,5, Mutasyon Yüzdesi = 0,5 kullanılarak farklı Maksimum İterasyon ve Nüfus ( $N$ ) parametreleri için en iyi, ortalama ve en kötü Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının performans değerlendirmeleri yapıyoruz. Detaylı sonuçlar Çizelge 1'de gösterilmiştir. Daha spesifik olarak ise Şekil 4'de Maksimum İterasyon = 80 için farklı Nüfus parametre ( $N$ ) değerlerinin Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının İterasyona göre değişimi çizdirilmiştir. Çizelge 1'den yola çıkarak gerek minimum gerek ortalama olarak en ideal Maliyete sahip olan Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50 olan sonucu optimum olarak seçmiştir.

**Çizelge 1** Farklı Maksimum iterasyon ve Nüfus ( $N$ ) parametreleri için en iyi, ortalama ve en kötü Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının performans değerlendirmeleri ( $V_{DS} = 2V$  &  $I_{DS} = 10 \text{ mA}$  &  $12 \text{ GHz}$ ) (Çaprazlama Yüzdesi = 0,5, Mutasyon Yüzdesi = 0,5)

Maksimum İterasyon	Nüfus (N)		Maksimum	Minimum	Ortalama
30	30	Maliyet	7,40	1,28	2,30
		FEN	934	934	934
50	30	Maliyet	9,49	1,05	2,19
		FEN	1538	1538	1538
80	30	Maliyet	6,48	1,02	1,26
		FEN	2440	2440	2440
30	50	Maliyet	1,46	1,17	1,30
		FEN	1557	1557	1557
50	50	Maliyet	4,64	1,04	1,80
		FEN	2560	2560	2560
<b>80</b>	<b>50</b>	<b>Maliyet</b>	<b>4,08</b>	<b>1,02</b>	<b>1,48</b>
		<b>FEN</b>	<b>4062</b>	<b>4062</b>	<b>4062</b>
30	80	Maliyet	4,92	1,14	2,79
		FEN	2484	2484	2484
50	80	Maliyet	7,78	1,03	2,08
		FEN	4089	4089	4089
80	80	Maliyet	4,19	1,00	1,39
		FEN	6491	6491	6491
30	100	Maliyet	14,94	1,16	3,78
		FEN	3106	3106	3106
50	100	Maliyet	5,22	1,03	1,94
		FEN	5111	5111	5111
80	100	Maliyet	4,04	1,01	1,49
		FEN	8106	8106	8106



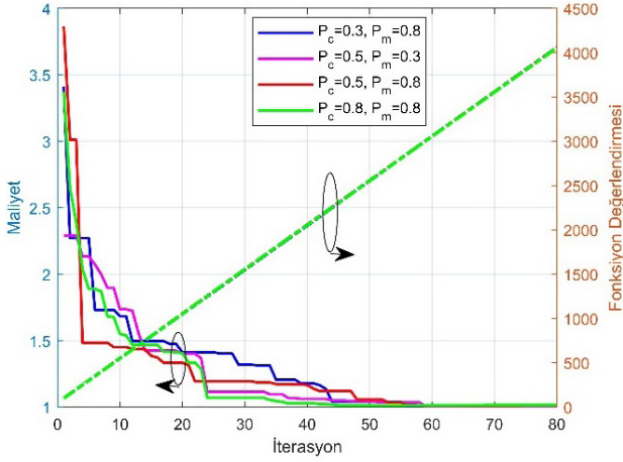
Şekil 4 Farklı Nüfus (N) parametreleri için Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının İterasyona göre değişimi ( $V_{DS} = 2V$  &  $I_{DS} = 10\text{ mA}$  &  $12\text{ GHz}$ ) (Maksimum İterasyon = 80, Çaprazlama Yüzdesi = 0,5, Mutasyon Yüzdesi = 0,5)

## 6.2. Optimum Mutasyon ve Çaprazlama Yüzdesi

Bir önceki kısımda optimum olarak seçilen Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50 parametreleri kullanılarak farklı Çaprazlama Yüzdesi ( $P_c$ ) ve Mutasyon Yüzdesi ( $P_m$ ) değerleri için en iyi, ortalama ve en kötü Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Detaylı sonuçlar Çizelge 2’de gösterilmiştir. Daha spesifik olarak ise Şekil 5’de Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50 için farklı Çaprazlama Yüzdesi ( $P_c$ ) ve Mutasyon Yüzdesi ( $P_m$ ) parametreleri değerlerinin Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının İterasyona göre değişimi çizdirilmiştir. Çizelge 2’den yola çıkarak gerek minimum gerek ortalama olarak en ideal Maliyete sahip olan Çaprazlama Yüzdesi = 0,3, Mutasyon Yüzdesi = 0,8 olan sonucu optimum olarak seçilmiştir.

**Çizelge 2** Farklı Çaprazlama Yüzdesi ( $P_c$ ) ve Mutasyon Yüzdesi ( $P_m$ ) parametreleri için en iyi, ortalama ve en kötü Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının performans değerlendirmeleri ( $V_{DS} = 2V$  &  $I_{DS} = 10$  mA & 12 GHz) (Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50)

Çaprazlama Yüzdesi	Mutasyon Yüzdesi		Maksimum	Minimum	Ortalama
0.3	0.3	Maliyet	9,15	1,04	1,42
		FEN	4062	4062	4062
0.3	0.5	Maliyet	5,40	1,03	2,05
		FEN	4063	4063	4063
<b>0.3</b>	<b>0.8</b>	<b>Maliyet</b>	<b>3,97</b>	<b>1,01</b>	<b>1,21</b>
		<b>FEN</b>	<b>4057</b>	<b>4057</b>	<b>4057</b>
0.5	0.3	Maliyet	4,21	1,01	1,12
		FEN	4060	4060	4060
0.5	0.5	Maliyet	4,18	1,01	1,34
		FEN	4059	4059	4059
0.5	0.8	Maliyet	4,09	1,01	1,17
		FEN	4057	4057	4057
0.8	0.3	Maliyet	4,12	1,03	1,29
		FEN	4062	4062	4062
0.8	0.5	Maliyet	15,90	1,01	1,33
		FEN	4054	4054	4054
0.8	0.8	Maliyet	4,47	1,01	1,12
		FEN	4055	4055	4055



Şekil 5 Farklı Çaprazlama Yüzdesi ( $P_c$ ) ve Mutasyon Yüzdesi ( $P_m$ ) Parametreleri için Maliyet ve Fonksiyon Değerlendirme Numarasının İterasyona göre değişimi ( $V_{DS} = 2V$  &  $I_{DS} = 10 mA$  &  $12 GHz$ ) (Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50)

Böylelikle NSGA-III algoritmasının 4 giriş parametresi için optimum; Maksimum İterasyon = 80, Popülasyon = 50, Çaprazlama Yüzdesi = 0,3 ve Mutasyon Yüzdesi = 0,8 olarak seçilmiştir.

### Sonuç

Çıkarılan çizelge ve şekillerde de açıkça görüleceği üzere algoritmanın varsayılan parametrelerinin en optimum parametreler olmadığı ve her problem için ayrı ayrı denenerek seçilmesi gerektiği sonucuna bu çalışma ile ulaşılmış bulunuyoruz. Ayrıca doğru parametre seçiminin sonuçları derinden etkileyebileceği görülmektedir.

**KAYNAKÇA**

3. Mahouti, P., Kızılçay, A., Tari, O., Belen, A., Belen, M. A., & Çalışkan, A., (2021). Design Optimization of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna using Artificial Intelligence. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol.36, no.12, 1594-1601.
4. Piltan, O. C., Kızılçay, A., Belen, M. A., & Mahouti, P., (2023). Data driven surrogate modeling of horn antennas for optimal determination of radiation pattern and size using deep learning. *Microwave and Optical Technology Letters*.
5. Mahouti, P., Kızılçay, A., Tari, O., Belen, A., & Belen, M. A., (2021). Design Optimization of Ultra-Wide Band Vivaldi Antenna Using Artificial Intelligence. *International Symposium of the Applied-Computational-Electromagnetics-Society (ACES), ELECTR NETWORK*
6. Yurt, R., Torpi, H., Kızılçay, A., Koziel, S., Pietrenko-Dabrowska, A., & MAHOUTİ, P., (2023). Buried object characterization by data-driven surrogates and regression-enabled hyperbolic signature extraction. *Scientific Reports*, vol.13, no.1.
7. Goldberg, D.E., (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, 0201157675, Addison-Wesley Pub. Co., Reading.
8. Holland, J.H., (1989). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial*, 0262082136, MIT Press, Cambridge.
9. Jong, D. ve Alan, K., (1975). "An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems", *Dissertation Abstracts International*, 36(10): 5140B.
10. Yarpiz, (2017). <http://yarpiz.com/456/ypeal26-nsga3>, Home\Multiobjective Optimization\NSGA-III: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, the Third Version.



# FAZ GEÇİŞ DAVRANIŞIYLA VO<sub>2</sub> İÇERİKLİ TERMOKROMİK CAM KAPLAMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Lale CİVAN<sup>1</sup>*

*Semra KURAMA<sup>2</sup>*

---

1 Dr., Lale CİVAN, Eskisehir Technical University, Department of Materials Science and Engineering, Eskisehir, Turkey, lalecivan@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6749-7398

2 Prof. Dr., Semra KURAMA, Eskisehir Technical University, Department of Materials Science and Engineering, Eskisehir, Turkey, skurama@eskisehir.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-7554-3419

## GİRİŞ

Enerji tüketimi hem küresel çevre açısından hem de insanların yaşamları için acil bir durum haline gelmiştir. Enerji tüketimindeki artış, tasarrufu son derece değerli hale getirdiğinden güneş enerjisinden yararlanarak enerji tasarruflu binaların yapımına yoğun bir ilgi bulunmaktadır. Enerji tüketimini azaltmak için cam yüzeylerin ısı yalıtım özelliklerini artıracak yeni malzemeler geliştirilmelidir. Evlerdeki ısı rahatlık için büyük oranda enerji harcanması, konutlarda camların en performansı düşük bileşenlerden biri olarak görülmesi akıllı pencerelerle ilgili araştırmaları değerli hale getirmiştir. Termokromik camlar enerji tasarrufuna katkı sağlayan cam sistemi olarak geliştirilmiş olup güneş ışığı kazanımlarını düzenleyebilir ve enerji tüketiminde önemli bir azalma sağlayabilir. Güneş ışınımının akıllı düzenlemesi pencere optik özelliklerinin değişimiyle birlikte enerji tasarrufu ve enerji verimliliğine katkıda bulunur. Kışın ısı kazanımları artırıp yazın azaltan bu camların enerji verimliliği elektrik, ısınma, soğutma giderlerini ve sera gazı emisyonlarını düşürür. Literatür incelendiğinde pencerelerin termal performansını iyileştiren termokromik camlarda yaygın olarak vanadyum dioksit ( $VO_2$ ) kullanımı dikkat çekmektedir. Vanadyum dioksit, monoklinik  $VO_2$ 'den (M) rutil  $VO_2$ 'ye (R) yapısal faz geçişine, bunun tam tersine dayanan termokromik özellikler sergiler.  $VO_2$  en çok kullanılan termokromik malzemedir ve yarı iletken metale faz geçişi üzerine kızılötesinde saydamdan yansıtma dikkat çeken optik değişiklik gösterir. Bu bölümde,  $VO_2$  içerikli termokromik cam kaplamalardaki çalışmaların bir özeti sunulmuştur.

## GELİŞME

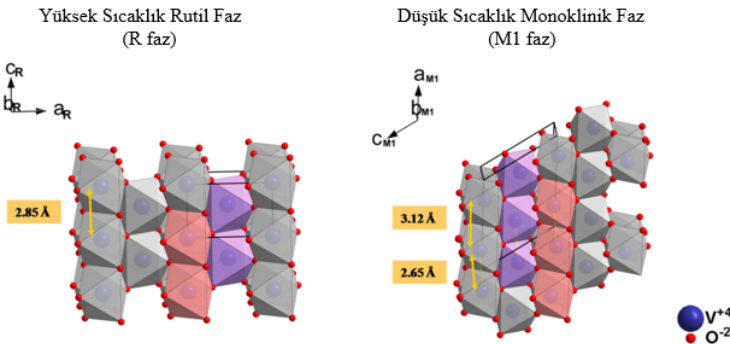
Termokromizm, malzemelerin sıcaklık uyarana yanıt olarak renklerini değiştirebildiği bir özellik olup termokromik malzemelerin enerji verimliliği uygulamalarında kullanımı dikkat çekmiştir (Hakami vd., 2022). Termokromik pencere teknolojileri, binaların iç mekanlarında güneş ışınlarının akıllı kontrolüyle birlikte enerji tasarrufu performansını artırır (Aburas vd., 2021). Diğer bina bileşenleri ile karşılaştırıldığında, pencerelerin yalıtım verimi çok daha zayıftır (Mehdizadeh-Rad vd., 2022). Sanayileşme ve ekonomik büyümenin bir sonucu olarak, enerji tüketimindeki artış, enerji tasarrufu stratejilerinin geliştirilmesinde çok dikkat çeken küresel bir konu haline dönmüştür (Qu vd., 2019). Yapılarda görülen enerji tüketimi nüfusun büyümesi ve buna bağlı enerji tüketimi ile birlikte artış gösterecektir (J. Zhou vd., 2013). Enerji tüketimindeki kademeli artış ve buna eşlik eden sanayileşme artışı, enerji tasarrufu ve enerji hasadı stratejilerinin uygulanmasını gerekli kılmıştır. Bu yüzden, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından tam anlamıyla yararlanarak sürdürülebilir enerji tasarruflu yapılar inşa etmeye yoğun bir talep bulunmaktadır (Arnesano vd., 2021). Binaların yapısal bileşenleri

ile kıyaslandığında, pencere, binadaki enerji kaybının ~%60'ından sorumlu olduğu için en az enerji performanslı kısmı olarak kabul edilir (G. Chen vd., 2023; Cuce & Riffat, 2015; Ding, Duan, Yang, Xiong, & Guo, 2023; Y. Zhou vd., 2020). Pencerelere uygulanan kromojenik malzemeler enerji tüketimini azaltmanın etkili bir yöntemi olmakla birlikte termokromik kaplamalar kızılötesi radyasyonun seçici modülasyonu dolayısıyla enerji verimliliği açısından avantajlar sunar (T. Chang vd., 2018). Bilindiği üzere termokromik malzemelere dayalı akıllı pencerelerin ortam sıcaklığına tepki verebilmesi ve odaya giren güneş ışınımını akıllıca düzenleyebilmesi nedeniyle enerji harcanmasını ve klima ihtiyacını önemli ölçüde azaltması beklenir (J. Kang vd., 2022; Ke vd., 2019). Termokromik cam ve faz değiştiren malzemeler, sıcaklığa bağlı olarak optik ve termal özelliklerini değiştirebildiklerinden bina kaplamalarına uygun yapıdadırlar (Q. Jin, Long, & Liang, 2022). Yüksek enerji verimliliğine sahip termokromik pencere geliştirmenin zorluğu ışık geçirgenliği veya estetik görünümünden ödün verilmesini gerektirir. Bugüne kadar termokromik akıllı pencereler için uygulanan birçok malzeme arasında en çok çalışılanlar vanadyum dioksit ( $VO_2$ ) içeriklidir (Ke vd., 2022). Termokromik cam malzemeler ısıl değişikliklere bağlı olarak şeffaf halden opak hale tersinir şekilde dönüşebilme yeteneklerinden dolayı gün geçtikçe daha fazla öneme sahip olmuştur.  $VO_2$ , kendine has faz geçişi nedeniyle enerji tasarrufuna yönelik en fazla kullanılan malzemeler arasındadır (Cui vd., 2018; S. H. Wu, Cossio, Braun, Wu, & Yu, 2023).  $VO_2$ 'nin faz geçişi sırasında optik ve elektriksel özelliklerinde değişiklik gözlenir (X. Guo vd., 2022; Soltani, Chaker, Haddad, & Kruzelecky, 2008). Metal-yalıtkan geçişi ise ilk olarak 1959 yılında F. J. Morin tarafından bulunmuştur (Alvarez-Guerrero, Ordonez-Miranda, de Coss, & Alvarado-Gil, 2022; Chaib, Zouini, & Tahiri, 2022; Hiroi, 2015; Z. Zhao vd., 2021).  $VO_2$ ,  $68^\circ C$ 'de tersine çevrilebilir monoklinik (M) fazdan rutil (R) faza geçiş özelliğiyle camlarda enerji tasarrufuna yönelik uygulamalarda gelecek vadeden malzemeler arasındadır. Bu faz geçişi nedeniyle renk değiştiren  $VO_2$ , termokromik bir malzeme olarak özellikle ilgi çekicidir (Q. Chang vd., 2021; Cui vd., 2018; Schofield vd., 2022; R. Sun vd., 2021; Y. Zhang vd., 2021). Enerji verimliliğinin önemi ve klima, kombi kullanımının çevreyle ilgili çeşitli problemlere sebep olmasından dolayı enerjiyle ilgili araştırmalar gün geçtikçe daha da önem kazanmıştır. Bu bağlamda enerjinin azaltılması amacıyla hazırlanan  $VO_2$  içerikli akıllı termokromik camlar en geniş kullanım alanına sahiptir (Pan vd., 2017). Vanadyum oksit kaplamalarına ilişkin kısa bir literatür gözden geçirildiğinde, işleme koşullarının ince filmlerin yapısını ve morfolojisini ve daha sonra film özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Tavlama sıcaklığı ve atmosferi, film kalınlığı, tane boyutu ve morfolojisi ayrıntılı olarak incelenmiş ve yapı-özellik ilişkisine ilişkin sonuçlar çıkarılmıştır (Donev, Lopez, Feldman, & Haglund Jr, 2009; Dultsev, Vasilieva, Maroshina, & Pokrovsky, 2006; Fu, Polity, Volbers, & Meyer, 2006; Guinneton,

Sauques, Valmalette, Cros, & Gavarri, 2001; L. Kang vd., 2010; Klimov vd., 2002; Lopez, Haynes, Boatner, Feldman, & Haglund Jr, 2002; Suh, Lopez, Feldman, & Haglund Jr, 2004; Whittaker, Patridge, & Banerjee, 2011; Z. Zhang, Gao, Chen, vd., 2010).

### Monoklinik ve Rutil Fazı

68°C'de geri çevrilebilir yarı iletken metal faz geçiş karakteristiği gösteren termokromik bir malzeme olan VO<sub>2</sub> düşük sıcaklıkta monoklinik yapıda iken daha yüksek sıcaklıkta rutil yapıdadır. 68°C'nin altında monoklinik yapıya sahip olan VO<sub>2</sub> yüksek IR iletimi sağlayan yarı iletken özellikler sergilerken bu sıcaklığın üstünde NIR bölgesinde yüksek yansımaya yol açan tetragonal rutil yapısına dönüşür. Şekil 1'de monoklinik ve rutil fazlarının kristal yapıları verilmektedir (Leroy, Bessaudou, Cosset, & Crunteanu, 2012; W. Li, Ji, Qian, & Jin, 2015; Y. Wu vd., 2015; Xiao vd., 2014; Zhu vd., 2018). Monoklinik VO<sub>2</sub>'den (M) rutil VO<sub>2</sub>'ye (R) tersinir yarı iletken-metal geçişine (SMT) uğrayan VO<sub>2</sub> benzersiz geçiş özelliğine sahiptir (T. Chang vd., 2018). Kızılötesi yansıtımda değişiklik göstererek ısı kazanımını sınırlayabilen yapısı ve metalik durumda ışık geçirgenliğinde azalma olmadan kızılötesi geçirgenlikte ani düşüş nedeniyle termokromik cam yapımında kullanılır (Kolenatý vd., 2020; Warwick & Binions, 2014). Isıl uyarılmayla metal-yalıtkan geçiş (MIT) sergileyen VO<sub>2</sub> yakın kızılötesi spektral aralıkta optik geçirgenlikte önemli bir değişiklik gösterdiğinden enerji verimli cam kaplama uygulamaları için uygundur (Shen vd., 2021). VO<sub>2</sub>'nin sıcaklık değişimiyle birlikte büyük optik özellik değişikliklerini kullanan akıllı cam kaplamalar yazın yüksek sıcaklıklarda güneş ısısı ışınımını yansıtırken soğuk kış mevsiminde yakın kızılötesi ışığı geçirerek enerji tasarrufuna katkı sağlar (B. Li vd., 2020; Salamati, Kamyabjou, Mohamadi, Taghizade, & Kowsari, 2019; Zomaya, Xu, Grohe, Mittler, & Charpentier, 2019). Ancak VO<sub>2</sub> içerikli cam kaplamaların pratik uygulamalarında çok sayıda sorunla karşılaşmak mümkündür (Shen vd., 2021).



Şekil 1. VO<sub>2</sub>'nin (a) Monoklinik (b) Tetragonal rutil yapıları (Y. Wu vd., 2015)

Yapısal faz geçişine (SPT) birinci dereceden MIT eşlik etmesinin nedeni  $\text{VO}_2$  (M) yarı iletken ve  $\text{VO}_2$  (R) elektrik iletkeni olmasıdır.  $\text{VO}_2$ (R)'den  $\text{VO}_2$ (M)'ye geçiş esnasında, Goodenough teorilerinden zikzak yapının bozulması,  $\pi^*$  bandında Fermi enerjisinin üzerinde bir kaymaya yol açtığından bant aralığında 0,7 eV'den (metalik) 2,5 eV'ye (yarı iletken) bir artış sağlar.  $\text{VO}_2$  de gözlenen bu faz geçişleri enerji verimliliği sağlayan cam kaplamalar için son derece etkileyicidir. Yüksek sıcaklıklarda metalik tetragonal fazda bulunan  $\text{VO}_2$  güneşin kızılötesi radyasyonu (IR) ışığı bloke ederken yarı iletken özelliklerinden dolayı  $\text{VO}_2$  (M) düşük sıcaklıkta IR radyasyonu açısından yüksek iletme sahiptir (Calvi vd., 2021). İyi bilinen Mott yalıtkanı olarak ta  $\text{VO}_2$  geçiş sıcaklığının altında kızılötesi-saydam durumdan üstündeki kızılötesi önleme haline akıllı optik geçiş sağlar (Ho vd., 2019). Temelde  $\text{VO}_2$ 'nin faz dönüşüm mekanizmasını açıklayan iki model bulunmaktadır. Birinci Peierls modelinde faz geçişi elektronlar ve fononlardaki etkileşim açısından tanımlanarak yapısal olarak yönlendirilir. Elektron-fonon etkileşiminden kaynaklanan Peierls geçişinde Tc'nin altında rutil yapısının c eksenini boyunca V-V dimerler meydana gelir. Bu modelde yapısal bozulmalar tek başına yalıtım fazını uyarabilir. İkinci elektronları lokalize etmek için kullanılan yük odaklı Mott-Hubbard modeli yarı iletken SMT'yi elektron-elektron korelasyonu açısından tanımlar.  $\text{VO}_2$ 'deki faz geçişini tanımlamada üçüncü mekanizma olarak ise kafes distorsiyonu ve Coulomb korelasyonunun birleşik etkisine dayanan Peierls ve Mott geçişlerinin kombinasyonu verilmektedir (Lin & Zhang, 2019; Outón vd., 2022; Soltani, Bah, Karmouch, Gaidi, & Vallée, 2019; Wen vd., 2021; Zou vd., 2021).

### Optik özelliklerin hesaplanarak değerlendirilmesi

Akıllı pencerelerde  $\text{VO}_2$ 'nin 380-780 nm dalga boyu aralığındaki ışık geçirgenliği ( $T_{\text{lum}}$ ) ve güneş enerjisi geçirgenliği ( $T_{\text{sol}}$ ) aşağıdaki integral denklemleriyle hesaplanır. Aşağıdaki denklemlerle ifade edilen güneş enerjisi modülasyon yeteneği ( $\Delta T_{\text{sol}}$ ), enerji tasarrufu kapasitesinin tespitinde önemlidir.  $T_{\text{sol}}$ 'ün düşük ve yüksek sıcaklık değerleri ise monoklinik ve rutil fazda  $\text{VO}_2$  filmlerinin güneş enerjisi geçirgenliğini ifade etmektedir (J. Kim & Paik, 2021; M. Li vd., 2023; J. Zhao, Chen, Hao, Mi, & Zhou, 2022).

$$T_{\text{lum}} = \int \Phi_{\text{lum}}(\lambda) T d\lambda / \int \Phi_{\text{lum}}(\lambda) d\lambda, (380-780 \text{ nm}) \quad (1)$$

$$T_{\text{sol}} = \int \Phi_{\text{sol}}(\lambda) T d\lambda / \int \Phi_{\text{sol}}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{sol}} = T_{\text{sol, düşük sıcaklık}} - T_{\text{sol, yüksek sıcaklık}} \quad (3)$$

Burada  $T(\lambda)$  numunenin  $\lambda$  dalga boyundaki geçirgenliğini,  $\Phi_{\text{lum}}$  foto-pik görüş için standart ışık verimliliği işlevini,  $\Phi_{\text{sol}}(\lambda)$  güneş radyasyonu spektrumunu göstermektedir (J. Kim & Paik, 2021; M. Li vd., 2023; J. Zhao vd., 2022).

Akıllı camların büyük ölçekli ve pratik uygulamalarda kullanılabilmesini sağlamak için VO<sub>2</sub> içerikli kaplamaların geçiş sıcaklığı oda sıcaklığına yakın sıcaklıklara düşürülmelidir. Ayrıca enerji tasarrufu açısından T<sub>lum</sub> ve ΔT<sub>sol</sub> değerleri sırasıyla %40'tan ve %10'dan yüksek olmalıdır (J. Kim & Paik, 2021; L. Zhao vd., 2014). VO<sub>2</sub> bazlı kaplamalar yarı iletken ve metalik durumlarda kısa dalga boyu aralığındaki absorpsiyondan dolayı daima düşük ışık geçirgenliği sorunuyla karşı karşıyadır. Işık geçirgenliği kaplama kalınlığıyla da ilişkili olup güneş modülasyon yeteneği çoğunlukla %10'dan düşük olduğundan enerji tasarrufu için yeterince verimli sayılmaz (T.-C. Chang vd., 2018). Bu bağlamda termokromik cam kaplamaların geçiş sıcaklığı ortam sıcaklığına düşürülmeli T<sub>lum</sub> ve ΔT<sub>sol</sub> belirtilen değerler çerçevesinde enerji verimliliği sağlayacak şekilde yüksek tutulmalıdır. Katkılandırma yapılmasıyla birlikte kaplamaların özellikleri ayarlanabilir (Shen vd., 2021).

### VO<sub>2</sub>'nin Kullanım Alanları

Tersine çevrilebilen faz geçişi optik ve elektriksel özelliklerde değişikliklere yol açtığından dolayı VO<sub>2</sub>, termal veya optik anahtarlama cihazları, gaz sensörleri, optik modülatörler, dirençli anahtarlama elemanları, akıllı pencereler, termal röleler, ısı sensörleri, optik depolama ortamı, holografik kayıt ortamı, değişken yansıtıcı aynalar, ışık modülatörleri, düz panel ekranlar, kızıl ötesi sensörler ve kızılötesi bolometre gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu uygulamaların ötesinde akıllı pencerelerde VO<sub>2</sub> kullanılması, yaz aylarında güneş radyasyonunun kızılötesi bileşenini bloke eder, soğuk havalarda kızılötesi ışın geçmesine izin verir (H.-K. Chen, Hung, Yang, & Wang, 2004; L. Kang, Gao, & Luo, 2009; Y. Liu vd., 2014; Suzuki, Yamaguchi, & Miyazaki, 2007; Warwick, Ridley, & Binions, 2016). VO<sub>2</sub> içerikli termokromik malzemelerle yapılmış pencereler düşük sıcaklıkta kızılötesi ışığa karşı neredeyse şeffaf monoklinik fazda ve yüksek sıcaklıkta oldukça yansıtıcı olan rutil faz geçişiyle güneşten gelen ışınları akıllı bir şekilde düzenleyebildiğinden pencere kaplamalarında tercih edilir (G. Sun vd., 2016; Y. Zhao vd., 2013). VO<sub>2</sub>'nin ilginç bir akıllı malzeme olması değişik sıcaklıklarda tersine çevrilebilir fiziksel özelliklerinde görülen değişiklik, aktüatör, nano ışın, bellek cihazları ve fotodedektörler gibi yeni cihazlar açısından üstün bir aday olmasını da sağlar (H. Hu vd., 2022). Çarpıcı özellikleri, malzemeyi, oksit esaslı elektronik veya algılama cihazları uygulamaları için de ilginç kılmaktadır (H.-T. Kim vd., 2004; Qazilbash vd., 2007; Strelcov, Lilach, & Kolmakov, 2009).

### Kaplama Yöntemleri

VO<sub>2</sub> ince filmlerin yüksek verimle biriktirilmesinde fiziksel buhar birikimi (PVD), darbeli lazer biriktirme, kimyasal buhar birikimi (CVD), reaktif darbeli lazer biriktirme (RPLD), vakumla buharlaştırma biriktirme, reaktif püskürtme, elektron ışını buharlaştırma ve sol-jel yöntemini

de kapsayan birçok yöntem bulunmaktadır. Sol-jele kıyasla diğer kaplama yöntemleri karmaşık biriktirme işlemleri ve pahalı ekipmanlar gerektirdiğinden pratik uygulamalarını büyük ölçüde sınırlar (Binions, Hyett, Piccirillo, & Parkin, 2007; Lee & Cho, 2000; Mlyuka, Niklasson, & Granqvist, 2009a; Sohn vd., 2007; Wang vd., 2016). Bu kaplama yöntemleri termokromik VO<sub>2</sub>'nin fonksiyonelliğinde iyi neticeler doğurmasına rağmen oldukça maliyetli bir bütçe gerektirmesi, özel ekipman kullanma zorunluluğu ve ileri teknolojiye ihtiyaç duyulması kullanılmalarını sınırlandıran etkenlerdir (L. Kang vd., 2009; Tsige, Ganesh, Mensur, & Tesfaye, 2021). Bu teknikler arasında, sol-jel ise karmaşık şekilli yüzeylerde ve organik-i-norganik çoklu kaplama yapılabilmesi, katkılama yaparken başka elementlerin ilavesinin kolaylığı, düşük sentez sıcaklığının yanında maliyet gibi avantajlarından dolayı sıkça kullanılan bir yöntemdir (J. Wu vd., 2013).

### Uygunabilirliğini Kısıtlayan Etkenler

Literatürdeki çalışmaların çoğunluğunun VO<sub>2</sub> içerikli olmasına rağmen kaplamaların istenen güzel renkte olmaması, uzun vadeli istikrar, yüksek yayma oranı, dar olmayan sıcaklık histerezisi, spektrumun uzak kızılötesi bölgesine düşük yansıma gibi pratik uygulamalarda kullanılabilirliğini engelleyen birçok faktör bulunmaktadır. Bütün bu sorunlar katkılama, ilave katman ve nano yapı kullanma, kalınlığın değiştirilmesi, pürüzlülük kontrolü veya hazırlık aşamasının ayarlanması gibi düzenlemelerle kısmi olarak ele alınabilir. Bu filmler iyileştirme taktiklerine ihtiyaç duymaktadır (J. Hu, 2016). VO<sub>2</sub>, kendi kendini düzenleyen doğası gereği gelecekte kullanılacak akıllı pencere uygulamalarında olası aday olmasına rağmen ticarileştirilmeden önce birçok sorunla başa çıkılması gerekmektedir. Birçok çalışmaya konu olan düşük ışık geçirgenliğinin yanı sıra çekici olmayan sarımsı renk tonu, yüksek geçiş sıcaklığı, 450°C'nin üzerinde çökme sıcaklığı ve düşük çevresel kararlılık uygulamayı sınırlandıran dezavantajlar arasındadır (Baloukas, Loquai, & Martinu, 2018). VO<sub>2</sub> içerikli kaplamaların büyük ölçekte üretilmesine yönelik çok çaba harcanmasına karşın bu süreci sınırlandıran yukarıda sıralanan dezavantajlar bulunmaktadır (Qu vd., 2019). Son zamanlarda VO<sub>2</sub> içerikli termokromik filmler ilgi odağı olmasına karşın uygulamalarını sınırlandıran diğer etkenler yüksek üretim enerji tüketimi, zayıf dayanıklılık ve kısa vadeli kararlılıktır (Zong vd., 2022). Binalarda uygulamaları kısıtlayan başka nedenler yüksek faz geçiş sıcaklığı, yüksek sıcaklıkta hazırlama gerekliliği,  $\Delta T_{sol}$  değerinin düşük olması, düşük çevresel kararlılık ve ışık geçirgenliği, hidrojel sızıntı problemi ve geçiş süresinin uzun olması olarak sıralanabilir (Y. Du vd., 2022; Kolenatý vd., 2020). Yüksek sıcaklıkta biriktirme gerekliliğinden dolayı bu filmlerin esnek altlıklara kaplanmasında büyük bir güçlük oluştururken sadece SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> gibi sert altlıklara kaplama yapılabilir (T. Chang vd., 2021). Kristal malzeme oluştururken kaplama yapılan sıcaklığın 400°C üzerinde olması ve VO<sub>2</sub> sentezinde oksijen oranının hassas olarak ayarlanması

zorunlulukları endüstriyel uygulamaları kısıtlayan etkenlerdir (Loquai, 2017). Karşılaşılan bir diğer sorun düşük ışık geçirgenliği olmakla birlikte kalınlığın azaltılması şeffaflığı arttırmasına rağmen her zaman termokromik özelliklerin bozulmasına neden olmaktadır (Xu, Jin, Tazawa, & Yoshimura, 2004).

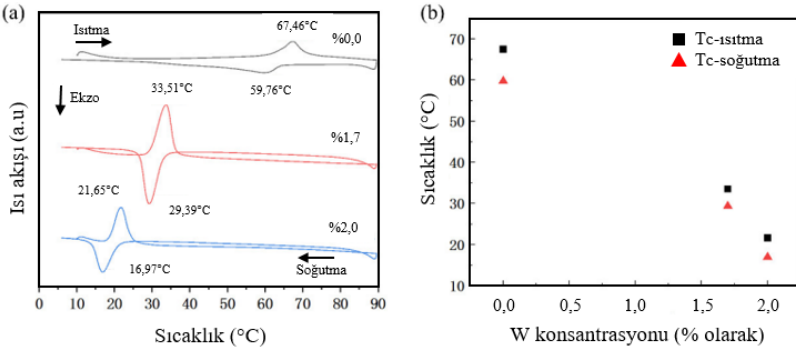
VO<sub>2</sub> termokromik akıllı pencerelerde kullanılabilir önemli bir aday olmasına karşın 68°C olan yüksek faz geçiş sıcaklığı dolayısıyla pratik kullanım için uygun olmayıp yaygın uygulaması bulunmamaktadır (Lu vd., 2017; Xie vd., 2021). Literatürdeki çalışmalarda geçiş sıcaklığının yerel iklime bağlı olarak değişiklik göstermesine rağmen 20-25°C civarındaki geçiş sıcaklığının ideal olduğu bildirilmiştir (Saeli, Piccirillo, Parkin, Binions, & Ridley, 2010; Warwick, Ridley, & Binions, 2015). VO<sub>2</sub> içerikli termokromik kaplamaların laboratuvarından ticari uygulamaya geçişinde rastlanan diğer problemler uzun süre çevresel istikrar, optik özellikler ve seri üretim olarak sıralanabilir (T.-C. Chang vd., 2018). Ayrıca katı-katı geçişinde düşük gizli ısıya sahip VO<sub>2</sub> ısı depolama gereken yerlerde kullanılamamaktadır (R. Guo vd., 2022). VO<sub>2</sub>'nin doğal kolay oksitleyici etkisinden dolayı bu filmlerin indirgeyici veya oksitleyici atmosferde histerezis genişliği, ışık geçirgenliği ve faz geçiş sıcaklığını ayarlamak güçleşmektedir. Nemli olan yerlerde, yüksek sıcaklık ve atmosfere bağlı olarak vanadyumun oksidasyon sayısı +2'den +5'e değişiklik göstermektedir (Pan vd., 2017). VO<sub>2</sub> havayla uzun zaman temas ettiğinde oksitlenerek V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>'e dönüşebilir (Wen vd., 2021). Buna ek olarak VO<sub>2</sub> oksijence zengin atmosferde ısı işleme tabi tutulduğunda V<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, terminal oksit V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> veya V<sub>6</sub>O<sub>13</sub> gibi daha yüksek değerli oksitlere oksitlenme olur. Yeterli olmayan oksidasyon dayanıklılığı bu camlar için lazım olan ısı işlemlere de engel olur. Bu sorunun ortadan kaldırılması amacıyla VO<sub>2</sub> filmleri üzerine TiO<sub>2</sub> veya ZrO<sub>2</sub> gibi oksit tabakaları kaplanır. Filmlerin kızılötesine yakın (NIR) anahtarlama verimliliği yok olduğundan oksitlenme dayanıklılığı artırılmalıdır (Z. Zhang, Gao, Kang, Du, & Luo, 2010). Literatürde VO<sub>2</sub> içerikli kaplamaların ticari uygulamalarda kullanımına imkan sağlamayan problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla yansıma önleyici kaplama, katkılama ve tampon katman yapımı gibi konular araştırılmıştır (Gagaoudakis, Aperathitis, Michail, Kiriakidis, & Binas, 2021).

### **Faz Geçiş Sıcaklığının Düşürülmesi, T<sub>lum</sub> ve ΔT<sub>sol</sub> Değerlerinin İyileştirilmesiyle İlgili Çalışmalar**

Katkılama yapmak literatürde VO<sub>2</sub> içerikli termokromik kaplamaların faz geçiş sıcaklığını düşürmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir (Dietrich vd., 2015; Gu vd., 2015). Bu filmlerin faz geçiş sıcaklığının yüksek olması pratik kullanım için uygun olmadığından dolayı bu sıcaklık oda sıcaklıklarına yakın değerlere düşürülmelidir (Liang vd., 2017). VO<sub>2</sub>'nin faz geçiş sıcaklığını düşürmek amacıyla W<sup>6+</sup>, Mo<sup>6+</sup> ve Nb<sup>5+</sup> yüksek değerlikli metal iyonlarla katkılama yapılır (Guan vd., 2019; Ji vd., 2018; Qian, Li, Tian, Liu, & Zhao, 2022). VO<sub>2</sub> filmlerin ticari uygulamalarda kullanılabilir olması için faz geçiş

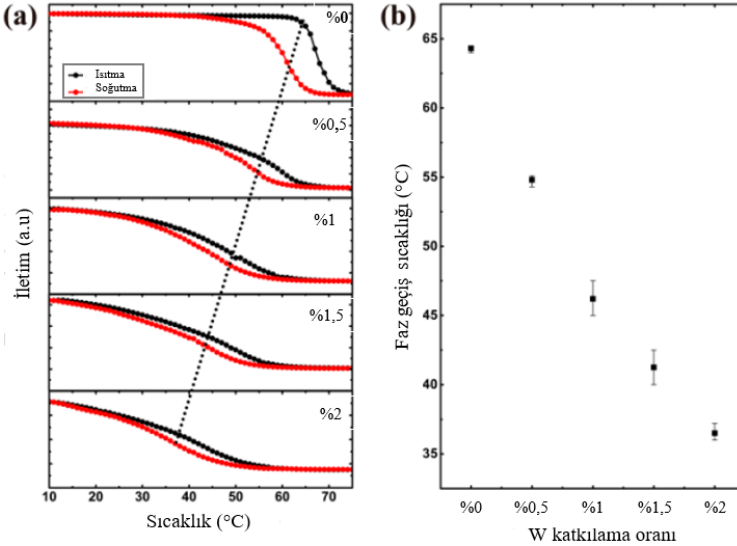
sıcaklığının düşürülmesi yanında  $T_{lum}$  ve  $\Delta T_{sol}$  değerinin aynı anda iyileştirilerek sırasıyla %40 ve %10'a artırılması gerekir (Guo, Wang, Jain, Fu, & Chen, 2021). Bu üç faktörün dengede tutulması sorun oluşturmaktadır (Zhu, Zhang, & Qi, 2023).  $T_{lum}$  ve  $\Delta T_{sol}$  değerinin aynı anda iyileştirilmesinin zorluğu nedeniyle araştırmacılar  $VO_2$  filminin özelliklerini iyileştirmek amacıyla cam altlık üzerine tampon tabakanın yapımını etkili bir taktik olarak uygulamışlardır (H. Liu vd., 2021). Bu filmlerin optik performansını iyileştirmede araştırmacıların kullandığı diğer yöntemler kalınlık optimizasyonu, çok katmanlı dizilen tasarımlar, katkılama ve kompozit yapıların yapılmasıdır. Optik özelliklerinin daha da geliştirilmesi için ortak katkıyla birlikte kullanılmaları da araştırılmakta olup bu kullanım  $\Delta T_{sol}$  ve  $T_{lum}$  değerini aynı anda iyileştirir (Geng vd., 2022; Long vd., 2019). Tampon veya yansıma önleyici katmanların yapılmasıyla  $VO_2$  içerikli termokromik filmlerin  $T_{lum}$  değeri %60'dan ve  $\Delta T_{sol}$  değeri %10'dan yüksek duruma getirebilir (M. Li vd., 2023). Uygun yansıma önleyici katmanın ( $SiO_2$ ,  $CeO_2$  veya  $TiO_2$ ) biriktirilmesinin, ışık geçirgenliğini arttırdığı sıkça bildirilmiştir (Z. Chen vd., 2011; P. Jin, Xu, Tazawa, & Yoshimura, 2003; Lee, 2002; Mlyuka, Niklasson, & Granqvist, 2009b; Saitzek, Guinneton, Sauques, Aguir, & Gavarri, 2007). Ortak katkılı  $VO_2$  filmlerde W faz geçiş sıcaklığını etkili bir şekilde düşürdüğünden katkı bileşenlerinden biri olarak görev alır (Shen vd., 2021).

Yapılan literatür çalışmalarında en etkili katkı maddesinin tungsten (W) olduğu belirlenmiştir (Gagaoudakis vd., 2018; Ji vd., 2018; J. Kang, Liu, Shi, Dong, & Jiang, 2021; B. Li vd., 2021; Liang vd., 2017; Pan vd., 2017; Zomaya vd., 2019). Song ve arkadaşlarının çalışmasında farklı konsantrasyonlarda W katkısı eklenerek hidrotermal yöntemle hazırlanan W katkılı  $VO_2$  nanopartiküllerin faz geçiş sıcaklığı katkı oranının artırılmasıyla düşüş göstermiştir (Şekil 2). Hidrofobik özelliğini geliştirmek amacıyla W katkılı  $VO_2$  nanopartikül filmler iki aşamalı kaplama yöntemiyle oluşturulmuştur. %1,7 W katkı miktarıyla üretilen film %9,8'lik termal modülasyon yeteneği ile birlikte %35 civarında ortalama ışık geçirgenliği sergilemiştir (Song vd., 2023).



Şekil 2. W katkı oranının artırılmasıyla W katkılı  $VO_2$  tozlarının faz geçiş sıcaklığında meydana gelen düşüş (Song vd., 2023)

Li ve arkadaşlarının çalışmasında akıllı pencerelerde kullanım için tungsten (W) katkılı M-fazı vanadyum dioksit ( $\text{VO}_2$ ) gözenekli nanokristalleri ( $\text{M-VO}_2(\text{W})$ ) sentezlemek için hidrotermal yöntem kullanılmıştır. W katkısı faz geçiş sıcaklığının düşmesine neden olmasına rağmen elektron konsantrasyonunun da artış sağladığından  $T_{\text{lum}}$  ve  $\Delta T_{\text{sol}}$  değerlerinde ciddi bir azalma kaydedilir. W katkı oranının faz geçiş sıcaklığı üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılan diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizinde katkısız, 0,6 W ve 0,4 W katkılı numune için bu sıcaklıklar sırasıyla 65,3°C, 39,5°C ve 43°C olarak bildirilmiştir. Faz geçiş sıcaklığının düşürülmesinin yanında  $T_{\text{lum}}$  ve  $\Delta T_{\text{sol}}$  değerlerini dengeleyebilmek için filmlerin yapısında W katkılı mezo-gözenekli  $\text{VO}_2$  nanokristaller kullanılmıştır. Araştırmacılar W'nin eklenmesinin, nanokristallerin güneş modülasyon kabiliyetini geliştirmesini W katkılı nanokristallerin gelişmiş kristallğine ve gözenekli yapısına bağlamıştır. Katkı oranın artmasıyla birlikte faz geçiş sıcaklığının düştüğü sonucuna varılırken katkılamayla birlikte çok az W atomunun M-fazı  $\text{VO}_2$  kafesine katılması sonucunda faz yapısında çok az bir değişiklik gözlemlenmiştir. Sonuçlar, W katkısının termokromik özellikleri geliştirdiğini ortaya koymuştur (B. Li, Tian, Tao, & Zhao, 2019). Chen ve arkadaşlarının çalışmasında ise %0, %0,5, %1, %1,5 ve %2 W katkı oranlarına sahip  $\text{VO}_2$  ince filmler çift hedefli ortak püskürtme yöntemiyle, hedef üzerine uygulanan güç miktarı değiştirilerek hazırlanmıştır. Katkısız numune için 64,3°C olan faz geçiş sıcaklığı %2 W katkı oranıyla birlikte 36,5°C'ye düşürülmüş, katkılama oranının artmasıyla histerezis döngüleri Şekil 3'te gösterildiği gibi daha düşük sıcaklıklara doğru kayma göstermiştir (X. Chen vd., 2019).



Şekil 3. W katkı oranının artmasıyla (a) histerezis döngülerinin düşük sıcaklıklara doğru kayması (b) faz geçiş sıcaklığının azalması

Kong ve arkadaşlarının çalışmasında hızlı termal tavlama (RTA) kullanılarak spin kaplama yöntemiyle oluşturulan VO<sub>2</sub> içerikli katkısız ve %2 W katkılı VO<sub>2</sub> filmlerin faz geçiş sıcaklığı sırasıyla 49,4°C ve oda sıcaklığına karşılık gelen 25,8°C olarak belirlenmiştir. Katkılamayla düşen bu sıcaklık V iyonları arasındaki bağın zayıflamasıyla ilişkilendirilmiştir. Bir başka yaklaşım ise rutil benzeri VO<sub>2</sub> çekirdeklerin oluşuktan sonra yayılmasının termal enerji bariyerinde düşüşe yol açmasıdır. Katkılamayla birlikte T<sub>lum</sub> değeri %49,3'e düşüş göstermiştir. Öncül olarak vanadil asetilasetonat (VO(acac)<sub>2</sub>) kullanıldığı çalışmanın mikro yapı incelemelerinde katkılı numunenin daha düzgün tane boyutunda ve pürüzsüz yapısı ortaya konulmuştur. X-ışını kırınım (XRD) analizi, (011) düzlemi boyunca tercih edilen bir oryantasyona sahip VO<sub>2</sub> filmlerinin oluşumunu doğrulamıştır. %0,5'ten % 2'ye kadar farklı molar oranlarda hazırlanan tungsten katkılı VO<sub>2</sub> filmlerde ayrıca, katkı oranının artmasıyla birlikte histerezis halka genişliğinin azaldığı sonucuna varılmıştır (Kong vd., 2020).

Niyobyum (Nb) ve W katkısının VO<sub>2</sub> filmin termal, optik ve yapısal özelliklerine etkilerini karşılaştırıldığı bir çalışmada her iki katkının da geçiş sıcaklığını 41°C ve 26°C'ye düşürdüğü vurgulanmıştır. İyonik yarıçaplarının farklı olmasından dolayı W katkısının Nb'den daha etkin şekilde faz geçiş sıcaklığını düşürdüğü bildirilen çalışmada W katkı oranının artmasıyla birlikte geçirgenlik değerleri de artış göstermiştir. Artan Nb katkısıyla geçirgenlik değerleri belli bir artış gösterdikten sonra düşüşe geçmesinin nedeni tane boyutunun azalmasına bağlanmıştır. Hem Nb hem de W katkı oranının artırılmasıyla termokromik film kalınlığının azalmasından dolayı ΔT<sub>so</sub> değerlerinin azaldığı bildirilmiştir. Yüksek ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak XRD analizinde ve mikroyapıda görülen NaV<sub>6</sub>O<sub>15</sub> fazına ait çubuk şeklindeki kristalitler alkali difüzyonunu önlemek amacıyla yapılan SiO<sub>2</sub> ara tabakasının yetersiz olduğunun kanıtıdır (Ersundu, Ersundu, Doğan, & Güven, 2020).

Sn (Hur, Masaki, & Yoon, 2014) veya Ti (J. Du vd., 2011) ile katkılama histerezis döngüsünü daraltabilir. SnO<sub>2</sub> nanopartiküllerinin varlığı, tavlama işlemi sırasında VO<sub>2</sub>'nin birikmesini engelleyerek daralan histerezis eğrisiyle birlikte faz geçiş tepkilerinin sıcaklığa duyarlılığını artırır (W. Li vd., 2015). Zhou ve arkadaşlarının çalışmasında SnO<sub>2</sub>/W katkılı VO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> sandviç yapıdaki yüksek ışık geçirgenliği, tatmin edici güneş modülasyon kabiliyeti sergileyen filmler darbeli lazer biriktirme yöntemiyle hazırlanmıştır. Sandviç yapıların, darbeli lazer biriktirme kullanılarak iki SnO<sub>2</sub> filmi arasına W katkılı bir VO<sub>2</sub> filmi biriktirilerek üretildiği rapor edilmiştir. Belirli bir kalınlıkta oluşturulan SnO<sub>2</sub> alt katmanı geçiş sıcaklığını düşürmek için hazırlanan aradaki tabakanın kristalliğini iyileştirmek amacıyla kullanılırken en üsteki katmanın işlevi optik özellikleri iyileştirmesidir. Araştırmacılar, iki SnO<sub>2</sub> tabakası arasına W katkılı VO<sub>2</sub> tabaka-

sı eklenmesinin filmlerin faz geçiş sıcaklığını düşürdüğünü bulmuşlardır bu da akıllı pencerelerin pratik uygulamaları için faydalıdır (D. Zhou vd., 2022). Liu ve arkadaşlarının çalışmasında  $\text{SnO}_2/\text{VO}_2/\text{SnO}_2$  üç katmanlı termokromik filmler, darbeli lazer biriktirme tekniği kullanılarak cam alt tabakalar üzerinde büyütülmüştür.  $\text{SnO}_2/\text{VO}_2/\text{SnO}_2$  katmanlarından oluşan filmlerin solar modülasyon yeteneği, ışık geçirgenliği arasındaki dengeye ulaşıırken bu filmlerin faz geçiş sıcaklığı  $60^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Optik özelliklerin dengesinin sağlandığı çalışmada sandviç yapısında üç katmanlı mükemmel termokromik özellikteki filmler iyi hidrofobik özellik göstermiştir.  $\text{SnO}_2/\text{VO}_2/\text{SnO}_2$  üç katmanlı filmlerin optik geçirgenlik spektrumları incelendiğinde  $30^\circ\text{C}$  ile  $90^\circ\text{C}$  arasındaki geçirgenlik farkının  $\text{SnO}_2/\text{VO}_2$  iki katmanlı filmlere göre yüksek olması  $\text{VO}_2$  filmlerinin  $\Delta T_{\text{sol}}$ 'unu önemli derece geliştirebileceğinin göstergesidir. Girişim maksimumlarının görülmesi hazırlama sıcaklığının artmasıyla birlikte içsel optik iletim özellikleri göstermesine bağlanmıştır. Altlık ve  $\text{VO}_2$  filmi arasında kullanılan  $\text{SnO}_2$  tampon katmanı görevi görürken en üstte bulunan  $\text{SnO}_2$  tabakası yansımayı önleyici katman olarak hazırlanmıştır. Mikro yapı incelemelerinde yansıma önleyici katmanın yüzey morfolojisini düzenlemede altlık sıcaklığının önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Yazarlar,  $\text{SnO}_2/\text{VO}_2/\text{SnO}_2$  üç katmanlı termokromik filmin enerji tasarruflu cam uygulamalarında kullanım için umut verici bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamıştır (H. Liu vd., 2021).

Mo nanoparçacıkların  $\text{VO}_2$  katmanları arasına gömülmesiyle düzenlenen  $\text{VO}_2/\text{Mo}/\text{VO}_2/\text{Mo}/\text{VO}_2$  kompozit filmler güneş modülasyon kabiliyetini ve ışık geçirgenliğini iyileştirmiştir. Darbeli lazer biriktirme yöntemiyle hazırlanan numunelerin mikro yapı incelemelerinde  $\text{VO}_2$  katmanındaki yüzey morfolojisini etkileyen Mo nanoparçacıkların tane sınırlarının birleşim yerlerinde çekirdeklenme ve büyüme eğilimi dikkat çekicidir. Sonuç olarak, kompozit filmlerde  $\Delta T_{\text{sol}}$  değerinin %11,6'ya artırılması ve %55,9  $T_{\text{lum}}$  değeriyle optik özelliklerde iyileşme kaydedilmiştir.  $\Delta T_{\text{sol}}$  değerinin düşük olması zayıf kristallikle ilişkilendirilirken Mo nanopartiküllerin fazla olması  $\text{VO}_2$ 'nin kristal kalitesini olumsuz etkiler (Zong vd., 2023). Başka bir çalışmada yazarlar, V-Mo püskürtme alışımlı filmlerin termal oksidasyonu ile düşük faz geçiş sıcaklığına sahip termokromik  $\text{VO}_2$  filmlerinin hazırlanması için yeni bir yöntemi açıklamaktadır. İlk önce bir doğru akım magnetron püskürtme sistemi kullanarak cam yüzeyler üzerine V-Mo alışımlı filmler biriktirilmiş daha sonra  $\text{VO}_2$  filmleri oluşturmak için  $480^\circ\text{C}$ 'de tavlama yapılmıştır. Beş farklı Mo katkı konsantrasyonuyla hazırlanan filmlerde artan Mo katkı konsantrasyonuyla birlikte oksijen boşluklarının miktarı da artış göstermiştir. Mo katkısı tane boyutunun azalmasına, çekirdeklenme kusurlarının artmasına yol açmakla birlikte  $\text{VO}_2$  taneciklerinin büyümesini engellemiştir. Daha düşük bir geçiş sıcaklığı ve yüksek

ışık geçirgenliği elde etmek için önemli olan faktörün daha ince Mo katkılı VO<sub>2</sub> ince filmler üretmek olduğu sonucuna varılmıştır (Zhu vd., 2023).

Yazarlar, SiO<sub>2</sub> yansımaya önleyici kaplamalar kullanarak yüksek ışık geçirgenliğine ve güneş modülasyonuna sahip VO<sub>2</sub> bazlı akıllı pencereler geliştirme konusundaki çalışmalarını anlatmaktadır. SiO<sub>2</sub> yansımaya önleyici kaplamalı VO<sub>2</sub> içerikli termokromik filmler ZnO tamponlu camlar üzerine radyo frekansı (RF) magnetron püskürtme yöntemiyle belirli kalınlıklarda biriktirildiğinde %17,7'lik en yüksek  $\Delta T_{sol}$  ve %52,5'lik en yüksek  $T_{lum}$  değerlerine ulaşılmıştır. Cam üzerine sırasıyla ZnO, VO<sub>2</sub> ve SiO<sub>2</sub> katmanları uygulanarak hazırlanan kaplamalar yüksek sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulduğunda Zn'nin VO<sub>2</sub> katmanına difüzyonu gerçekleşir. En üstteki iki tabakanın kalınlık parametrelerinin ışık geçirgenliği ve güneş modülasyon yeteneğine etkisinin değerlendirildiği çalışmada SiO<sub>2</sub> katmanı ısıtılmadan oluşturulduğu için bu katmana difüzyon gerçekleşmemiştir. VO<sub>2</sub> tabanlı akıllı pencerelerin performansını artırmak için araştırmacılar, VO<sub>2</sub> katmanının yüzeyine bir SiO<sub>2</sub> yansımaya önleyici kaplama uygulamıştır. SiO<sub>2</sub> kaplama, pencere yüzeyinden yansıyan ışık miktarını azaltmıştır, böylece geçebilecek ışık miktarını arttırmıştır. SiO<sub>2</sub> kaplama kalınlığının akıllı pencerelerin optik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Genel olarak yazarlar, SiO<sub>2</sub> yansımaya önleyici kaplamalara sahip VO<sub>2</sub> tabanlı akıllı pencerelerinin mükemmel optik özelliklere sahip olduğu sonucuna varmıştır (Okimura, Mian, Yamaguchi, & Tsuchiya, 2023).

N. Mlyuka ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada Mg katkılamanın VO<sub>2</sub> ince filmlerin termokromik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. VO<sub>2</sub> içerikli filmlere Mg ilavesinin, geçiş sıcaklığını azalttığı optik geçirgenliği ve ışık geçirgenliğinin  $T_{lum}$  değerini arttırdığı tespit edildiğinden sonuçlar katkılı filmlerin enerji verimli bina pencerelerinde verimli olduğunu ortaya koymuştur (Mlyuka vd., 2009a). Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise Mg katkılı termokromik VO<sub>2</sub> ince filmlerin Mg içeriğine bağlı olarak güçlü bant genişlemesi gösterdikleri bulunmuştur. Ortaya çıkan bu bant genişlemesi sonucunda  $T_{lum}$  değeri artış gösterdiğinden görünür şeffaflık iyileşmiş, absorpsiyonunda azalma oluşmuştur. Malzemenin optik anahtarlama özelliklerini geliştirebilen Mg katkısının bant aralığı genişletme etkisine odaklanılmıştır (S.-Y. Li vd., 2013). Filmin flor veya magnezyum ile katkısı, görünür iletimi arttırmanın bir yöntemi olarak görülmektedir (Granqvist, 1990; Mlyuka vd., 2009a).

Chan ve arkadaşları akıllı pencerelerde potansiyel uygulamaları olan dar histerezis döngülerine sahip esnek VO<sub>2</sub> termokromik filmlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine bir çalışma sunmaktadır. Tampon katmanın yapımında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılarak dar ve keskin histerezis döngüleri sergileyen esnek VO<sub>2</sub> termokromik filmlerin yapımı bildirilmiştir. Çalışmada esnek poliimid altlıklar üzerinde Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> şablon katmanı oluşturulduktan sonra dü-

şük sayılabilecek 250°C ile 350°C sıcaklık aralığında VO<sub>2</sub> filmi başarılı bir şekilde magnetron püskürtme yöntemiyle biriktirilmiştir. Sonuç olarak üretilen filmler istikrarlı termokromik performans ve mükemmel modülasyon yeteneği sergilemiştir. Esneklikleri de test edilen filmlerin 5000 bükme döngü sonrası termokromik performansında belirgin bozulma olmadan bükülmeye dayanabildikleri bulunmuştur (T. Chang vd., 2021).

Ji ve arkadaşları çalışmalarında VO<sub>2</sub> filmlerinin alüminyumla katkılanmasının, geçiş sıcaklığını 44,9°C'ye azaltabilmesinin yanında güneş modülasyon kabiliyetini önemli derecede artırdığını ve T<sub>lum</sub> değerini iyileştirdiğini vurgulamıştır. Katkılama oranının artmasıyla beraber kümelenerek daha uzun ve ince duruma gelen nanoteller termokromik özellikleri artırmasının yanında yandaki tanelerin faz geçişini kolaylaştırdığından Al-katkılı VO<sub>2</sub> filmlerin faz geçişi düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Bu filmlerde ideal özelliklere Al/V katkı oranı 0,08 olarak saptanmıştır, oran 0,15'e artırıldığında geçiş özelliklerinde ve VO<sub>2</sub> kristalliğinde bozulma gözlenirken nanotel yapıların kaybolması yerini büyük pullu tanelere bırakmıştır (Ji vd., 2018). Chen ve arkadaşlarının çalışmasında % 10 Al<sup>3+</sup> katkılamanın darbeli lazer biriktirme (PLD) yöntemiyle biriktirilen VO<sub>2</sub> filmlerinin geçiş sıcaklığını 40°C'ye düşürdüğü histerezis döngüsünü daralttığı bildirilmiştir. Katkılamayla birlikte XRD pik yoğunluğu ve tane boyutunda önemli bir değişim oluşmamıştır (B. Chen, Yang, Charpentier, & Zeman, 2009).

Long ve arkadaşlarının çalışmasında tampon katmanı olarak V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ün kullanıldığında reaktif magnetron püskürtme yöntemiyle hazırlanan VO<sub>2</sub> akıllı pencereler yüksek solar modülasyon yeteneği sunmasının yanında uygun T<sub>lum</sub> değeri sergilemiştir. Araştırmacılar, püskürtülen VO<sub>2</sub>'ye bir V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tampon katmanı eklemenin akıllı pencerelerin termokromik özelliklerini geliştirdiğini ve histerezis döngülerinin genişliğinin, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tampon katmanının kalınlığı ayarlanarak kontrol edilebileceğini bulmuşlardır. 60 nm kalınlığında V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tampon katmanı ve üst katman olarak VO<sub>2</sub> kullanıldığında histerezis döngü genişliğinde %79'luk önemli bir azalma meydana gelmiştir. Histerezis eğrisi dar ve keskin duruma dönüşmüştür. Mikroyapı analizinde ise her iki katmanında kristalliğinin iyi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tampon katmanının akıllı pencereleri zamanla bozulmaya karşı daha dayanıklı hale getirdiğini ortaya koymuşlardır. Genel olarak, çalışma, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tampon katmanlarının eklenmesinin, püskürtmeli VO<sub>2</sub> akıllı pencerelerin performansını ve dayanıklılığını geliştirmek için umut verici bir yaklaşım olduğunu öne sürmektedir (Long vd., 2018).

## Gelecek

VO<sub>2</sub> kaplamaların çevresel kararlılığı uzun süreli kullanımda büyük bir zorluk oluşturduğundan koruyucu katmanların yanı sıra VO<sub>2</sub> nanoparçacıkları için çekirdek-kabuk yapıları bu kaplamaların kararlılığı etkin

olarak iyileştirebilir. Gelecekteki çalışmalar daha doğal organik polimerlerin kullanılmasına, koruyucu, kendi kendini temizleme, yansıma önleyici özelliklere de sahip çok fonksiyonlu kaplamaların yapılmasına yönelik olabilir. Bu teknolojinin laboratuvar çalışmalarından çıkarılıp endüstriye yönelebilmesi için bu kaplamaların büyük ölçekli üretimi gereklidir (T.-C. Chang vd., 2018; Feng vd., 2022). Bu alanda gelecekteki çalışmalar, termokromik akıllı pencerelerin verimliliğini ve dayanıklılığını geliştirmeye de odaklanabilir. Araştırmacılar, performanslarını ve ömürlerini artırmak için yeni malzemelerin kullanımını keşfedebilir. Ek olarak, termokromik akıllı pencereleri ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC), aydınlatma sistemleri gibi diğer akıllı bina teknolojileriyle bütünleştirmek, enerji tasarrufu potansiyellerini daha da artırabilir (Aburas vd., 2019). İlerideki araştırma fırsatları, bu camların dış ortamdaki etkilerini araştırmak üzerine olabileceği gibi bina uygulamalarında optimizasyon sağlamak amacıyla simülasyon modeline dayanan çalışmaları da kapsayabilir (Aburas vd., 2021; Q. Jin vd., 2022).

## SONUÇ

VO<sub>2</sub> içerikli termokromik kaplamalar, akıllı pencerelerde uygulama için yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. VO<sub>2</sub> içeren termokromik kaplamalar, sıcaklıktaki değişikliklere yanıt olarak optik özelliklerini dinamik olarak ayarlama yeteneklerinden dolayı önemli ilgi kazanmış, gelecek vaat eden bir malzeme sınıfıdır. Gelecek vaat eden potansiyeline rağmen, filmlerin farklı çevresel koşullar altında kararlılığı ve üretim sürecinin ölçeklenebilirliği gibi ele alınması gereken zorluklar mevcuttur. Literatürdeki çalışmalarda geliştirilmiş ışık geçirgenliği, güneş modülasyon yeteneği ve çevresel kararlılık ile birlikte termokromik performansı iyileştirmek amacıyla çok katmanlı kaplamalar yapılmıştır. Termokromik akıllı kaplamaların optik özellikleri katkı maddelerinin ilavesi, çok katmanlı yapıların üretilmesi, kompozit filmlerin ve nano yapıların tasarlanması gibi yöntemlerle daha da geliştirilebilir. Genel olarak, VO<sub>2</sub> termokromik kaplamalar, akıllı malzemeler ve sürdürülebilir teknolojiler alanında ilerleme sağlamak için büyük umut vaat etmektedir.

## KAYNAKÇA

- Aburas, M., Ebendorff-Heidepriem, H., Lei, L., Li, M., Zhao, J., Williamson, T., . . . & Soebarto, V. (2021). Smart windows–Transmittance tuned thermochromic coatings for dynamic control of building performance. *Energy and buildings*, 235, 110717.
- Aburas, M., Soebarto, V., Williamson, T., Liang, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Wu, Y. (2019). Thermochromic smart window technologies for building application: A review. *Applied Energy*, 255, 113522.
- Alvarez-Guerrero, S., Ordóñez-Miranda, J., de Coss, R., & Alvarado-Gil, J. J. (2022). Determination of the effective thermal conductivity of particulate composites based on VO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>. *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107278.
- Arnesano, M., Pandarese, G., Martarelli, M., Naspi, F., Gurunatha, K. L., Sol, C., . . . & Papakonstantinou, I. (2021). Optimization of the thermochromic glazing design for curtain wall buildings based on experimental measurements and dynamic simulation. *Solar Energy*, 216, 14-25.
- Baloukas, B., Loquai, S., & Martinu, L. (2018). VO<sub>2</sub>-based thermally active low emissivity coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 183, 25-33.
- Binions, R., Hyett, G., Piccirillo, C., & Parkin, I. P. (2007). Doped and un-doped vanadium dioxide thin films prepared by atmospheric pressure chemical vapour deposition from vanadyl acetylacetonate and tungsten hexachloride: the effects of thickness and crystallographic orientation on thermochromic properties. *Journal of Materials Chemistry*, 17(44), 4652-4660.
- Calvi, L., Leufkens, L., Yeung, C. P., Habets, R., Mann, D., Elen, K., . . . & Buskens, P. (2021). A comparative study on the switching kinetics of W/VO<sub>2</sub> powders and VO<sub>2</sub> coatings and their implications for thermochromic glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 224, 110977.
- Chaib, A. B., Zouini, M., & Tahiri, A. (2022). Drude-Lorentz oscillators' effect on the optical response of a vanadium dioxide semiconductor. *Optical Materials*, 133, 112895.
- Chang, Q., Wang, D., Zhao, Z., Ling, C., Wang, C., Jin, H., & Li, J. (2021). Size-Controllable M-Phase VO<sub>2</sub> Nanocrystals for Flexible Thermochromic Energy-Saving Windows. *ACS Applied Nano Materials*, 4(7), 6778-6785.
- Chang, T.-C., Cao, X., Bao, S.-H., Ji, S.-D., Luo, H.-J., & Jin, P. (2018). Review on thermochromic vanadium dioxide based smart coatings: from lab to commercial application. *Advances in Manufacturing*, 6(1), 1-19.
- Chang, T., Cao, X., Dedon, L. R., Long, S., Huang, A., Shao, Z., . . . & Jin, P. (2018). Optical design and stability study for ultrahigh-performance and long-lived vanadium dioxide-based thermochromic coatings. *Nano Energy*, 44, 256-264.
- Chang, T., Zhu, Y., Huang, J., Luo, H., Jin, P., & Cao, X. (2021). Flexible VO<sub>2</sub>

- thermochromic films with narrow hysteresis loops. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219, 110799.
- Chen, B., Yang, D., Charpentier, P. A., & Zeman, M. (2009). Al<sup>3+</sup>-doped vanadium dioxide thin films deposited by PLD. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(9), 1550-1554.
- Chen, G., Wang, K., Yang, J., Huang, J., Chen, Z., Zheng, J., . . . & Miao, Y. (2023). Printable Thermochromic Hydrogel-Based Smart Window for All-Weather Building Temperature Regulation in Diverse Climates. *Advanced Materials*, 2211716.
- Chen, H.-K., Hung, H.-C., Yang, T. C.-K., & Wang, S.-F. (2004). The preparation and characterization of transparent nano-sized thermochromic VO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> films from the sol-gel process. *Journal of non-crystalline solids*, 347(1-3), 138-143.
- Chen, X., Wu, M., Liu, X., Wang, D., Liu, F., Chen, Y., . . . & Wang, S. (2019). Tuning the doping ratio and phase transition temperature of VO<sub>2</sub> thin film by dual-target co-sputtering. *Nanomaterials*, 9(6), 834.
- Chen, Z., Gao, Y., Kang, L., Du, J., Zhang, Z., Luo, H., . . . & Tan, G. (2011). VO<sub>2</sub>-based double-layered films for smart windows: optical design, all-solution preparation and improved properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(9), 2677-2684.
- Cuce, E., & Riffat, S. B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 695-714.
- Cui, Y., Ke, Y., Liu, C., Chen, Z., Wang, N., Zhang, L., . . . & Long, Y. (2018). Thermochromic VO<sub>2</sub> for energy-efficient smart windows. *Joule*, 2(9), 1707-1746.
- Dietrich, M. K., Kramm, B. G., Becker, M., Meyer, B. K., Polity, A., & Klar, P. J. (2015). Influence of doping with alkaline earth metals on the optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Physics*, 117(18), 185301.
- Ding, Y., Duan, Y., Yang, F., Xiong, Y., & Guo, S. (2023). High-transmittance pNIPAm gel smart windows with lower response temperature and stronger solar regulation. *Chemical Engineering Journal*, 460, 141572.
- Donev, E. U., Lopez, R., Feldman, L. C., & Haglund Jr, R. F. (2009). Confocal raman microscopy across the metal-insulator transition of single vanadium dioxide nanoparticles. *Nano letters*, 9(2), 702-706.
- Du, J., Gao, Y., Luo, H., Kang, L., Zhang, Z., Chen, Z., & Cao, C. (2011). Significant changes in phase-transition hysteresis for Ti-doped VO<sub>2</sub> films prepared by polymer-assisted deposition. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 469-475.
- Du, Y., Liu, S., Zhou, Z., Lee, H. H., Ho, T. C., Feng, S.-P., & Tso, C. Y. (2022). Study on the halide effect of MA<sub>4</sub>PbX<sub>6</sub>·2H<sub>2</sub>O hybrid perovskites-From thermochromic properties to practical deployment for smart windows. *Ma-*

*terials Today Physics*, 23, 100624.

- Dultsev, F., Vasilieva, L., Maroshina, S., & Pokrovsky, L. (2006). Structural and optical properties of vanadium pentoxide sol-gel films. *Thin Solid Films*, 510(1-2), 255-259.
- Ersundu, A., Ersundu, M. Ç., Doğan, E., & Güven, M. (2020). A comparative investigation on thermal, structural and optical properties of W and Nb-doped VO<sub>2</sub>-based thermochromic thin films. *Thin Solid Films*, 700, 137919.
- Feng, Y.-Q., Lv, M.-L., Yang, M., Ma, W.-X., Zhang, G., Yu, Y.-Z., . . . & Yang, Y.-S. (2022). Application of new energy thermochromic composite thermosensitive materials of smart windows in recent years. *Molecules*, 27(5), 1638.
- Fu, G., Polity, A., Volbers, N., & Meyer, B. K. (2006). Annealing effects on VO<sub>2</sub> thin films deposited by reactive sputtering. *Thin Solid Films*, 515(4), 2519-2522.
- Gagaoudakis, E., Aperathitis, E., Michail, G., Kiriakidis, G., & Binas, V. (2021). Sputtered VO<sub>2</sub> coatings on commercial glass substrates for smart glazing applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 220, 110845.
- Gagaoudakis, E., Aperathitis, E., Michail, G., Panagopoulou, M., Katerinopoulou, D., Binas, V., . . . & Kiriakidis, G. (2018). Low-temperature rf sputtered VO<sub>2</sub> thin films as thermochromic coatings for smart glazing systems. *Solar Energy*, 165, 115-121.
- Geng, C., Dou, S., Zhao, J., Ren, F., Gu, J., Wei, H., . . . & Li, Y. (2022). Self-templated method to fabricate VO<sub>2</sub> nanoparticles with ultrahigh luminous transmittance for energy-efficient thermochromic windows. *Applied Surface Science*, 592, 153267.
- Granqvist, C. (1990). Window coatings for the future. *Thin Solid Films*, 193, 730-741.
- Gu, D., Sun, Z., Zhou, X., Guo, R., Wang, T., & Jiang, Y. (2015). Effect of yttrium-doping on the microstructures and semiconductor-metal phase transition characteristics of polycrystalline VO<sub>2</sub> thin films. *Applied Surface Science*, 359, 819-825.
- Guan, H., Zhang, D., Yang, Y., Liu, Y., Zhong, A., He, Q., . . . & Fan, P. (2019). A novel method for notable reducing phase transition temperature of VO<sub>2</sub> films for smart energy efficient windows. *Nanomaterials*, 10(1), 58.
- Guinneton, F., Sauques, L., Valmalette, J., Cros, F., & Gavarrı, J. (2001). Comparative study between nanocrystalline powder and thin film of vanadium dioxide VO<sub>2</sub>: electrical and infrared properties. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 62(7), 1229-1238.
- Guo, H., Wang, Y., Jain, A., Fu, H., & Chen, F. (2021). Preparation of W/Zr co-doped VO<sub>2</sub> with improved microstructural and thermochromic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 878, 160352.

- Guo, R., Shan, L., Wu, Y., Cai, Y., Huang, R., Ma, H., . . . & Liu, K. (2022). Phase-change materials for intelligent temperature regulation. *Materials Today Energy*, 23, 100888.
- Guo, X., Xu, H., Ma, X., Yang, S., Liu, T., Nie, Y., . . . & Jiang, X. (2022). Photothermal polydopamine coated VO<sub>2</sub> nanoparticle thin film with enhanced optical property and stability. *Vacuum*, 196, 110776.
- Hakami, A., Srinivasan, S. S., Biswas, P. K., Krishnegowda, A., Wallen, S. L., & Stefanakos, E. K. (2022). Review on thermochromic materials: development, characterization, and applications. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(2), 377-402.
- Hiroi, Z. (2015). Structural instability of the rutile compounds and its relevance to the metal-insulator transition of VO<sub>2</sub>. *Progress in Solid State Chemistry*, 43(1-2), 47-69.
- Ho, H.-C., Lai, Y.-C., Chen, K., Dao, T. D., Hsueh, C.-H., & Nagao, T. (2019). High quality thermochromic VO<sub>2</sub> films prepared by magnetron sputtering using V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> target with in situ annealing. *Applied Surface Science*, 495, 143436.
- Hu, H., Meng, Y., Wang, J., Wang, S., Vu, T. D., & Long, Y. (2022). Layer-by-layer self-assembled vanadium dioxide and its temperature-dependent light interference. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133978.
- Hu, J. (2016). *Polymeric thermochromic material for improvement of asphalt pavement durability: Case Western Reserve University*.
- Hur, M., Masaki, T., & Yoon, D. (2014). Thermochromic properties of Sn, W co-doped VO<sub>2</sub> nanostructured thin film deposited by pulsed laser deposition. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(12), 8941-8945.
- Ji, C., Wu, Z., Wu, X., Wang, J., Gou, J., Huang, Z., . . . & Jiang, Y. (2018). Al-doped VO<sub>2</sub> films as smart window coatings: reduced phase transition temperature and improved thermochromic performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 176, 174-180.
- Jin, P., Xu, G., Tazawa, M., & Yoshimura, K. (2003). Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> coatings. *Applied Physics A*, 77, 455-459.
- Jin, Q., Long, X., & Liang, R. (2022). Numerical analysis on the thermal performance of PCM-integrated thermochromic glazing systems. *Energy and buildings*, 257, 111734.
- Kang, J., Liu, J., Shi, F., Dong, Y., & Jiang, S. (2021). The thermochromic characteristics of Zn-doped VO<sub>2</sub> that were prepared by the hydrothermal and post-annealing process and their polyurethane composite films. *Ceramics International*, 47(11), 15631-15638.

- Kang, J., Liu, J., Shi, F., Dong, Y., Song, X., Wang, Z., . . . & Zhao, X. (2022). Facile fabrication of VO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> aerogel composite films with excellent thermochromic properties for smart windows. *Applied Surface Science*, 573, 151507.
- Kang, L., Gao, Y., & Luo, H. (2009). A novel solution process for the synthesis of VO<sub>2</sub> thin films with excellent thermochromic properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1(10), 2211-2218.
- Kang, L., Gao, Y., Zhang, Z., Du, J., Cao, C., Chen, Z., & Luo, H. (2010). Effects of annealing parameters on optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> films prepared in aqueous solution. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(4), 1901-1911.
- Ke, Y., Chen, J., Lin, G., Wang, S., Zhou, Y., Yin, J., . . . & Long, Y. (2019). Smart windows: electro-, thermo-, mechano-, photochromics, and beyond. *Advanced Energy Materials*, 9(39), 1902066.
- Ke, Y., Tan, Y., Feng, C., Chen, C., Lu, Q., Xu, Q., . . . & Peng, J. (2022). Tetra-Fish-Inspired aesthetic thermochromic windows toward Energy-Saving buildings. *Applied Energy*, 315, 119053.
- Kim, H.-T., Chae, B.-G., Youn, D.-H., Maeng, S.-L., Kim, G., Kang, K.-Y., & Lim, Y.-S. (2004). Mechanism and observation of Mott transition in VO<sub>2</sub>-based two-and three-terminal devices. *New Journal of Physics*, 6(1), 52.
- Kim, J., & Paik, T. (2021). Recent advances in fabrication of flexible, thermochromic vanadium dioxide films for smart windows. *Nanomaterials*, 11(10), 2674.
- Klimov, V., Timofeeva, I., Khanin, S., Shadrin, E., Ilinskii, A., & Silva-Andrade, F. (2002). Hysteresis loop construction for the metal-semiconductor phase transition in vanadium dioxide films. *Technical Physics*, 47, 1134-1139.
- Kolenatý, D., Vlček, J., Bárta, T., Rezek, J., Houška, J., & Haviar, S. (2020). High-performance thermochromic VO<sub>2</sub>-based coatings with a low transition temperature deposited on glass by a scalable technique. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Kong, M., Egbo, K., Liu, C. P., Hossain, M. K., Tso, C. Y., Chao, C. Y. H., & Yu, K. M. (2020). Rapid thermal annealing assisted facile solution method for tungsten-doped vanadium dioxide thin films on glass substrate. *Journal of Alloys and Compounds*, 833, 155053.
- Lee, M.-H. (2002). Thermochromic glazing of windows with better luminous solar transmittance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 71(4), 537-540.
- Lee, M.-H., & Cho, J.-S. (2000). Better thermochromic glazing of windows with anti-reflection coating. *Thin Solid Films*, 365(1), 5-6.
- Leroy, J., Bessaudou, A., Cosset, F., & Crunteanu, A. (2012). Structural, electrical and optical properties of thermochromic VO<sub>2</sub> thin films obtained by reactive electron beam evaporation. *Thin Solid Films*, 520(14), 4823-4825.

- Li, B., Liu, J., Tian, S., Liu, B., Yang, X., Yu, Z., & Zhao, X. (2020). VO<sub>2</sub>-ZnO composite films with enhanced thermochromic properties for smart windows. *Ceramics International*, 46(3), 2758-2763.
- Li, B., Tian, S., Tao, H., & Zhao, X. (2019). Tungsten doped M-phase VO<sub>2</sub> mesoporous nanocrystals with enhanced comprehensive thermochromic properties for smart windows. *Ceramics International*, 45(4), 4342-4350.
- Li, B., Tian, S., Wang, Z., Liu, B., Gong, X., & Zhao, X. (2021). Thermochromic Ta Doped VO<sub>2</sub> Films: Enhanced Luminous Transmittance, Significantly Depressed Phase Transition Temperature and Hysteresis Width. *Applied Surface Science*, 568, 150959.
- Li, M., Zhang, S., Bian, L., Sun, B., Han, J., Zong, H., . . . & Hu, Q. (2023). Regulating surface morphology and thermochromic properties of VO<sub>2</sub> films by Cu-Ag bimetallic nanoparticles. *Surfaces and Interfaces*, 102688.
- Li, S.-Y., Mlyuka, N. R., Primetzhofer, D., Hallén, A., Possnert, G., Niklasson, G. A., & Granqvist, C. G. (2013). Bandgap widening in thermochromic Mg-doped VO<sub>2</sub> thin films: Quantitative data based on optical absorption. *Applied physics letters*, 103(16), 161907.
- Li, W., Ji, S., Qian, K., & Jin, P. (2015). Preparation and characterization of VO<sub>2</sub> (M)-SnO<sub>2</sub> thermochromic films for application as energy-saving smart coatings. *Journal of colloid and interface science*, 456, 166-173.
- Liang, Z., Zhao, L., Meng, W., Zhong, C., Wei, S., Dong, B., . . . & Wang, S. (2017). Tungsten-doped vanadium dioxide thin films as smart windows with self-cleaning and energy-saving functions. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 124-131.
- Lin, T., & Zhang, Y. (2019). Metal-insulator transition of monoclinic VO<sub>2</sub> thin film without Peierls distortion. *Vacuum*, 163, 338-341.
- Liu, H., Zong, H., Yan, L., Zhou, D., Yin, Y., Cao, G., . . . & Li, M. (2021). SnO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> tri-layer thermochromic films with high luminous transmittance, remarkable solar modulation ability and excellent hydrophobicity grown on glass substrates. *Infrared Physics & Technology*, 113, 103648.
- Liu, Y., Tao, H., Chu, X., Wan, M., Bao, J., & Zhao, X. (2014). Effects of addition of tungsten chloride on optical properties of VO<sub>2</sub>-based thermochromic films prepared by sol-gel method. *Journal of non-crystalline solids*, 383, 116-120.
- Long, S., Cao, X., Li, N., Xin, Y., Sun, G., Chang, T., . . . & Jin, P. (2019). Application-oriented VO<sub>2</sub> thermochromic coatings with composite structures: Optimized optical performance and robust fatigue properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 189, 138-148.
- Long, S., Cao, X., Sun, G., Li, N., Chang, T., Shao, Z., & Jin, P. (2018). Effects of V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layers on sputtered VO<sub>2</sub> smart windows: Improved thermochromic properties, tunable width of hysteresis loops and enhanced durability. *Applied Surface Science*, 441, 764-772.

- Lopez, R., Haynes, T., Boatner, L., Feldman, L., & Haglund Jr, R. (2002). Size effects in the structural phase transition of VO<sub>2</sub> nanoparticles. *Physical Review B*, 65(22), 224113.
- Loquai, S. (2017). *Durable thermochromic VO<sub>2</sub> films deposited by HIPIMS*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
- Lu, W., Zhao, G., Song, B., Li, J., Zhang, X., & Han, G. (2017). Preparation and thermochromic properties of sol-gel-derived Zr-doped VO<sub>2</sub> films. *Surface and Coatings Technology*, 320, 311-314.
- Mehdizadeh-Rad, H., Choudhry, T. A., Ng, A. W., Rajabi, Z., Rais, M. F., Zia, A., & Tariq, M. A. U. R. (2022). An Energy Performance Evaluation of Commercially Available Window Glazing in Darwin's Tropical Climate. *Sustainability*, 14(4), 2394.
- Mlyuka, N., Niklasson, G. A., & Granqvist, C.-G. (2009a). Mg doping of thermochromic VO<sub>2</sub> films enhances the optical transmittance and decreases the metal-insulator transition temperature. *Applied physics letters*, 95(17), 171909.
- Mlyuka, N., Niklasson, G. A., & Granqvist, C.-G. (2009b). Thermochromic multilayer films of VO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> with enhanced transmittance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(9), 1685-1687.
- Okimura, K., Mian, M. S., Yamaguchi, I., & Tsuchiya, T. (2023). High luminous transmittance and solar modulation of VO<sub>2</sub>-based smart windows with SiO<sub>2</sub> anti-reflection coatings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 251, 112162.
- Outón, J., Blanco, E., Domínguez, M., Bakkali, H., Gonzalez-Leal, J., Delgado, J., & Ramírez-del-Solar, M. (2022). Tracking the optical constants of porous vanadium dioxide thin films during metal-insulator transition: Influence of processing conditions on their application in smart glasses. *Applied Surface Science*, 580, 152228.
- Pan, G.-T., Yang, Y.-L., Chong, S., Arjun, N., Yang, T. C.-K., & Lai, Y.-C. (2017). The durability study of thermochromic vanadium dioxide films with the addition of barrier coatings. *Vacuum*, 145, 158-168.
- Qazilbash, M. M., Brehm, M., Chae, B.-G., Ho, P.-C., Andreev, G. O., Kim, B.-J., . . . & Keilmann, F. (2007). Mott transition in VO<sub>2</sub> revealed by infrared spectroscopy and nano-imaging. *Science*, 318(5857), 1750-1753.
- Qian, J., Li, B., Tian, S., Liu, B., & Zhao, X. (2022). Near-infrared-activated VO<sub>2</sub> based nanothermochromic smart windows by incorporation of photothermal W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> nanorods. *Applied Surface Science*, 154680.
- Qu, Z., Yao, L., Zhang, Y., Jin, B., He, J., & Mi, J. (2019). Surface and interface engineering for VO<sub>2</sub> coatings with excellent optical performance: From theory to practice. *Materials Research Bulletin*, 109, 195-212.

- Saeli, M., Piccirillo, C., Parkin, I. P., Binions, R., & Ridley, I. (2010). Energy modelling studies of thermochromic glazing. *Energy and buildings*, 42(10), 1666-1673.
- Saitzek, S., Guinneton, F., Sauques, L., Aguir, K., & Gavarrri, J.-R. (2007). Thermochromic CeO<sub>2</sub>-VO<sub>2</sub> bilayers: Role of ceria coating in optical switching properties. *Optical Materials*, 30(3), 407-415.
- Salamati, M., Kamyabjou, G., Mohamadi, M., Taghizade, K., & Kowsari, E. (2019). Preparation of TiO<sub>2</sub>@ W-VO<sub>2</sub> thermochromic thin film for the application of energy efficient smart windows and energy modeling studies of the produced glass. *Construction and Building Materials*, 218, 477-482.
- Schofield, P., Bradicich, A., Gurrola, R. M., Zhang, Y., Brown, T. D., Pharr, M., . . . & Banerjee, S. (2022). Harnessing the Metal-Insulator Transition of VO<sub>2</sub> in Neuromorphic Computing. *Advanced Materials*, 2205294.
- Shen, N., Chen, S., Huang, R., Huang, J., Li, J., Shi, R., . . . & Cheng, C. (2021). Vanadium dioxide for thermochromic smart windows in ambient conditions. *Materials Today Energy*, 21, 100827.
- Sohn, J. I., Joo, H. J., Porter, A. E., Choi, C.-J., Kim, K., Kang, D. J., & Welland, M. E. (2007). Direct observation of the structural component of the metal-insulator phase transition and growth habits of epitaxially grown VO<sub>2</sub> nanowires. *Nano letters*, 7(6), 1570-1574.
- Soltani, M., Bah, S. T., Karmouch, R., Gaidi, M., & Vallée, R. (2019). Phase transition in thermochromic VO<sub>2</sub> coatings grown by ac dual magnetron cathode sputtering. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(22), 20043-20049.
- Soltani, M., Chaker, M., Haddad, E., & Kruzelecky, R. (2008). Thermochromic vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>) smart coatings for switching applications. *Applied physics in the 21st century*, 661(2).
- Song, X., Xu, Z., Wei, D., Yue, X., Zhang, T., Zhang, H., . . . & Yao, J. (2023). *Application of W-Doped VO<sub>2</sub> Phase Transition Mechanism and Improvement of Hydrophobic Self-Cleaning Properties to Smart Windows*. Paper presented at the Photonics.
- Strelcov, E., Lilach, Y., & Kolmakov, A. (2009). Gas sensor based on metal-insulator transition in VO<sub>2</sub> nanowire thermistor. *Nano letters*, 9(6), 2322-2326.
- Suh, J. Y., Lopez, R., Feldman, L. C., & Haglund Jr, R. (2004). Semiconductor to metal phase transition in the nucleation and growth of VO<sub>2</sub> nanoparticles and thin films. *Journal of Applied Physics*, 96(2), 1209-1213.
- Sun, G., Zhou, H., Cao, X., Li, R., Tazawa, M., Okada, M., & Jin, P. (2016). Self-assembled multilayer structure and enhanced thermochromic performance of spinodally decomposed TiO<sub>2</sub>-VO<sub>2</sub> thin film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(11), 7054-7059.

- Sun, R., Jin, B., Yao, L., Liu, Y., Li, J., Liang, J., & He, J. (2021). Controllable Design of Bifunctional VO<sub>2</sub> Coatings with Superhydrophobic and Thermochromic Performances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(11), 13751-13759.
- Suzuki, H., Yamaguchi, K., & Miyazaki, H. (2007). Fabrication of thermochromic composite using monodispersed VO<sub>2</sub> coated SiO<sub>2</sub> nanoparticles prepared by modified chemical solution deposition. *Composites science and technology*, 67(15-16), 3487-3490.
- Tsige, A., Ganesh, T., Mensur, D., & Tesfaye, D. (2021). Thermal studies on chemical bath deposited thermochromic VO<sub>2</sub> thin film for energy efficient glass windows. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6171-6175.
- Wang, S., Liu, M., Kong, L., Long, Y., Jiang, X., & Yu, A. (2016). Recent progress in VO<sub>2</sub> smart coatings: Strategies to improve the thermochromic properties. *Progress in Materials Science*, 81, 1-54.
- Warwick, M. E., & Binions, R. (2014). Chemical vapour deposition of thermochromic vanadium dioxide thin films for energy efficient glazing. *Journal of Solid State Chemistry*, 214, 53-66.
- Warwick, M. E., Ridley, I., & Binions, R. (2015). The effect of variation in the transition hysteresis width and gradient in thermochromic glazing systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, 253-265.
- Warwick, M. E., Ridley, I., & Binions, R. (2016). Thermochromic vanadium dioxide thin films prepared by electric field assisted atmospheric pressure chemical vapour deposition for intelligent glazing application and their energy demand reduction properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 157, 686-694.
- Wen, Z., Ke, Y., Feng, C., Fang, S., Sun, M., Liu, X., & Long, Y. (2021). Mg-Doped VO<sub>2</sub>@ ZrO<sub>2</sub> Core-Shell Nanoflakes for Thermochromic Smart Windows with Enhanced Performance. *Advanced Materials Interfaces*, 8(1), 2001606.
- Whittaker, L., Patridge, C. J., & Banerjee, S. (2011). Microscopic and nanoscale perspective of the metal-insulator phase transitions of VO<sub>2</sub>: some new twists to an old tale. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2(7), 745-758.
- Wu, J., Huang, W., Shi, Q., Cai, J., Zhao, D., Zhang, Y., & Yan, J. (2013). Effect of annealing temperature on thermochromic properties of vanadium dioxide thin films deposited by organic sol-gel method. *Applied Surface Science*, 268, 556-560.
- Wu, S. H., Cossio, G., Braun, B., Wu, F. C. M., & Yu, E. T. (2023). Smart Window Structures Based on Highly Conductive, Transparent Metal Nanomeshes and Thermochromic Perovskite Films. *Advanced Optical Materials*, 11(6), 2202409.

- Wu, Y., Fan, L., Liu, Q., Chen, S., Huang, W., Chen, F., . . . & Wu, Z. (2015). Decoupling the lattice distortion and charge doping effects on the phase transition behavior of VO<sub>2</sub> by titanium (Ti<sup>4+</sup>) doping. *Scientific reports*, 5(1), 9328.
- Xiao, X., Zhang, H., Chai, G., Sun, Y., Yang, T., Cheng, H., . . . & Xu, G. (2014). A cost-effective process to prepare VO<sub>2</sub> (M) powder and films with superior thermochromic properties. *Materials Research Bulletin*, 51, 6-12.
- Xie, Y., Zhao, X., Mofid, S., Tan, J., Jelle, B. P., & Yang, R. (2021). Influence of shell materials on the optical performance of VO<sub>2</sub> core-shell nanoparticle-based thermochromic films. *Materials Today Nano*, 13, 100102.
- Xu, G., Jin, P., Tazawa, M., & Yoshimura, K. (2004). Tailoring of luminous transmittance upon switching for thermochromic VO<sub>2</sub> films by thickness control. *Japanese journal of applied physics*, 43(1R), 186.
- Zhang, Y., Li, B., Wang, Z., Tian, S., Liu, B., Zhao, X., . . . & Wang, S. (2021). Facile Preparation of Zn<sub>2</sub>V<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-VO<sub>2</sub> Composite Films with Enhanced Thermochromic Properties for Smart Windows. *ACS Applied Electronic Materials*, 3(5), 2224-2232.
- Zhang, Z., Gao, Y., Chen, Z., Du, J., Cao, C., Kang, L., & Luo, H. (2010). Thermochromic VO<sub>2</sub> thin films: solution-based processing, improved optical properties, and lowered phase transformation temperature. *Langmuir*, 26(13), 10738-10744.
- Zhang, Z., Gao, Y., Kang, L., Du, J., & Luo, H. (2010). Effects of a TiO<sub>2</sub> buffer layer on solution-deposited VO<sub>2</sub> films: enhanced oxidation durability. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(50), 22214-22220.
- Zhao, J., Chen, D., Hao, C., Mi, W., & Zhou, L. (2022). The optimization and role of Ti surface doping in thermochromic VO<sub>2</sub> film. *Optical Materials*, 133, 112960.
- Zhao, L., Miao, L., Liu, C., Li, C., Asaka, T., Kang, Y., . . . & Su, H. (2014). Solution-processed VO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> composite films with simultaneously enhanced luminous transmittance, solar modulation ability and anti-oxidation property. *Scientific reports*, 4(1), 1-11.
- Zhao, Y., Xu, R., Zhang, X., Hu, X., Knize, R. J., & Lu, Y. (2013). Simulation of smart windows in the ZnO/VO<sub>2</sub>/ZnS sandwiched structure with improved thermochromic properties. *Energy and buildings*, 66, 545-552.
- Zhao, Z., Li, J., Ling, C., Zhao, X., Zhao, Y., & Jin, H. (2021). Electric field driven abnormal increase in conductivity of tungsten-doped VO<sub>2</sub> nanofilms. *Thin Solid Films*, 725, 138643.
- Zhou, D., Zong, H., Hu, Q., Yan, L., Qiao, W., Zhang, S., . . . & Li, M. (2022). Symmetrical SnO<sub>2</sub>/W-doped VO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> sandwich structures with high luminous transmittance, excellent solar modulation ability and low phase transition temperature. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104198.

- Zhou, J., Gao, Y., Zhang, Z., Luo, H., Cao, C., Chen, Z., . . . & Liu, X. (2013). VO<sub>2</sub> thermochromic smart window for energy savings and generation. *Scientific reports*, 3(1), 1-5.
- Zhou, Y., Wang, S., Peng, J., Tan, Y., Li, C., Boey, F. Y. C., & Long, Y. (2020). Liquid thermo-responsive smart window derived from hydrogel. *Joule*, 4(11), 2458-2474.
- Zhu, M., Qi, H., Li, C., Wang, B., Wang, H., Guan, T., & Zhang, D. (2018). VO<sub>2</sub> thin films with low phase transition temperature grown on ZnO/glass by applying substrate DC bias at low temperature of 250°C. *Applied Surface Science*, 453, 23-30.
- Zhu, M., Zhang, D., & Qi, H. (2023). The novel preparation method of thermochromic VO<sub>2</sub> films with a low phase transition temperature by thermal oxidation of V–Mo cosputtered alloy films. *Ceramics International*, 49(8), 11803-11812.
- Zomaya, D., Xu, W. Z., Grohe, B., Mittler, S., & Charpentier, P. A. (2019). W-doped VO<sub>2</sub>/PVP coatings with enhanced thermochromic performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 109900.
- Zong, H., Zhou, D., Bian, L., Sun, B., Han, J., Hu, Q., . . . & Li, M. (2023). Improving solar modulation ability and luminous transmittance by embedding Mo nanoparticles between VO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> layers. *Infrared Physics & Technology*, 128, 104513.
- Zong, H., Zhou, D., Yan, L., Li, M., Qiao, W., Zhang, S., . . . & Bian, L. (2022). Preparation and characterization of HfO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub> sandwich structures with low phase transition temperature, excellent thermochromic properties, and superior durability. *Ceramics International*, 48(5), 6734-6744.
- Zou, Z., Zhang, Z., Xu, J., Li, G., Xiong, R., Liu, Y., & Shi, J. (2021). Phase transition mechanism and application of silicon-doped VO<sub>2</sub> thin films to smart windows. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(19), 23825-23833.



**3-D BASKILI VE DONATILI  
BETONLARIN MALZEME  
ÖZELLİKLERİNDEKİ SON GELİŞMELER  
VE ANALİZLERİ**

*Sadık Alper YILDIZEL<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> \*Doç. Dr., Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, 0000-0001-5702-807X, sayildizel@kmu.edu.tr

## GİRİŞ

Son yıllarda 3D yazıcı ile üretilen betonların sayısı, kalıp gerektirmemesi, modüler üretime imkân tanınması ve verimli döküm gerçekleştirilebilmesi nedenleriyle büyük artış yaşamıştır. Ayrıca ham malzemelerin daha az tüketilmesine olanak sağlayarak çevre kirliliğini azaltıcı etki göstermiş ve daha yeşil beton üretimine rol almıştır(De Schutter et al., 2018) considering technical, economic and environmental aspects. Although several showcases of 3D printed concrete structures are available worldwide, many challenges remain at the technical and processing level. Currently available high-performance cement-based materials cannot be directly 3D printed, because of inadequate rheological and stiffening properties. Active rheology control (ARC. Günümüze kadar 3D baskı yöntemiyle düşük ölçekteki yapılar, dekoratif beton ve basınç elemanları yaygın şekilde üretilmiştir(Bos et al., 2022)from the ‘simple’ deposition of filaments of self-stable concrete to its application in buildings and structures, with all associated requirements and interfaces, comes with challenges. These range from matching the design intent to the manufacturing capabilities (through structural analysis and approval, and reinforcement. Bu durumun en önemli sebebi ise katmanlı şekilde döküm gerçekleştirildiği için baskı beton içinde özel anizotropik katmanların oluşmasıdır. Ayrıca, baskıda kullanılacak olan betonların özellikleri ve baskı ekipmanlarının gereksinimleri de bu yöntemin uygulama zorluklarındandır(Papachristoforou et al., 2018)cost, design flexibility, error reduction, and environmental aspects. Quality of the final printed structure is significantly affected by the properties of fresh concrete which must possess adequate workability in order to be extruded through an extruder head (printability. Bir diğer zorluk ise donatılı beton uygulanmasındaki engellerdir.

Son dönemlerde gerçekleştirilen donatılı baskı beton çalışmaları basit yapısal tasarım için temel oluşturmuştur(H. Liu, Liu, Bai, et al., 2022). Bu gelişmelere bağlı olarak baskı beton elemanları basit basınç elemanlarından eğilme etkisi altında çalışabilecek beton kompozitlere doğru evrilmiştir(Pessoa et al., 2021). Bunun yanında donatılı baskı döküm için kontör kalıp teknolojisi, eş baskı yöntemi, hasır donatıların kullanılması ve ön gerilmeli elemanların oluşturulması gibi yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu gelişmelerin yanından baskı beton için robotik ve yazılım sistemlerinin geldiği nokta da dikkate değerdir(Xiao et al., 2021) knowledge of the differences between large-scale 3D printing and laboratory 3D printing is still limited. In this review, large-scale extrusion-based 3D printing concrete (3DPC. 3D donatılı baskı betonların performansları kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ve baskı teknolojisi gibi faktörlere bağlıdır. Ve bu faktörlerin optimizasyonu için günümüzde çalışmalar devam etmektedir.

Günümüzde baskı betonların üretim yöntemleri iki ana başlık altında değerlendirilmektedir. Bunlar tamamen sahada ve prefabrikte üretimdir. Saha üretimi, baskı elemanlarının limitleri ve yetersiz yapısal özellikler nedeniyle sadece az katlı ve basit yapıdaki binalarda tercih edilmektedir. Üretim alanında baskısı yapılmış betonarme elemanların ise daha detaylı yapıda baskısı yapılabilen ve denetimi daha kolay olmaktadır. Bu nedenle üretim elemanında yapılan baskı teknolojileri bu sektörde lokomotif görevini görmektedir(Lowke et al., 2018).

### **3-D BASKI ve DONATILI BETONLARIN MALZEME ÖZELLİKLERİ**

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, normal betonda kullanılan ve tek eksenli basınç ve çekmenin en önemli parametreler olduğu plastik hasar modelinin kullanıldığı görülmektedir(Wolfs et al., 2018). Gerçekleştirilen bazı çalışmalarda ise 3-D donatılı betonların basınç, eğilme ve eksenel çekme gerilmeleri hesaplanmıştır(Ding et al., 2021; Lan et al., 2023; Z. Pan et al., 2023). Yapılan bu çalışma sonuçları bu tip betonların yüksek derecede anizotropik malzeme özellikleri gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Buna göre basınç ve çekme dayanımları yüklem doğrultusundan büyük ölçüde etkilenmektedir. Aşağıdaki alt bölümlerde bu tür betonların mekanik özellikleri, baskı teknolojilerinin önemli parametreleri ve yüksek performanslı baskı ve donatılı betonlar ayrı alt bölümlerde incelenmiştir.

#### **3-d Baskı ve Donatılı Betonların Mekanik Özellikleri**

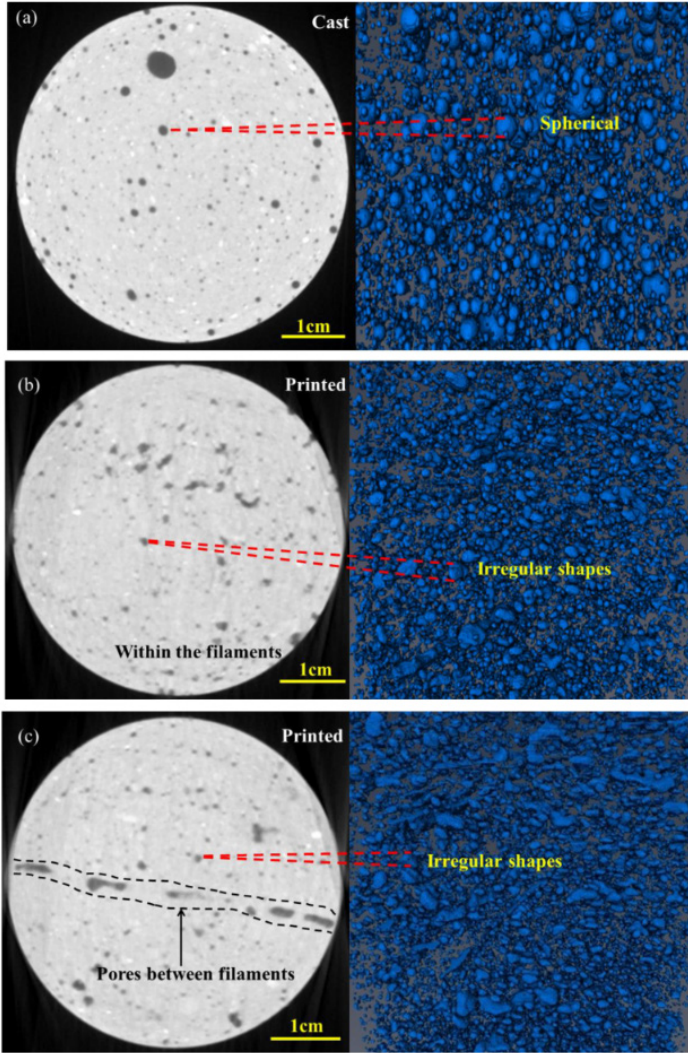
Bilindiği gibi malzeme dayanımı her tür betonda olduğu gibi bu tip betonlarda da taşıma kapasitesinin önemli parametrelerinden biridir. Tek eksenli basınç ve çekme gerilmeleri oranı ise hasar modelini ve deformasyon karakteristiklerini yansıtan faktörlerdir(Yan et al., 2022). Basınç dayanımı değeri normal betonla karşılaştırılacak seviyelerde olan 100 MPa değerine yapılan çalışmada ulaşılmıştır(Le et al., 2012). Liu ve arkadaşları ayrılmış hopkinson basınç çubuğu testi yardımıyla dinamik basınç dayanımı değerini ölçmüştür. Bu çalışma kapsamında çekme ve kesme gerilmeleri de incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre dinamik basınç dayanımı darbe basıncının artmasıyla birlikte artmaktadır(C. Liu et al., 2021). Rahul ise direk kesme testiyle iç katmanlar arasındaki kesme dayanımı değerlerini incelemiştir. Ve bu çalışma sonuçlarına göre elde ettiği değerlerin normal sahada dökülen betona göre %30'a kadar az olduğunu tespit etmiştir(Rahul et al., 2019).

Diğer araştırmalarda ise malzeme özelliklerindeki değişikliklerin dayanımlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Lui ve çalışma grubu, farklı geri dönüştürülmüş ve doğal agrega oranlarında üretilmiş donatılı baskı betonlar üzerinde çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışma sonuçlarına göre

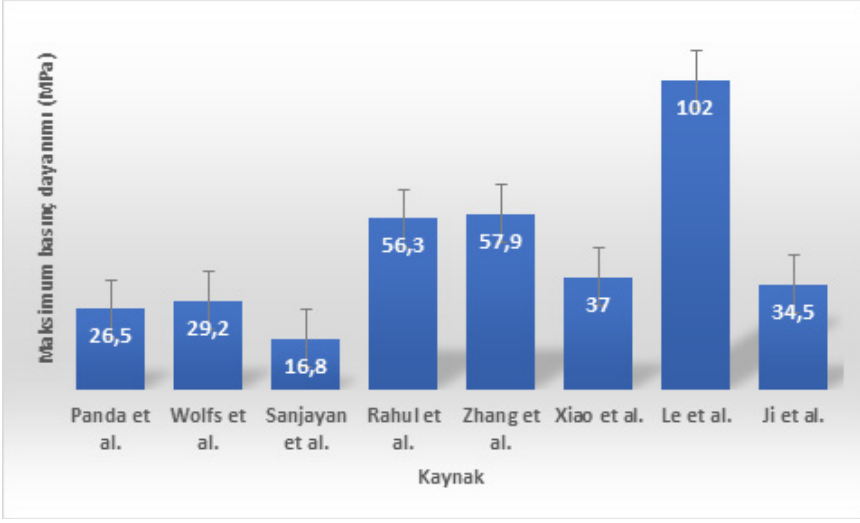
artan eklenme yüzdelere göre anizotropik özelliklerin arttığı ortaya çıkmıştır(H. Liu, Liu, Wu, et al., 2022). Ding ise geri dönüştürülmüş kumu ile doğal kumun yerine belli miktarlarda yer değiştirerek kullanmış ve çalışma sonuçlarına göre malzemenin anizotropik özellikte olduğunu ve dönüştürülmüş kum kullanılan numunelerin daha düşük basınç ve eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur(Ding et al., 2020)curing age, nozzle height and anisotropic behavior were evaluated based on the compressive tests, tensile splitting tests and flexural tests. Moreover, the digital image correlation (DIC).

Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi 3-d baskı betonun en önemli karakteristiği anizotropik yapıda olmasıdır. Bu durum ilk defa Le ve arkadaşları tarafından ortaya konmuştur(Le et al., 2012). Feng ve çalışma grubu ise çimento bağlayıcılı numuneler üreterek basınç ve eğilme dayanımı testlerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre basınç dayanımı baskı yoluna paralel doğrultuda, diğer doğrultulara nazaran daha yüksek çıkarken, eğilme dayanımında tam tersi sonuçlar elde edilmiştir. Wu ve arkadaşları ise çok ölçekli sonlu elemanlar yöntemine dayanan çalışma yapmış ve efektif elastik matrisin simetrik olduğunu ve malzemenin de anizotropik yapıda olduğunu literatüre sunmuştur(Wu et al., 2021). Bundan sonra ekstrüzyon tabanlı 3-d baskı yöntemi ana yöntem olarak geniş kitlelerce kabul görmüştür. Baskı sırasında iç yüzeyler, katmanların birikmesi ile oluşmaktadır. Ve büyük boşluklar bu yöntem nedeniyle iç yapıda oluşmaktadır. Porozite miktarı ve boşlukların şekli direk elastisite modülünü ve basınç dayanımını etkilemektedir. Liu ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada boşluk şekillerinin düzensiz yapıda olduğunu ve gerilme konsantrasyonuna sebep olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmaya ait x ışını bilgisayarlı tomografi taraması Şekil 1’de sunulmuştur. Buna göre normal betonda daha düzenli boşluk yapısı varken, baskı betonda daha düzensiz yapıya sahip oldukları görülmektedir. Şekil olarak ise normal betonda daha küresel yapıda boşluklar oluşmuştur (C. Liu et al., 2022).

Bu bölümde de bahsedildiği gibi 3-d baskı betonlar için malzeme seçimi anizotropik özelliğe sahip olması nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Ek olarak bu tür betonlar için norm ve regülasyonların getirilmesi üretim kalitesinin artırılması için ve gelecek çalışmalar için büyük önem taşımaktadır. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalara ait maksimum (x, y ve z)basınç dayanımı sonuçları Şekil 2’de özet halinde sunulmuştur.



Şekil 1: Normal Beton ve Baskı Betonunun x ışını Bilgisayarlı Tomografi Taraması (C. Liu et al., 2022)



**Şekil 2:** 3d Baskı Betonun Basınç Dayanımı Literatür Özeti (Ji et al., 2022; Le et al., 2012; T. Pan et al., 2021; Panda et al., 2017; Paul et al., 2018; Rahul et al., 2019; Wolfs et al., 2019; Xiao et al., 2022; Zhang et al., 2019)researches on the influence of nozzle directions and scrapers on properties of 3D printing concrete (3DPC)

### Baskı Teknolojilerinin Kontrol Parametreleri

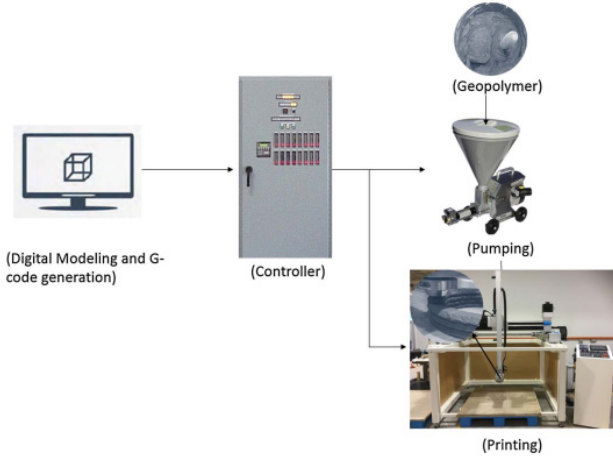
Daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada aynı malzemeler kullanılsa bile baskı sürecinin donatılı 3-d baskı betonun mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir (Napolitano et al., 2021). Baskı sürecinin parametreleri incelendiğinde baskı aralık süresi, yüzey nem miktarı, baskı başlığının hareket hızı, oluşturulan malzemenin dokusu, şekli ve büyüklüğünden oluştuğu gözlemlenmiştir.

Baskı aralık süresi kontrol parametreleri içinde en açık etkiye sahip olan parametredir. Uzun baskı aralıkları, baskı yüzeyinden buharlaşma ile daha fazla su kaybına neden olmaktadır (Yang et al., 2023). Yapılan bir diğer çalışma da katmanlar arası çekme dayanımının artan baskı aralık süresiyle azaldığı ortaya konmuştur (Napolitano et al., 2020). Liu ve arkadaşları ise crossover metoduyla iç katmanlar arası çekme ve kesme gerilmelerini incelemiş, katmanlar arası bağ kuvvetlerinin artan baskı aralık süreleri ile ciddi oranda azaldığı tespitini yapmışlardır. Kesme kuvvetleri ise artan baskı süresiyle birlikte artmıştır (Z. Liu et al., 2019).

Baskı yüzeyinde nem kaybı ciddi oranlara ulaşırsa bu durum iç yüzeyel nem miktarını da azaltmakta buna bağlı olarak da hidrasyon derecesi düşmekte ve sonuçta daha poroz yapıda bir numune oluşmaktadır. Ma ve arkadaşları kür koşullarının bu tür betonların mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Ulaştıkları sonuca göre kuru ve 3 m/sn. rüzgarlı

ortamın basınç ve eğilme dayanımını azaltıcı etkisi olduğu yönündedir(Ma et al., 2022). Yapılan çalışmalara zıt yönde bir görüş ise Sanjayan ve arkadaşlarından gelmiştir. Buna göre yüzeyden belli oranda nem kaybı donatılı 3-d baskı betonların mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Ve Hazırlanan karışımını su çimento oranı, standart betonunkinden biraz yüksektir(Sanjayan et al., 2018).

Baskı başlığının hareket hızı ve yüksekliği sadece aderansı arttırmakta, aynı zamanda numunenin yüzey kalitesini de geliştirmektedir. Shi ve arkadaşları bu faktörlerin etkilerini yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre baskı başlığının hızının ve yüksekliğinin artması basınç ve çekme gerilmelerini düşürmektedir(Shi et al., 2023). Panda ve arkadaşları yaptıkları diğer çalışmada da benzer sonuçlar elde etmişlerdir(Panda et al., 2018). Bu çalışma kapsamında kullanılan sistem Şekil 3'te gösterilmiştir.



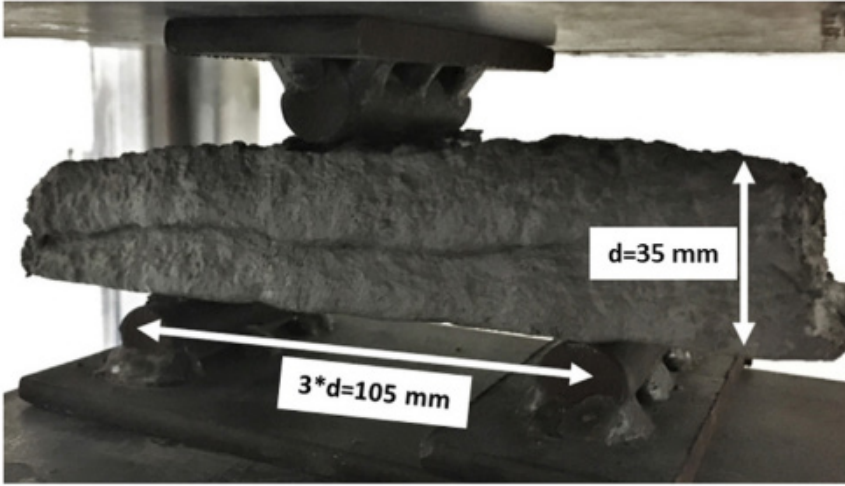
Şekil 3: Geopolimer Baskı Beton Sistemi(Panda et al., 2018)

Sun ve arkadaşları farklı çıkış başlıklarının ve büyüklüklerinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemiş ve üçgen kalıplamanın daha az içsel kusura sahip olduğunu ve daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini tespit etmiştir(Sun et al., 2020). Genel olarak değerlendirme yapıldığında 3-d baskı betonların mekanik özellikleri birçok faktörün kombinasyonundan etkilenmektedir. Yüksek su içeriğine sahip karışımlar kullanıldığında baskı stabilitesi bozulurken, düşük su içeriği tercih edildiğinde ise baskı başlığından harcın çıkma zorluğu ortaya çıkmaktadır.

### 3-d Baskılı Yüksek Performanslı Betonlar

Baskı teknolojisinin karakteristik özelliklerine bağlı olarak, bu yöntem ile elde edilen yapıların özel durumlarından kaynaklanan teknik durumlar da eklendiğinde inşaat verimliliğinin düştüğü tespit edilmiştir(Cao

et al., 2022). Bu problemin önüne geçmek için donatısız yüksek performanslı beton geliştirilmesi çabaları günümüzde artmıştır. Fiber katkılı yüksek performanslı betonlar bu çalışmalar örnek teşkil etmektedir. 3-D baskı betonlarında da fiber eklenmesi yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak fiberlerin doğrultusu büyük önem taşımaktadır. Le ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada fiber ekli baskı betonların basınç ve eğilme dayanımlarının dikey baskı doğrultularında arttığı tespit edilmiştir (Le et al., 2012). Alchaar ve Al-Tamimi ise yüksek sıcaklığın bu tür betonlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre, sıcaklığın  $45C^{\circ}$ 'ye yükseltilmesi, buharlaşma hızını arttırmış ve beklenildiği gibi yüzey nemi azaldığı için basınç ve iç katmanlar arası kesme dayanımları azalmıştır. Buna karşı olarak ise eğilme dayanımı (Şekil 4) düzgün fiber dağılımına da bağlı olarak artmıştır (Alchaar & Al-Tamimi, 2021). Singh ve arkadaşları ise çelik fiber ile güçlendirilmiş baskı betonları üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Yapılan çalışmanın birinde yükleme açıları 0 ile  $90C^{\circ}$  arasında seçilmiş ve normal beton ile karşılaştırıldığında, basınç dayanımındaki en yüksek artışın  $90C^{\circ}$ 'lik yükleme açısında elde edildiği sonucuna varılmıştır. Pham ve çalışma grubunun gerçekleştirdiği çalışmada ise uygun oranda ve uzunlukta çelik fiber eklentisinin 3-d baskı betonların eğilme dayanımını iyileştirdiğini göstermiştir (Pham et al., 2020).



Şekil 4: 3-d Baskı Beton Eğilme Testi (Alchaar & Al-Tamimi, 2021)

Yüksek performanslı beton yüksek basınç ve eğilme dayanımı özellikleri nedeniyle 3-d baskı betonlar için en uygun beton türü gibi görünse de yüksek akışkan yapıda olması baskı betonlar için büyük zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle baskı betonu olması için reolojik özelliklerinin iyileştirilerek en uygun mekanik dayanımları sağlaması amacıyla optimize

edilmesi gerekmektedir. Khayat ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 3-d baskı betonlarının reolojik özelliklerini incelemişler ve en uygun olarak bu teknolojilerin düşük ilk akma gerilmesine sahip karışımlarla yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır(Khayat et al., 2019). Gosselin ve arkadaşları ise en uygun karışımın pompalanabilirlik açısından düşük tane boyutlu, kritik kesme gerilmesine sahip ve geç sertleşme yeteneğine sahip olması gerektiğini vurgulamışlardır(Gosselin et al., 2016). Bu çalışma kapsamında üretilen akustik duvar elemanı Şekil 5'te sunulmuştur.



**Şekil 5:** Akustik Duvar Elemanı(Gosselin et al., 2016)



## SONUÇ ve DEĞERLENDİRMELER

Diğer metotlara göre nispeten yeni olan bu üretim teknolojisinin avantajlarının yanında birçok zayıflığının da bulunduğu yapılan inceleme ve analizler görülmektedir. Bu zayıflıklar bu tür betonların performanslarını kötü yönde etkilemektedir ve içlerindeki en önemlileri anizotropik yapıda malzeme olmalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı her yükleme yönünde stabil davranış göstermeleridir. 3-d baskı elemanlarıyla genel olarak iki tip eleman üretilmektedir bunlar basınca çalışan duvar, kolon vb yapılar ve eğilmeye çalışan döşeme ve kirişlerdir. Bunların malzeme özelliklerinin üretilecek karışıma daha uygun olabilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Ancak test yöntemlerinin gelecek çalışmalarda geliştirilmesine ve ortak kullanılacak standartların yürürlüğe girmesine ihtiyaç olduğu görülmektedir.



**KAYNAKÇA**

- Alchaar, A. S., & Al-Tamimi, A. K. (2021). Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures. *Construction and Building Materials*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120991>
- Bos, F. P., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., da Silva, W. R. L., Rehman, A. U., Weger, D., Wolfs, R. J. M., Zhang, Y., Ferrara, L., & Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
- Cao, X., Yu, S., Cui, H., & Li, Z. (2022). 3D Printing Devices and Reinforcing Techniques for Extruded Cement-Based Materials: A Review. In *Buildings* (Vol. 12, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/buildings12040453>
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., & Agustí-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 112). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- Ding, T., Xiao, J., Zou, S., & Wang, Y. (2020). Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand. *Cement and Concrete Composites*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103724>
- Ding, T., Xiao, J., Zou, S., & Yu, J. (2021). Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand. *Construction and Building Materials*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123077>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials and Design*, 100. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>
- Ji, G., Xiao, J., Zhi, P., Wu, Y. C., & Han, N. (2022). Effects of extrusion parameters on properties of 3D printing concrete with coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126740>
- Khayat, K. H., Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L. (2019). Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 124). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>
- Lan, T., Yang, S., Wang, M., Xu, M., Cheng, S., & Chen, Z. (2023). Prediction of interfacial tensile bond strength in 3D printed concrete based on a closed-form fracture model. *Journal of Building Engineering*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106411>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>

- Liu, C., Yue, S., Zhou, C., Sun, H., Deng, S., Gao, F., & Tan, Y. (2021). Anisotropic mechanical properties of extrusion-based 3D printed layered concrete. *Journal of Materials Science*, 56(30). <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06416-w>
- Liu, C., Zhang, R., Liu, H., He, C., Wang, Y., Wu, Y., Liu, S., Song, L., & Zuo, F. (2022). Analysis of the mechanical performance and damage mechanism for 3D printed concrete based on pore structure. *Construction and Building Materials*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125572>
- Liu, H., Liu, C., Bai, G., Wu, Y., He, C., Zhang, R., & Wang, Y. (2022). Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate. *Additive Manufacturing*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102843>
- Liu, H., Liu, C., Wu, Y., Bai, G., He, C., Zhang, R., & Wang, Y. (2022). Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106868>
- Liu, Z., Wang, Z., Wang, L., & Zhao, X. (2019). Interlayer Bond Strength of 3D Printing Cement Paste by Cross-Bonded Method. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*, 47(5). <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.2019.05.09>
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. (2018). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>
- Ma, L., Zhang, Q., Jia, Z., Liu, C., Deng, Z., & Zhang, Y. (2022). Effect of drying environment on mechanical properties, internal RH and pore structure of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125731>
- Napolitano, R., Forni, D., Menna, C., Asprone, D., & Cadoni, E. (2021). Dynamic characterization of the layer-interface properties of 3D-printed concrete elements. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00780>
- Napolitano, R., Menna, C., Forni, D., Asprone, D., & Cadoni, E. (2020). Dynamic Behaviour of Layered 3D Printed Concrete Elements. In *RILEM Bookseries* (Vol. 28). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_49)
- Pan, T., Jiang, Y., He, H., Wang, Y., & Yin, K. (2021). Effect of structural build-up on interlayer bond strength of 3d printed cement mortars. *Materials*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/ma14020236>
- Pan, Z., Si, D., Tao, J., & Xiao, J. (2023). Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01949>

- Panda, B., Chandra Paul, S., & Jen Tan, M. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D., & Tan, M. J. (2018). Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.051>
- Papachristoforou, M., Mitsopoulos, V., & Stefanidou, M. (2018). Evaluation of workability parameters in 3D printing concrete. *Procedia Structural Integrity*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.023>
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- Pessoa, S., Guimarães, A. S., Lucas, S. S., & Simões, N. (2021). 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 141). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>
- Pham, L., Tran, P., & Sanjayan, J. (2020). Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>
- Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., & Ghani, Z. (2019). Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
- Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M., & Marchment, T. (2018). Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232>
- Shi, Q., Wan, S., Wang, Q., Tao, Y., & Huo, J. (2023). Experimental investigations on the influence of nozzle travel speed and height on the mechanical properties of 3D printed concrete. *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*, 40(4). <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220607.001>
- Sun, X., Le, K., Wang, H., Zhang, Z., & Chen, L. (2020). Influence of Extruded Strip Shape and Dimension on the Mechanical Properties of 3D Printed Concrete. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*, 23(6). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.06.008>
- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>

- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., & Salet, T. A. M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
- Wu, Y. C., Yang, Q., Kong, X., Zhi, P., & Xiao, J. (2021). Uncertainty quantification for the representative volume element of geometrically monoclinic 3D printed concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 226–227. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111102>
- Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., Wang, L., Ding, T., Duan, Z., & Du, S. (2021). Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities. In *Cement and Concrete Composites* (Vol. 122). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>
- Xiao, J., Lv, Z., Duan, Z., & Hou, S. (2022). Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations. *Journal of Building Engineering*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104282>
- Yan, P., Wu, J., Lin, D., & Liu, X. (2022). Uniaxial compressive stress–strain relationship of mixed recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128663>
- Yang, L., Sepasgozar, S. M. E., Shirovzhan, S., Kashani, A., & Edwards, D. (2023). Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete. In *Automation in Construction* (Vol. 146). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104671>
- Zhang, Y., Zhang, Y., She, W., Yang, L., Liu, G., & Yang, Y. (2019). Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete. *Construction and Building Materials*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.061>



# **BİTKİSEL ATIK KÜLÜNÜN YAPI MALZEMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ**

*Aylin AKYILDIZ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [aakyildiz@nku.edu.tr](mailto:aakyildiz@nku.edu.tr)

ORCID: 0000-0003-2739-0689

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı bir şekilde ilerlediği günümüzde inşaat sektöründe bu gelişmelerden etkilenmiştir. Teknolojideki ilerlemeler betonda kullanılan malzemelerin kalitesini arttırdığı gibi, aynı zamanda betona yeni özelliklerin, yeni bileşimlerin oluşmasına olanak sağlamıştır. Dünya nüfusunun artması ile birlikte daha fazla barınma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Dünya nüfusunun artması ve kentleşme süreci beton malzemesinin kullanımını arttırmıştır [1].

İnşaat sektörü, bugün dünyadaki bazı doğal kaynakları ve enerjiyi kullanmaktadır. Yapı malzemelerinin çevre dostu kaynaklarına duyulan ihtiyaç, çimentonun çevresel etkisini azaltarak alternatif malzemelerin geliştirilmesini sağlamıştır. Binalarda, çevre dostu, dayanımlı, dayanıklı, tekrar kullanılabilir, bileşiminde geri dönüştürülebilir malzemelerin bulunduğu, yerel malzemelerin kullanıldığı ve çevreye verilen zararın en az olduğu malzemelerin kullanılması önemlidir [2].

Son dönemlerde küresel ısınma ve iklim değişikliği tüm ülkelerin ilgilendiği bir sorun haline gelmiştir. Küresel ısınmaya neden olan gazların başında sera gazı gelmektedir. Sera gazı etkisini arttıran gazların başında CO<sub>2</sub> gelmektedir [3]. Çimento sektörünün insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının %5'inden sorumlu olduğu bilinmektedir [4]. Bu yüksek karbon ayak izi, çimentonun üretim sürecindeki büyük miktardaki enerji tüketimi ve çevreyi etkileyen bir ürün olarak karbondioksit salınımıyla ilişkilendirilebilir. Bu nedenle çeşitli atık malzemelerin betonda kısmen çimento yerine kullanılarak değerlendirilmesi bu tür olumsuz etkilerin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Beton karışımındaki çimentonun kısmen değiştirilmesinde çeşitli kül veya toz formlarındaki farklı türdeki atık maddelerden yararlanılmaktadır [5]. Kısmi ikame malzemelerinin bazıları silis dumanı [6], kömür külü [7], öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu [8], çeltik sapı külü [9], pirinç kabuğu külü [10], vb.

Modern toplumlarda, inşaat sektöründe atıkların ikincil malzeme olarak kullanılması ekolojik açıdan önemli bir atık bertaraf yöntemidir. Sürdürülebilirlik inşaat sektöründe kritik hale gelmiştir ve mevcut inşaat süreçlerinin çevresel etkilerini azaltmak için çeşitli çözümler geliştirilmiştir [11]. Çimentoyu doğal puzolan, kil, tarımsal atık gibi malzemelerle değiştirerek bu etkiyi azaltmak kritik öneme sahiptir [12, 13].

Çağımızda beton çeşitleri her geçen gün artmaktadır. Yeni teknolojilerin gelişmesi bu artışı tetiklemektedir. Buna bağlı olarak ihtiyaç duyulan çimento çeşidi ve üretimi artmaktadır. Bunun sonucunda beton üretiminde kullanılan temel malzeme olan çimento üretimi de lineer olarak artmıştır. Çimento üretiminde ekonomi sağlamak ve özelliklerini geliştirmek, dayanımını arttırmak amacıyla beton üretiminde çimentoya

ilave olarak puzolanik özellikte mineral malzemeler eklenmektedir. Bu minerallerden birkaçı puzolan olarak bilinir ve kendi başlarına bağlayıcı niteliklere sahip olmasalar da çimento ile birleştiklerinde reaksiyona girerek hidrasyon ürünleri oluştururlar. Bu katkılar çoğunlukla akışkanlığı, dayanıklılığı ve dayanımı için kullanılırlar. Betonun mikro yapısını iyileştirip geçirgenliğini azaltarak betona su girişini en aza indirirler [14].

Alternatif bağlayıcı veya çimento yerine geçen malzemelerin araştırılması, endüstriyel yan ürünlerin ve tarımsal atıkların çimentolu malzeme olarak kullanılma potansiyellerinin keşfedilmesine yol açmıştır. Bu dolgu maddeleri puzolanik özelliklere sahipse, elde edilen betona teknik avantajlar kazandırır ve ayrıca daha büyük miktarlarda çimento ikamesinin elde edilmesini sağlar [15]. Bu araştırma tarımsal atıkların çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilirliğini araştırmaktadır.

Mısır koçanı genellikle çeşitli endüstrilerde yakacak odun olarak kullanılmaktadır. Bu mısır koçanından üretilen kül daha sonra toprak dolgularına boşaltılıyor ve bu da çevre sorunlarına neden olmaktadır. Biyokütle- nin yakılması, özellikle tarım yapılan ülkelerde önemli bir çevre sorunudur ve kirlilik düzeylerini, belirsiz durumları ve halk sağlığı açısından olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Mahsul yataklarının açık alanda yakılması tarıma dayalı ülkelerdeki biyokütle emisyonlarının büyük bir bileşenini oluşturmaktadır [16]. Bu muazzam miktardaki mısır, yaklaşık olarak aynı miktarda mısır koçanı üretmektedir. Mısır koçanı, mısır mahsulünden elde edilen bir mahsul artığı ve tarımsal atıktır. Sonuç olarak, bu atık malzemelerin beton karışımlarına dahil edilmesi, atık yönetimine yardımcı olacak ve aynı zamanda beton karışımlarındaki bileşenlerin yerine geçecektir. Külün mali değeri düşük olduğundan, ekolojik kirliliğe neden olacak şekilde çöp sahasına atılması yerine inşaat malzemesi olarak kullanılması büyük faydalar sağlayacaktır [17, 18].

## 2. MATERYAL VE METOD

Harcın üretiminde Rilem kumu (TS EN 196-1) [19] kullanılmıştır ve kullanılan kumunun granülometrisi Tablo 1’de verilmiştir.

*Tablo 1. Rilem kumu granülometrisi*

Elek Boyutları (mm)	0.08	0.16	0.5	1	1.6	2.00
Kümülatif Elekte Kalan	99±1	87±2	67±2	33±2	7±2	0

Bu çalışmada, harç karışımlarında kullanılan çimento CEM I 42.5 R (TS EN 197-1 [20]) kullanılmıştır. Çimentonun özellikleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Çimentonun deney sonuçları

Kimyasal Özellikler	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42.5 R
	CaO	63,90
	SiO <sub>2</sub>	16,80
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,55
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,81
	Na <sub>2</sub> O	0,74
	K <sub>2</sub> O	1,24
	MgO	1,94
	MnO	0,12
	SO <sub>3</sub>	3,02
	Cl-	0,01
	Kükürt (S)	-
	Kızdırma Kaybı	1,24
Serbest Kireç	1,90	
Çözünmeyen Kalıntı	0,44	
Fiziksel Özellikler	Özgül Yüzey, cm <sup>2</sup> /g	3320
	Özgül Ağırlık	3,15

Deneylerde kullanılan külü elde etmek için, Tekirdağ'da üretilen mısır hasadı sonrasında mısır koçanları kullanılmıştır. Karışımlarda mısır koçanı külü puzolan materyal olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan mısır koçanı külü Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Mısır koçanı külü

## 2.1. Harç Üretimi

Yapılan harç karışımlarında su:çimento:agrega oranları, TS EN 196-1'e göre kullanılmıştır. Mısır koçanı külünün harç üretimindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, yapılan harç karışımlarında mısır koçanı külü sırasıyla %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek katkılı numuneler hazırlanmıştır. Üretilen numunelerdeki harç karışım oranları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Harç Karışım oranları.

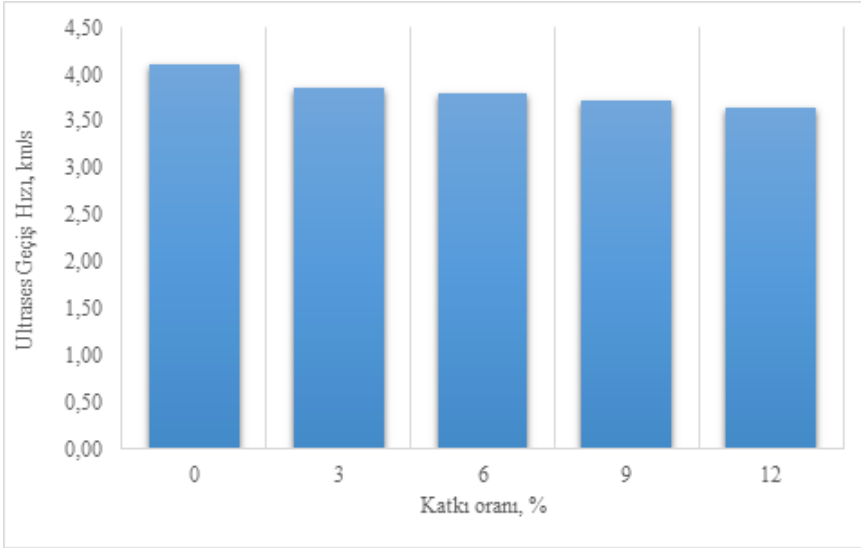
Katkı Oranı, %	Mısır koçanı külü, g	Çimento, g	Su, g	Kum, g
0	-	450.0	225	1350
3	13.5	436.5	225	1350
6	27.0	423.0	225	1350
9	40.5	409.5	225	1350
12	54.0	396.0	225	1350

Tablo 1 karışım oranlarına göre üretilen harç 40×40×160 mm prizma kalıplarına yerleştirilmiştir. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak, deneyin yapılacağı 28 güne kadar kür havuzuna bekletilmiştir. Hazırlanan harç numuneleri kür süresi sonunda (28 gün) TS EN 12504-4 [21] standardına uygun olarak ilk önce ultrases geçiş hızı deneyi yapılmıştır. Daha sonra numunelere eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyinden elde edilen ikiye bölünmüş harç numunelerinde standarda uygun olarak basınç deneyi yapılmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

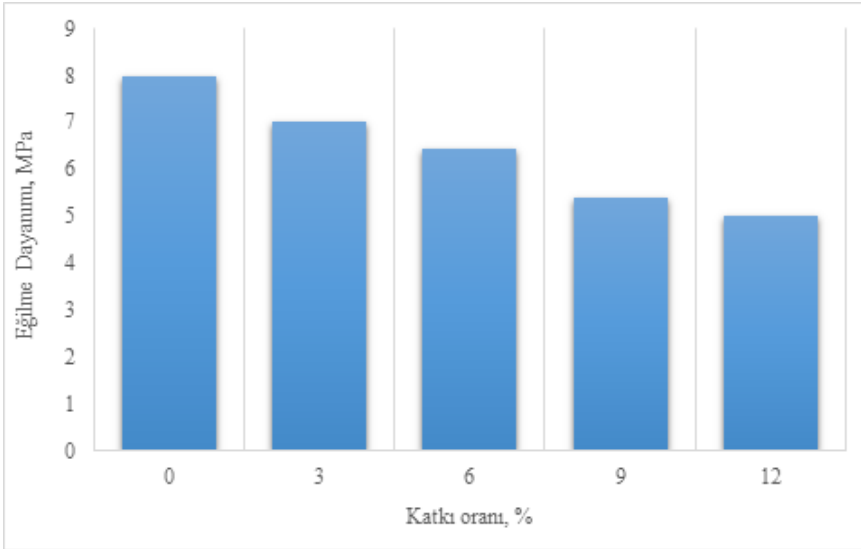
Mısır koçanı külünü %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek hazırlanan harç numunelerinde, yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının değerlendirmeleri yapılmıştır.

Mısır koçanı külü katkılı harç numunelerine ait ultrases geçiş hızı deney sonuçları Şekil 2'de görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, mısır koçanı külü katkılı numunelerde ultrases geçiş hızı 4.1 km/s ile 3.65 km/s arasında değişmektedir. Referans numunelerinin ortalama ultrases geçiş hızı 3.9 km/s bulunmuştur. Mısır koçanı külü katkı oranı arttıkça ultrases geçiş hızında azalma meydana gelmiştir. %12 kül katkılı numunelerin ortalama geçiş hızı 3.65 km/s olarak bulunmuştur. **Çimento ile** %12 oranında mısır koçanı külü yer değiştirmeli numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarında, referans numunelerin ortalama ultrases geçiş hızlarına göre %11 azalma meydana gelmiştir.



şekil 2. Ultras es Geçiş Hızı

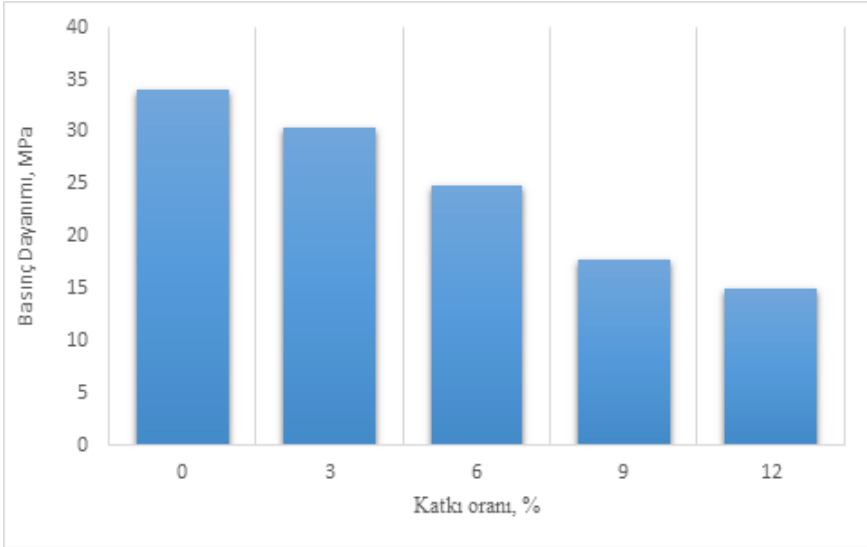
Mısır koçanı külü katkılı numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları şekil 3’de verilmiştir. Katkılı numunelerde eğilme dayanımı 5 MPa-7 MPa arasında değişmektedir. Eğilme dayanımı deneyinde, en yüksek değere %3 katkılı numune 7 MPa ile ulaşmıştır. Referans numunesine ait dayanım 8 MPa olarak bulunmuştur. %3 oranında kül katkılı numunede eğilme dayanım değeri en yüksek olarak elde edilmiştir. Mısır koçanı külü katkı oranı arttıkça eğilme dayanımında düşüş meydana gelmiştir.



şekil 3. Eğilme dayanımı

Basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4’de verilmiştir. Katkılı numunelerde basınç dayanımı 15 MPa - 34 MPa arasında değişmektedir. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına baktığımızda, katkısız referans numunesine yakın en yüksek değeri %3 mısır koçanı külü eklenmiş numune ulaşmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde; harç numunelerinde eklenen mısır koçanı külü oranı arttıkça, basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Basınç dayanım sonuçlarında, %3 kül katkılı numune 31 MPa değeriyle %0 katkılı referans numunesine yakın en yüksek değeri almıştır. %9 kül ilaveli numuneden itibaren basınç dayanım değerlerinde %50 oranında azalma görülmüştür. %0 referans harç numunesinde basınç dayanımı 34 MPa iken, %12 kül ilaveli numunede basınç dayanımı %56 oranında azalarak 15 MPa bulunmuştur.



Şekil 3. Basınç dayanımı

#### 4. SONUÇLAR

Modern toplumlarda, inşaat sektöründe atıkların ikincil malzeme olarak kullanılması ekolojik açıdan önemli bir atık bertaraf yöntemidir. Sürdürülebilirlik inşaat sektöründe kritik hale gelmiştir ve çözümler geliştirilmiştir. Çimentoyu atıklar ile değiştirerek çevresel zararını azaltmak kritik öneme sahiptir. Bu araştırma tarımsal atıkların çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Mısır koçanı külü %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek hazırlanan harç numunelerinde, yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının değerlendirmeleri yapılmıştır.

- Sonuçlara bakıldığında, **mısır koçanı külü** katkılı numunelerde ultrases geçiş hızı 4.1 km/s ile 3.65 km/s arasında değişmektedir. Mısır koçanı külü katkı oranı arttıkça ultrases geçiş hızında azalma görülmüştür.
- Katkılı numunelerde eğilme dayanımı 5 MPa-7 MPa arasında değişmektedir. Eğilme dayanımı en yüksek harç numunesi %3 kül katkılı numunede elde edilmiştir.
- Katkılı numunelerde basınç dayanımı 15 MPa - 34 MPa arasında değişmektedir. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına baktığımızda, katkısız referans numunesine yakın en yüksek değeri %3 mısır koçanı külü katkılı numune ulaşmıştır.
- Yapılan deneysel çalışmaları göz önüne alındığında, %3 mısır koçanı külü katkılı numunelerin ultrases geçiş süreleri, basınç ve eğilme dayanımı incelendiğinde harç üretiminde kullanılabilceği görülmüştür.
- Sonuç olarak, atık malzemelerin beton karışımlarına dahil edilmesi, atık yönetimine yardımcı olacak ve aynı zamanda beton karışımlarındaki bileşenlerin yerine geçecektir. Külün mali değeri düşük olduğundan, ekolojik kirliliğe neden olacak şekilde çöp sahasına atılması yerine inşaat malzemesi olarak kullanılması çevre kirliliğini azalttığı gibi büyük faydalar sağlayacaktır.

**KAYNAKLAR**

- [1] Bozkurt N., Sayın N. (2021). Günümüz Teknolojileri Çerçevesinde Çimento Dünyasındaki Gelişmelerin Araştırılması Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9, 1159-1173
- [2] Akyıldız A., Tınmaz K. E., (2017). Waste Materials in Concrete, International Scientific Conference.
- [3] Kara G., İbiç A., Yağcıoğlu E. (2018). Çimento Sektöründen Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 1(2), 87-90.
- [4] Köse T. E., Akyıldız A. (2017). Kırmızı çamurun çimento bazlı solidifikasyon/stabilizasyonu:Ağır metallerin sızma özellikleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(6), 741-747.
- [5] Akyıldız A. (2012). Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [6] Khan M. I., Siddique R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. Resources, Conservation and Recycling, 57, 30-35
- [7] Tınmaz Kose E., Akyildiz A. and Yildiz A. (2013). Recycling of coal ash as a building material via a stabilization/solidification method. Globalnest Journal, 15(4), 485 - 493
- [8] Akyıldız A., (2018). Water Absorption and Sorptivity Properties of Concrete Containing Granulated Blast Furnace Slag. Iosr Journal of Mechanical and Civil Engineering, 15(6), 66-69
- [9] Kıvrak S. O., Başyığıt C. (2012). Çeltik Sapı Külü Elde Edilmesinde Puzolanlık Açısından Uygun Yakma Sıcaklığı Araştırılması, SDU International Technologic Science, 4(3), 94-101
- [10] Kazmi SMS, Abbas S, Munir MJ, Khitab A. “Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks”. Journal of Building Engineering, 7, 372–378, 2016.
- [11] İpekçi C. A., Coşkun N., Karadayı T.T. (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi, TÜBAV, 10(12), 43-50
- [12] Demir İ., Elmalı M. (2020). Organik Atıkların Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8(4), 1303 – 1311
- [13] Alex J, Dhanalakshimi J, Ambedkar B. (2016). Experimental investigation on rice husk ash as cement replacement on concrete production”. Construction and Building Materials, 127, 353–362.
- [14] Özcan U., Güngör S. (2019). Sürdürülebilir Bir Yöntem / Betonda Puzolan Kullanımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Sayı 15, S. 176-182.

- [15] Zaki A., Sola Ö. Ç. (2020). Pirinç Kabuğu Külü Katkılı Harçların Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerin Araştırılması. ALKU Journal of Science , 2(2), 54-61
- [16] Yaman K. (2012). Bitkisel Atıkların Değerlendirilmesi ve Ekonomik Önemi. Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 12(2), 339-348
- [17] Gradinaru C M, Barbuta M, Ciocan V, Serbanoiu A A and Gradinaru A C 2017 Health and environmental effects of heavy metals resulted from fly ash and cement obtaining and trials to reduce their pollutant concentration by a process of combining-exclusion SGEM2017 Conference Proceedings 17(52) 441-448
- [18] Bucur R D, Barbuta M, Konvalina P, Serbanoiu A A and Bernas J 2017 Studies for understanding effects of additions on the strength of cement concrete IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 246(1) 012036
- [19] TS EN 196-1 Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [20] TS EN 197-1 Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [21] TS EN 12504-4 Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



## YAPILARDA 3 BOYUTLU BASKI TEKNOLOJİSİ

*Aylin AKYILDIZ<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [aakyildiz@nku.edu.tr](mailto:aakyildiz@nku.edu.tr)

ORCID: 0000-0003-2739-0689

## 1. GİRİŞ

1983 yılında ilk 3D yazıcının icat edilmesiyle 3D baskı teknolojisi son yıllarda en hızlı büyüyen ve gelişen teknolojilerden olmuştur. 1987 yılında hızlı prototipleme olarak 3 boyutlu baskı teknolojisi tanıtılmıştır [1]. Keşfedildiği ilk zamanlarda hem pahalı hem de karmaşık bir yapıdayken, yıllar içerisinde günlük yaşamda bile kullanılabilir hale gelmiştir. Son birkaç yıldır 3D baskı teknolojisi, düşük maliyet, yüksek verimlilik, güçlü tasarım ve güvenilir kalite avantajlarıyla mimari tasarım, endüstriyel üretim, havacılık, biyolojik mühendislik, kültürel kalıntıların korunması ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

Son yıllarda, yaygın olarak 3D baskı olarak bilinen katmanlı üretim, bir çizimi bir nesneye dönüştürme yeteneği nedeniyle dünyanın her yerinden araştırmacıların dikkatini çekti. 3D baskı, üç boyutlu dijital çizimleri, 3 boyutlu yazıcı aracılığıyla kullanıcıların istediği şekilde üç boyutlu şekillere dönüştüren bir teknolojidir [3, 4]. Bu teknoloji, yazıcıların ve malzemelerinin geliştirilmesiyle 2014 yılında inşaat sektöründe büyük bir yenilik sağlamıştır. Bu tarihlerde 3D yazıcı ile ilk mimari yapının basılması yapılmıştır ve bina yapım teknolojisinde yeni bir çağ başlamıştır. Rusya'da 298,5 m<sup>2</sup> alana sahip Yaroslavl konut projesi, 3D teknolojisi kullanılarak inşa edilen ilk yapıdır [5].



Şekil 1. 3D yazıcı ile ilk mimari yapı [5].

Dünyada 3D olarak basılan toplam uzunluğu 12 metre, genişliği 1,75 metre olan ve mikro betonarme baskılı ilk yaya köprüsü, 2017 Madrid'in Alcobendas kentindeki Castilla-La Mancha şehir parkında bulunmaktadır [6].



*Şekil 2. Madrid'de 3D olarak basılan köprü [6].*

İnşaat sektörü, ilk dönemlerinde killi toprak, çamur gibi malzemelerinin kullanılmasıyla başlayarak, tekniklerin, malzemelerin çeşitli dönüşümlerine tanık olmuştur. Teknolojinin gelişmesi ile geleneksel ve yaygın olarak kullanılan beton malzemesi, artık dünya daha da gelişmeyi hedeflemektedir. Bugün beton, sudan sonra yeryüzünde en çok tüketilen ikinci malzeme olmuştur, dünyamız beton üzerine inşa edilmiştir.

Gelecek, inşaat teknikleri ve malzemelerinin sürdürülebilir bir biçimini kullanılabilirliğini; gelişen teknolojiyle birleştirildiğinde performans ve kullanım ömrü açısından çok daha verimli olacaktır.

Bu gelecek vaat eden inşaat tekniği, planlanan dijital inşaat verilerini robotik asistan kullanılarak şantiyede otomatik üretime dönüştürebilen modern bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Bu gerçek anlamda otomatikleştirilmiş tekniğin geleneksel yöntemlerin yerini alması zaman alacaktır, ancak bunlar yavaş ve istikrarlı bir şekilde inşaat sektörünün gelişmesini sağlayacaktır.

3D baskı, en verimli inşaat biçimlerinden biridir. Daha iyi üretkenliğe, düşük maliyete, daha hızlı inşaata sahiptir, daha az atık üretir, daha az karbon ayak izine sahiptir ve tasarımda geometrik özgürlük sağlamaktadır [7].

3D kompozitler, süper ince çelik, güneş enerjisi betonu, Kenevir betonu vb. gibi farklı sürdürülebilir malzemelerden bahsetmek, sonunda sürdürülebilirliğin yeni standartlarını belirleyecek malzemelerdir. Ancak şu anda teknoloji dünyanın yapısal ihtiyaçları bağlamında kendini geliştirdiği

için bunların 3D baskıyla birleşiminin araştırılması gerekiyor ve dolayısıyla yapısal olarak daha istenen özelliklere sahip malzemeler araştırılmalıdır.

Bu nedenle, genel araştırma alanı, gelecek teknolojinin geleneksel inşaat yöntemlerinin yerini nasıl alacağına ve daha büyük bir maddi güçle birlikte yeşil ve sürdürülebilir bir geleceğe nasıl ilerleyeceğine ve böylece insanlığı gelecekteki doğal afetlere nasıl hazırlayacağına hedeflenmelidir.

Günümüzde birçok sektörde büyük ilerleme gösteren ve yeni bir sanayi devrimi olarak adlandırılan 3D baskı beton teknolojisi farklı hammaddelerin bir araya getirerek bilgisayar destekli tasarım modellerini somut nesnelere dönüştürme amaçlı yapılan bir işlemdir.

Birçok sektörde yeniliklere yol açan 3D baskı teknolojisi inşaat sektöründe ise bilgisayar destekli robotik kol yardımı ile betonun hassas bir şekilde döküldüğü bir inşaat yöntemi hem mimari hem de yapısal tasarımda daha fazla özgürlüğe, düşük maliyete ve yüksek hız olarak sektörde ilerlemeler açacaktır. Önceden çizilen iki boyutlu çizimlerin yerine 3D modeller kullanılmaktadır. Dijital modelleme yöntemleri ile mimarlar ve mühendisler projelerdeki gerekli yapılması gereken değişiklikleri önceden görme imkanı sağlamakta ve uygulama öncesi doğabilecek sıkıntıları önceden görme imkanı sağlamaktadır.

3D baskı beton teknoloisi ilk çalışmalar 1980lerde Japon bir şirket tarafından yapılan görevli robotlar, şantiyelerde zemin boyaması, seramik kontrolü gibi basit işler yapmıştır [8]. 3D baskı beton teknolojisinin bilinen ilk tekniği 1998 yılında Khoshnevis'in Contour Crafting ile polimer, bulamaç, seramik, çimento ve çeşitli diğer malzemeler kullanılarak katmanlı bir imalat yapmıştır [9]. 3D baskı beton teknolojisi inşaat kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır şu anda bilinen yayalar ve çok katlı bina için köprüler, Ofis binaları, evler ve daha da ileri taşınıp NASA uzay araştırmaları tarafından finanse edilen Mars'taki yaşam için yapılan alanların inşasında kullanım için çalışmalar başlamıştır [10].

İnşaat için kullanımda süreç adım adım betonların katmanlardan oluşması teknolojisine dayanmaktadır. Eklenme sırasında beton katman katman olduğundan alt katmanlar üst katmanın ağırlığını taşımaktadır yani betonun reolojik olması için bazı özelliklere de sahip olması gerekmektedir. Pompolanabilirliği belirleyen kesme dayanımı ve plastik vizkozite gibi davranış performansları önemli etkenlerdir [11]. Betonun taze işlenebilirlik ve reolojik özellikleri bilinmesi bu yöntemde çok önemlidir ve bundan dolayı bunun üzerine birçok araştırma yapılmış ve yapılmaktadır [12, 13]. Betonun reolojik özelliğini bileşenler, bileşenlerin miktarı, toplam partikül boyutları ve kullanılan kimyasalların etkilendiğinden dolayı bunlarla ilgili çok çalışmalar yapılmıştır [14]. Viskozite ve pompolanabilirlik çalışmaları da önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak sertleşme ve

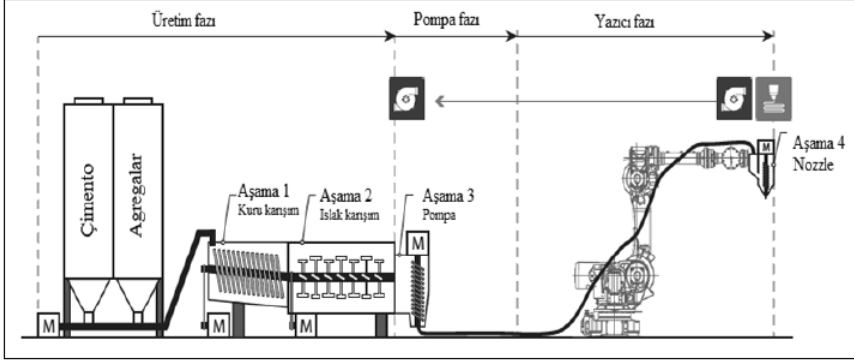
betonun mekanik davranışı üzerine de birçok çalışma yapılmıştır [15]. Beton yazıcılar ile daha kolay karmaşık şekiller üretileceğinden kalıp kısıtlamaları olmaksızın ürünler tasarlanabilmektedir. Bu şekilde özgür mimari çalışmalar yapılabilmektedir [16]. Robotlarla üretimde betonun vibrasyonla yerleşimine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ve en önemlisi yedi gün yirmi dört saat çalışmaya müsait olmasıdır.



*Şekil 3. 3D baskı beton ile üretilmiş duvar [16].*

## 2. 3D BASKI BETON YAZICISININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Ana çalışma prensibi, yapılandırılmış beton bulamacının, önceden belirlenmiş ayarlara göre 3D yazılımın kontrolü altında ekstrüzyon cihazından geçirilmesidir. İyi bir baskı programı, baskı için bir nozul tarafından ekstrüde edilir ve son olarak tasarlanan beton bileşen elde edilir. Bilgisayar ortamında tasarlanan çizimler, 3D yazıcılarda çimento esaslı harç su ve ince agrega karışımından oluşan malzemesi kullanılmaktadır. Katmanlı üretim yapacak olan yazıcının yazdırma işlemi, üç farklı faz ve dört aşamadan meydana gelmektedir. Bu aşamalar Şekil 4 görülmektedir. Üretim fazında baskı işleminde kullanılacak olan harcı oluşturan malzemeler iki farklı beslenme tankına yerleştirilir. İlk aşamada bu malzemelerden kuru karışım, ikinci aşamada ise ıslak karışım hazırlanır. Pompa fazına geçildiğinde üçüncü aşama olan pompa devreye girer ve pompalama sırasında malzemeler bir borudan geçerek nozula aktarılır. Yazıcı fazı ise pompayla iletilen harcın son aşamadaki nozul olarak adlandırılan hareketli noktalara (extruding) sıkılma işlemiyle gerçekleştirilir [17].



Şekil 4. 3 D baskı yazıcı şematik gösterimi [17].

Geleneksel inşaat formlarıyla karşılaştırıldığında 3D baskı beton teknolojisi, karmaşık yapılara uygulandığında daha az enerji tüketir ve 3D baskı beton teknolojisi, yapıyı çalışma koşullarına göre optimize edebilir. 3D baskı beton teknolojisinin geniş ölçekli uygulanması ve teşvik edilmesiyle, bina inşaatı sürecinde malzeme, personel ve makine girdisi etkili bir şekilde azaltılabilir ve dijital ve akıllı bina inşaat teknolojisinin geliştirilmesi teşvik edilebilir.

### 3. KULLANILAN BETON VE ÖZELLİKLERİ

3D beton yazıcı teknolojisi, geleneksel beton karışımlarının tasarım ve üretim süreçlerine göre yeniden düzenlenmesini gerektirmektedir. Kullanılacak beton karışımlarının yüksek performanslı, elyaf takviyeli, ince agregalı betonun karışım tasarımı ve beton özellikleri nozuldan ekstrüde edilecek şekilde hazırlanmalıdır [18].

Betonun yazım sürecinde en önemli kriterler, pompalanabilirlik ve inşa edilebilirlik (katların kendi kendini taşıması) olduğu yapılan çalışmalarda anlaşılmıştır. Ekstrüzyon betonun, beton pompasından, iletim hortumlarından ve püskürtücü nozuldan geçme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır.

Betonun işlenebilirliği karışım oranları ile direkt bağlantılıdır. Çimento esaslı bağlayıcı/agrega oranı, su/bağlayıcı oranı, katkı kullanımı, lif kullanımı miktarlarıdır. İyi ekstrüzyon edilebilirlik kendiliğinden yerleşen beton ve püskürtme beton ilkelerini karışım tasarımına birlikte uygulayarak başarılmıştır [19]. Betonun nozuldan ekstrüde edilmesi önemlidir. Betonun viskozitesi, yeterli yapışma süresi kritik önemlidir. Katmanlar birbirini taşımasından dolayı pompanın iletimi, boruların tıkanmaması, pompa gücünün yeterli olması ve yüksek viskozite araştırılması oldukça önemli konulardan biri olmuştur. Katmanların birbirine yapışmaması priz süresinin hızlı olmasına ihtiyaç duyuyor bunun içinde gerekli olan kimyasallar kullanılmaktadır. Yazım aşamasında katmanların birbirini aşmaması,

alt tabakaların üst tabaka baskısının ağırlığıyla minimum deformasyona uğraması, aynı zamanda alt tabakanın üst tabakalarla aderans sağlaması, betonun işlenebilirlik ve çalışma süresine bağlıdır. Aynı zamanında betonun akış hızı, uygun işlenebilirlik bu durumda ters etkiler yapabilir. Betonun kıvamı pompalanabilirlik özelliği aksine çevirip tıkanmaya yol açabilir. Tabakalar arası taşıma kabiliyeti betonun kayma gerilmesine bağlı olduğu ve zamana yenik düşmeden yıkılmadan devam emesi için kayma gerilmesi iyi biçimde ayarlanmalıdır. Bunun için dengeli hassas bir beton karışımı bulunması şarttır.



Şekil 5. Katmanlar [20].

#### 4. TÜRKİYE' DEKİ VE DÜNYADAKİ ÖRNEKLER

MX3D adlı Hollandalı bir şirket tarafından oluşturulan köprü, Amsterdam'ın Red Light District bölgesindeki Oudezijds Achterburgwal kanalı üzerine kurulmuştur. Dünyanın 12.5 metre uzunluğu ve 63 metre genişliği ilk 3D baskılı çelik yaya köprüsü Amsterdam'da üzerinde bulunan misafirleri güvenle taşınmaktadır [21]. Çelik Köprü, dört endüstriyel robot tarafından inşa edilmiştir. 4 yıl yapım aşamasında olan köprünün basılması ise altı ay sürmüştür.



Şekil 6. 3D yazıcı ile yapılan ilk çelik köprü [21].

Dubai’de tamamen 3D yazıcılar ile üretilmiş ofis binaları inşa edilmiştir. “Geleceğin Ofisi” olarak adlandırılan iş merkezi, 17 saatte üretilmiş ofis binası Şekil 7’de görülmektedir [22]. Projenin işgücü maliyetlerini %50-%80, inşaat malzeme kullanımını ise %30-%60 oranında düşürdüğü belirtilmiştir.



Şekil 7. Tamamen 3D yazıcılar ile üretilmiş Ofis binaları [22]

3D yazıcı kullanarak yapı üretimi projelerini öncelikle NASA başlatmıştır. NASA Dünya dışı üs kurma hedefi ile düzenlediği bir yarışmada 3D yazıcılar ile üretilmiş yaşam alanlarının kurulması hedefi olan bir amaçlamıştır. Yarışmada, yaşam alanı için mimari proje, yapım süreci, yapım tekniği ve 3D baskı teknolojilerinin kullanımı bulunmaktadır. Şekil 8’de yarışmalara katılmış proje örnekleri görülmektedir [23].



Şekil 8. Proje Örnekleri [23]

Dünyanın en büyük yaya köprüsü Çin’de yapılmıştır. 2019 yılında 26.3 metre uzunluğunda bir köprü inşa edilmiştir (Şekil 9). Tsinghua Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Profesör Xu Weiguo’nun üniversitedeki ekibi tarafından tasarlanan ve Shanghai Wisdom Bay Investment Management Company tarafından inşa edilen 3.6 metre genişliğindeki yaya köprüsü mercandan esinlenilmiştir. Köprü 450 saatin altında bir zamanda

(19 günden az) tamamlanmıştır. Maliyeti geleneksel metodlara göre üçte bir fiyatına mal edilmiştir [24]



Şekil 9. [24]

Fransa’da 3D yazıcı kullanılarak üretilen 95 metrekarelik 4 odalı ev, zeminden tavana doğru yazılmaya başlanmıştır ve 54 saatte bitirilmiştir. Kapı, pencere ve çatının da yerine yerleştirilmesiyle yapı 4 ayda bitirilmiştir [25]. Basılan ev, normal inşaat maliyetinden yüzde 20 daha kârlı olduğu belirtilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. [25]

Türkiye’de üç boyutlu yazıcı ile inşa edilen ilk ev, İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSTON tarafından, Tuzla’da üç oda bir salondan oluşan bir konut inşaatıdır (Şekil 11). Türkiye’de bir ilk olarak inşa edilen binanın yapımı bir hafta sürerken, inşaat sırasında yerli üretim olan üç boyutlu yazıcı robot kullanıldı [26].



Şekil 11. [26]

## 5. SONUÇ

Gelecek, inşaat teknikleri ve malzemelerinin sürdürülebilir bir biçimini kullanılabilirliğini; gelişen teknolojiyle birleştirildiğinde performans ve kullanım ömrü açısından çok daha verimli daha az karbon salınımı vb. gibi olacaktır. Bu gelecek vaat eden inşaat tekniği, planlanan dijital inşaat verilerini robotik asistan kullanılarak şantiyede otomatik üretime dönüştürebilen modern bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Bu gerçek anlamda otomatikleştirilmiş tekniğin geleneksel yöntemlerin yerini alması zaman alacaktır, ancak bunlar yavaş ve istikrarlı bir şekilde inşaat sektörünün gelişmesini sağlayacaktır. 3D baskı, en verimli inşaat biçimlerinden biridir. Daha iyi üretkenliğe, daha düşük maliyete, daha hızlı inşaata ve tasarımda geometrik özgürlük sağlayacaktır.



**KAYNAKLAR**

- [1] Uygunoğlu T., Özgüven S. B., Topçu İ. B. (2019). 3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 279-288.
- [2] Felek S. Ö. (2019). Mimari Yapılarda 3 Boyutlu Yazıcıların Kullanımı. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 289-296.
- [3] Bogue R. (2013). 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing?. *Assembly Automation*, 33(4), 307-311.
- [4] Wolf R.J.M. (2015). 3D Printing of Concrete Structures, Eindhoven University of Technology Department of the Built Environment, Graduation Thesis.
- [5] Felek S. Ö. (2021). 3 Boyutlu yazıcıların mimari yapılarda kullanımı. *Şantiye Dergisi*, 338, 76-79.
- [6] Anjum T., Dongre P., Misbah F., and Nanyam VPS. N. (2017). Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. *Procedia Engineering*, 196, 228-235.
- [7] Arı, A. C. (2023). 3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisiyle Üretilen Yapı Malzemeleri ve İnşaat Sektöründe Kullanımlarının İncelenmesi. *International Social Sciences Studies Journal*, 9, 114, 7829-7840.
- [8] Taylor M., Wamuziri S., Smith I. (2003). Automated construction in Japan. *Proceedings of the Institution of Civil - Civil Engineering*, 156(1), 34-41.
- [9] Khoshnevis B., Hwang D., Yao K., & Yeh Z. (2006). Megascale fabrication by contour crafting. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301-320.
- [10] AI SpaceFactory NASA için 3D Baskılı Mars Prototipi, <https://www.ekoyapi-dergisi.org/ai-spacefactory-nasa-icin-3d-baskili-mars-prototipi-olusturuyor>
- [11] Lu B., Tan M. J., & Qian S. Z. (2016). A Review of 3D Printable Construction Materials and Applications. *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, 330-335.
- [12] Zhang Y., Zhang Y., Liu G., Yang Y., Wu M., Pang B. (2018). Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink, *Construction and Building Materials*, 174, 263-271.
- [13] Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M., (2018). Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research*, 106, 103-116.
- [14] Yang E.H., Sahmaran M., Yang Y., & Li V. C. (2009). Rheological control in production of engineered cementitious composites. *Materials Journal*, 357-366.

- [15] Perrot A., Rangeard D., & Pierre A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and structures*, 1213–1220.
- [16] Gosselin, C., Duballet R., Roux P., Gaudillière N., Dirrenberger J., Morelad P. (2016). Large scale 3D printing of ultra-high performance concrete a new processing route for architects and builders”, *Materials Design*, 100, 102-109,
- [17] Le A. Lim B., Guamán-Rivera R, Martínez-Rocamora A., García-Alvarado R., Muñoz-Sanguinetti C., González-Böhme L.F., Auat-Cheein F. (2022). Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings*, 12, 229.
- [18] Lim S., Buswell R., Le T., Wackrow R., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. (2011). Development of a viable concrete printing process. In proceeding for 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011), 665-670,
- [19] Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A. Gibb A.G.F., Thorpe T., (2012). Hardened properties of high performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 42(3), 558-566.
- [20] <https://aposto.com/s/insaat-sektorunun-gelecegi-3d-baski-eyler>
- [21] Dünyanın ilk 3D baskılı paslanmaz çelik köprüsü: MX3D Smart Bridge, <https://www.gzt.com/arkitekt/dunyanin-ilk-3d-baskili-paslanmaz-celik-koprusu-mx3d-smart-bridge-3601001>
- [22] <https://www.dunyahalleri.com/dubainin-gelecegini-3d-yazicilar-insa-edecek/>
- [23] <https://www.archdaily.com/910764/ai-spacefactory-builds-3d-printed-mars-prototype-for-nasa/5c58ba72284dd12f46000083-ai-spacefactory-builds-3d-printed-mars-prototype-for-nasa-image>
- [24] The World’s Largest Concrete 3D Printed Pedestrian Bridge, <https://www.rdworldonline.com/the-worlds-largest-concrete-3d-printed-pedestrian-bridge/>
- [25] 3D Yazıcı Kullanarak Yapılan Yapılar <http://structpedia.com/3d-yazici-yapi/#:~:text=Fransa'da%2095%20metrekarelik%204,ve%20%C3%A7oktan%20sahibine%20ula%C5%9Ft%C4%B1%20bile.>
- [26] <https://www.finansgundem.com/haber/3d-yazici-ile-basilan-turkiyenin-ilk-eyi/1587960>



# PASTIRMA VE SUCUK ÖRNEKLERİNDEN İZOLE EDİLEN LAKTİK ASİT BAKTERİLERİNİN BAZI FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ<sup>1</sup>

*Özlem ERTEKİN<sup>2</sup>*

---

1 \*Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (MUNİBAP) tarafından MFMUB019-14 numaralı proje ile desteklenmiştir.

2 Dr. Öğr. Üyesi Özlem Ertekin, Munzur Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Tunceli, Türkiye. Sorumlu Yazar, E-mail: oertekin@munzur.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2548-2478

## 1. Giriş

19. yy sonlarında laktik asit bakterileri olarak isimlendirilen laktik asit bakterilerinin bazı suşları doğal olması nedeniyle kimyasal koruma yöntemleri yerine fonksiyonel alternatif koruma yöntemlerinden biri olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle laktik asit bakterileri sağlıklı doğal gıda katkı maddeleri olarak teknolojik, fonksiyonel özelliklerinden dolayı önemle tercih edilmektedir.

Laktik asit bakterileri endüstriyel ölçekte starter kültür olarak kullanılabilir iyi bir kaynak olarak görülmektedir. Diğer yandan laktik asit bakterilerinin bazıları probiyotik özelliklere sahiptir. Daha önce yapılan sınırlı sayıda çalışmalarda da laktik asit bakterilerinin hastalıklara karşı olumlu etkileri kanıtlanmış ve bu nedenle probiyotik türlerin gıdalarda kullanımı önemini korumaktadır.

Günümüzde gıda katkı maddeleri tüketicilere göre yapay ve güvenilirliği az uygulamalar olarak düşünülmektedir. Tüketiciler satış yerlerinde güvenilir, lezzetli, kolay hazırlanan vb. ürünleri tercih etmeye başlamıştır. İşte bu anlamda gıda fermentasyonu ve starter kültürlerin kullanımı alternatif uygulamalardan birisi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durumda kimyasal katkıları kullanmak yerine fonksiyonel özellik gösteren laktik asit bakterilerinin bazı suşlarının starter kültür olarak kullanımı doğal koruma yöntemlerinden biri olarak görülmekte ve bu suşlardan gıdaların raf ömürlerini uzatmak için yaygın şekilde yararlanılmaktadır (Gürsoy ve Kınık, 2006). Laktik asit bakterileri sucuk vb. fermente ürünler için fermentasyonda starter olarak kullanılan fonksiyonel ve teknolojik özellikleri olan en önemli gruptur. Bu bakteriler midenin asidik koşullarına, safra tuzlarına, sindirim enzimlerine dayanıklılık gösterebilmekte ve kolonize olabilmektedir. En önemli probiyotik grup ise laktobasillerdir (Gürsoy ve Kınık, 2006). Laktik asit bakterilerinin bazı türleri. probiyotik fonksiyonel gıda üretiminde kullanılmaktadır. Endüstriyel ve tıbbi uygulamaları nedeniyle bu bakterilere olan ilgi artmıştır (Salminen ve ark., 2006). Ayrıca tüketicilerin güvenli ve kaliteli ürün istekleri, alternatif doğal koruma yöntemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Antimikrobiyel etkiye sahip olduğu bilinen bazı mikroorganizmaların ürettiği antimikrobiyal metabolitlerin doğal koruyucu olarak kullanılabilmesi yönünde yapılan çalışmalar da artmıştır (Olaoye ve Dodd, 2010). Laktik asit bakterilerinin probiyotik suşları antibiyotiklerden kaynaklanan bazı rahatsızlıkları da yok edebilmektedir. Bu amaçla laktik asit bakterilerinin fonksiyonel gıdalar olarak kullanı-

mına olan ilgi artmıştır. Ayrıca probiyotik bakteriler tarafından üretilen bakteriyosinler, patojen ve gıdalarda bozulma yapan mikroorganizmaları yok edebilmek için önem sağlamaktadır (Yangılar, 2015).

Et ve et ürünleri birçok gıda ögesini yapısında bulduran insanların ihtiyaç duydukları besleyici değeri oldukça iyi olan gıdalar arasında yer almaktadır. Yeterli ve dengeli beslenme açısından et ve et ürünlerinin tüketilmesi çok büyük önem arz etmektedir (Cebirbay, 2014). Et besleyici olduğu kadar kolay bozulma özelliği olan bir gıdadır. Üretim ve depolama sırasında mikrobiyal kontaminasyonlara maruz kalabilmekte ve bu kontaminasyonlar da gıdada bozulmaya sebep oluşturmaktadır. Bu nedenle gıda üreticileri bu kontaminasyonları önlemek için birçok yöntem kullanmışlardır (Chaillou, 2005). Ayrıca bu yöntemlerin doğal olmasına dikkat edilmiştir. Et ürünleri için kullanılan bu yöntemlerden birisi de starter kültür kullanımınıdır (Fernandez-Gines ve ark., 2005). Bu sebeple gıda ürününün güvenilir olması için kullanılabilir yeni starter kültürler tespit edilmeye başlanmıştır (Leroy ve De Vuyst, 2004).

Pastırma ve fermente sucukta olması gereken özelliklerin sağlanmasında laktik asit bakterileri ve katalaz pozitif koklar ile küf ve mayaların aktiviteleri önem taşımaktadır (Nazlı, 1995). Laktik asit bakterileri genel olarak ürünlerin kendine özgü duyuşsal özelliklerinin ve tekstürün oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca ürettikleri bazı maddeler fermente et ürünlerini koruyucu özelliğe sahiptirler. Laktik asit bakterilerinin gıdaların üretiminde teknolojik ve duyuşsal özellikleri sağlama açısından yararlı olmasından başka insan sağlığı için de yararlı özellikleri bulunmaktadır. Laktik asit bakterileri asitli ortama dayanmaları, antimikrobiyal madde üretebilmeleri, safra tuzlarını hidroliz edebilmeleri, bağırsak yolunda gelişebilme özelliklerinden dolayı güvenilir bir şekilde insan probiyotikleri olarak kullanılmaktadır (Kuar ve ark., 2002). Probiyotikler gıdalarla tüketilerek alınabileceği gibi, fermente et ürünlerinin üretilmesinde de kullanılabilir. Yapılacak çalışmalarla ülke gereksinimlerini karşılayacak, nitelik olarak daha kaliteli ve sağlıklı pastırma ve fermente et ürünleri (sucuk vb.) üretilmesi açısından laktik asit bakterilerinin fonksiyonel olarak önemli özelliklerinin iyi bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Bu çalışma Munzur Üniversitesi mikrobiyoloji laboratuvarında yapılmıştır. Çeşitli yerlerden toplanan örnekler (Pastırma ve Sucuk) numune alma kurallarına göre hijyen ve sıcaklık koşullarına uyularak laboratuvara getirilmiştir.

### 2.2. Metot

#### 2.2.1. Örneklerin hazırlanması

Gıda örneklerinden aseptik koşullarda 25 gr örnek tartılarak 225 ml seyreltme sıvısı ile homojenize edilmiş ve  $10^{-1}$  seyreltmesi hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan örneklerin  $10^{-6}$  ye kadar seyreltmeleri yapılarak analizlere devam edilmiştir.

#### 2.2.2. Laktik asit bakterilerinin izolasyonu

Tüm örneklerin seyreltmeleri alınarak spesifik besiyerlerine yayma ekim yöntemiyle ekimleri yapılmıştır. Ekimden sonra 24-48 saat  $37^{\circ}\text{C}$ 'de inkübasyon yapıldıktan sonra spesifik besiyeri içeren petriyelerdeki koloniler değerlendirilmiştir (Klein, 2003; Zamfir ve ark., 2006; Rosaria ve ark., 2007).

#### 2.2.3. Analizler

Çalışmada farklı illerden toplanan pastırma ve sucuk örneklerine öncelikle Glikozdan gaz oluşturma (Papamanoli ve ark., 2003; Kostinek ve ark., 2007) ve Arjininden  $\text{NH}_3$  oluşumu (Papamanoli ve ark., 2003; Sanchez ve ark., 2005) testleri uygulanmıştır. Sadece Kahramanmaraş, Çankırı, Elazığ, Malatya, Ankara, İstanbul illerinden toplanan farklı pastırma ve sucuk örneklerinden izole edilen laktik asit bakterilerinin glukozdan gaz üretmeyen ve arjinin hidrolizi olmayan 25 izolat değerlendirmeye alınmıştır. Daha sonra bu 25 izolat için ekzopolisakkarit (EPS) üretiminin belirlenmesi (Smitinont ve ark., 1999), izolatların antibiyotik duyarlılıklarının belirlenmesi (Charteris ve ark., 1998; Cebeci ve Gürakan, 2003), Antimikrobiyal aktivite spektrumunun belirlenmesi (Schillinger ve Lücke, 1989), gastrik suya dayanıklılık (Gardiner ve ark., 1999; Vindorela ve Reinheimer, 2003),  $\text{H}_2\text{O}_2$  üretimi (Patrick ve Wagner, 1949) testleri uygulanmıştır. Ayrıca bakterilerin karbonhidrat fermentasyon testleri ile tanımlamaları API50CHL (Biomérieux) test kiti kullanılarak yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Farklı illerden toplanan farklı pastırma ve sucuk örneklerinin sadece Kahramanmaraş, Çankırı, Elazığ, Malatya, Ankara ve İstanbul illerinden toplanan örneklerinden izole edilen laktik asit bakterilerinin glukozdan gaz üretmeyen ve arjinin hidrolizi olmayan 25 izolata uygulanan ekzopolisakkarit (EPS) üretimi, antibiyotik duyarlılık, antimikrobiyal aktivite, gastrik suya dayanıklılık, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> üretimi, API50 CHL testi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

#### 3.1. İzolatların ekzopolisakkarit (EPS) üretiminin belirlenmesi

Ekzopolisakkaritlerin çoğu LAB (laktik asit bakterileri) tarafından oluşturulmaktadır (Badel ve ark., 2011). Ekzopolisakkaritler stabilize ve emülsifiye edici özelliklere sahiptirler (Milci ve Yaygın, 2005). Ekzopolisakkaritler bakteriyi bakteriyofajlara, antibiyotik vb. bileşiklere karşı koruyabilmektedir (Stiles ve Holzappel, 1997). Genellikle laktik asit bakterilerinin, propiyonik asit bakterilerinin ve bifidobakterilerin EPS ürettikleri bildirilmiştir (Sneath ve ark., 1986). Bu polimerler ayrıca gıda endüstrisinde kıvam arttırıcı olarak kullanılabilir (Cerning ve ark., 1986). EPS'lerin kolesterol düşürücü ve bağışıklık sistemini düzenleyici vb. etkilerinin olduğu da belirtilmiştir (Ruas-Madiedo ve ark., 2006).

Yapılan bir çalışmada *Ent. faecium*, *Lac. lactis*, *Ent. durans*, *Ped. acidilactici*, *Ped. pentosaceus* gibi çeşitli suşların EPS üretimlerinin olduğu belirlenmiştir (Akepaer, 2015). Yine Doğan (2017) bazı gıdalarda yapmış olduğu çalışmada *L. plantarum* suşlarında EPS üretimi olduğunu bulmuştur. Mevcut bu çalışmada izolatlar EPS oluşturmuştur. Sonuçlar araştırmacıların sonuçlarıyla uyumludur.

#### 3.2. İzolatların antibiyotik duyarlılıklarının belirlenmesi

Gıdaların üretiminde kullanılan LAB genellikle güvenli mikroorganizmalardır. Ancak bu bakterilerin antibiyotik direnç genlerini üzerlerinde bulduklarında bu genleri diğer bakterilere aktarma durumları olabilmekte ve önemli bir endişe oluşturmaktadır. Bu nedenle kullanılacak bakterilerin antibiyotik dirençlerinin belirlenmesi çok önemlidir. En çok dikkat edilmesi gereken antibiyotik vankomisin (Nami ve ark., 2015; Demir ve ark., 2019).

Hummel ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada 45 starter kültürün antibiyotik dirençleri ile ilgili yapılan çalışmada laktik asit bakterilerinin eritromisin, kloramfenikol, tetrasiklin ya da  $\beta$ -laktam dirençlerinin %7 gibi düşük olduğu bildirilmiştir. Tekdemir (2019) pastırma örneklerinden izole ettiği laktik asit bakterilerinin 3 adedini *L. plantarum* olarak tanımlanmıştır. İzolatların vankomisin, ve rifampisin dışındaki antibiyotiklere

genellikle duyarlı olduğu belirtilmiştir. Sucuk örneklerinden izole edilen 10 izolatin 4'ünü *P. pentosaceus*, 6'sını *L. plantarum* olarak tanımlamıştır. *P. pentosaceus*'ların 2 adedi kloramfenikol, vankomisin, rifampisin, ampisilin, gentamisin, eritromisin ve penisiline duyarlı, *L. plantarum* izolatlarının 2 adedi yine bu antibiyotiklere duyarlı olarak bulunmuştur. Mevcut çalışma sonuçlarına göre pastırma izolatlarının 2'si, sucuk izolatlarının 3'ü bazı antibiyotiklere direnç göstermiştir. Pastırma izolatlarının 8'i, sucuk izolatlarının 12'si tüm antibiyotiklere duyarlı bulunmuştur. Dolayısıyla herhangi bir antibiyotiğe direnç gösteren izolat sayısı oldukça düşüktür. Diğer bir deyişle mevcut çalışmada kullanılan 25 izolatın 20'si tüm antibiyotiklere (kloramfenikol, vankomisin, rifampisin, ampisilin, gentamisin, eritromisin, penisilin G) duyarlı bulunmuştur. Bu durumda bu 20 izolatın antibiyotik direnç geni aktarma özelliği bulunmadığından fonksiyonel suşlar olarak kullanılabilme potansiyelinin olduğu düşünülmektedir.

### 3.3. Antimikrobiyal aktivite spektrumunun belirlenmesi

Probiyotik bakterilerin en önemli fonksiyonlarından biri de bulunduğu yerin doğal mikroflorasının patojenler için engel oluşturmamasını sağlamaktır. Bu nedenle probiyotik mikroorganizmaların belirlenmesinde, hem patojenleri hem de bozulma sebebi olan mikroorganizmaları yok etme kapasitesi önemlidir. Probiyotik suşlar hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ), diasetil, organik asit, bakteriyosin veya bakteriyosin benzeri molekülleri içeren antimikrobiyal maddeyi oluşturarak patojen bakterilerin ortama tutunmasını engellemektedir (Gibson, 1998; Ouwehand ve ark.,1999).

Çalışmada test edilen izolatların *L. monocytogenes* ATCC 7644 ve *E. coli* ATCC 25922 karşı oldukça etkili antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirlenmiştir. Bu antimikrobiyal aktivite sebebiyle izolatlar starter ve probiyotik kültür özellik gösterme potansiyeli açısından önem taşımaktadırlar.

### 3.4. Gastrik suya dayanıklılık

Probiyotik olarak bir mikroorganizmanın kullanılabilmesi için ağızda bulunan enzimlere dayanıklı olması, pH 1.5-3.0 olan mide gastrik ortamından etkilenmemesi gerekmektedir (Hoffman ve ark.,1983).

Mevcut çalışma sonuçlarına göre 2.0 pH'da ve 3.0 pH'da izolatlardaki düşüş Ertekin ve Çon (2014) ve Vindorela ve Reinheimer (2003) araştırmacıları ile tam uyumlu, Klingberg ve ark. (2005) ile uyumlu bulunmuştur. İzolatların tümünün gastrik suya dayanıklılık göstermesi açısından probiyotik ve starter kültür için aranan değerleri taşıdıkları tespit edilmiştir.

### 3.5. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Üretimi

Probiyotikler tarafından üretilen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, patojenlere etki etmektedir. Toksoy ve ark. (1999) tarafından yapılan bir araştırmada, sucuk ve sosisten izole edilen 39 adet *Lb. plantarum* suşunun H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ürettiği, Zalán ve ark. (2005) tarafından yapılan bir çalışmada, *Lactobacillus* suşlarının H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ürettiği ve *B. cereus* ve *L. monocytogenes*'in gelişimini inhibe ettiği belirtilmiştir. Yine Erdoğan ve ark. (2002) tarafından fermente sucuklardan izole edilen *Lb. pentocaceus* suşlarının hidrojen peroksit ürettiği bildirilmiştir. Mevcut çalışmada izolatların H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ürettiği bulunmuştur. Bulunan sonuçlar araştırmacılar ile uyumludur.

### 3.6. İzolatların API 50 CHL sistemi ile tanımlanması

Toksoy ve ark., (1999) tarafından yapılan çalışmada sucuk ve sosis örneğinden 97 adet *Lactobacillus* bakterisi izole edilmiş ve bunların 39'u *L. plantarum* olarak bulunmuştur. Erdoğan ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada 7 sucuk örneğinden toplam 34 bakteri izole etmişler ve bunların 4'ünün *Pediococcus pentosaceus* olduğunu belirtmişlerdir. Coşansu ve ark. (2007), sucuk örneklerinden 206 laktik asit bakterisi izole etmiş ve bu izolatların 25'ini *Pediococcus* spp. olarak tanımlamışlardır. Toplanan 51 sucuk örneği ile ilgili yapılan bir çalışmada laktik asit bakterileri türler olarak 4 *L. curvatus*, 4 *Pediococcus pentosaceus*, 2 *L. pentosus*, 2 *L. sakei*, 1 *L. delbrueckii*, 1 *L. rhamnosus*, 19 *Lactobacillus plantarum*, 3 *P. acidilactici*, ve 21 *Lactobacillus* spp. şeklinde tanımlanmıştır (Çon ve Gökalp, 2000). Kaban (2007) tarafından yapılan çalışmada geleneksel olarak üretilen sucuk örneklerinden toplanan 129 laktik asit bakterisi izole edilmiş ve dominant türün *Lactobacillus plantarum* (%45.7) olduğu bunu *L. curvatus* (%10.9) ve *L. fermentum*'un (%9.3) izlediği belirtilmiştir. Fenotipik ve genetik özellikleri belirlemek için toplanan 15 sucuk örneğinden izole edilen 45 laktik asit bakterisi *Lactobacillus plantarum*, *Lactococcus lactis* ssp. *lactis*, *L. curvatus* ssp. *curvatus*, *Pediococcus pentosaceus*, *L. brevis*, *Weisella viridescens*, *L. delbrueckii* ssp. *delbrueckii*, *W. confusa*, *L. collinoides*, *L. fermentum* ve *Leuconostoc mesenteroides* ssp. *mesenteroides* olarak tanımlanmıştır (Adıgüzel ve Atasever, 2009). Ertekin ve Çon (2014) yaptıkları çalışmada farklı gıdalardan izole ettikleri laktik asit bakterilerinin tanımlamasını yapmış sucuk örneklerinde 6 izolatı *P. pentosaceus*, 2 izolatı *L. plantarum* olarak tanımlamıştır.

Çalışma sonuçlarına göre pastırma ve sucuk örneklerinde baskın florayı *L. plantarum* oluşturmuştur. Gıda örneklerinde flora çeşitlilik göstermekle birlikte, pastırma örneklerinde çoğunlukla *L. plantarum* türü ve 1 adet *P. pentosaceus* türü bulunmuştur. Sucuk örneklerinde ise yine çoğunlukla *L. plantarum* türü ve ondan sonra *P. pentosaceus* türü baskındır. Sucuk

 rneklelerinde ayrıca *L. lactis*, *L. curvatus* türlerine de rastlanmıştır. Çalışma sonuçları araştırmacılarla uyum göstermektedir.

#### 4. Sonuçlar

İzolatların 20'si kloramfenikol, vankomisin, rifampisin, ampisilin, gentamisin, eritromisin, penisilin G antibiyotiklerine duyarlı olarak bulunmuştur. Sadece 5 izolat bazı antibiyotiklere dirençli bulunmuştur. Antibiyotiklere duyarlı olan 20 izolatın antibiyotik genlerini aktarma özelliği olmayacağından dolayı güvenli olarak starter ve probiyotik olarak endüstriye kazandırılabilme potansiyeli önem taşımaktadır. Probiyotik bakterilerin en önemli fonksiyonlarından biri de bulunduğu yerin doğal mikroflorasının patojenler için engel oluşturmasını sağlamaktır. Bu nedenle probiyotik mikroorganizmaların belirlenmesinde, patojenleri ve bozulma sebebi olan mikroorganizmaları yok etme potansiyeli önemlidir. Çalışmada test edilen izolatlar *L. monocytogenes* ATCC 7644 ve *E. coli* ATCC 25922'e karşı önemli seviyede antimikrobiyal aktivite göstermişlerdir. Bu antimikrobiyal aktivite sebebiyle de starter kültür ve probiyotik özellik açısından izolatlar uygun bulunmuşlardır. Çalışmada tüm izolatlarda ekzopolisakkarit üretimi belirlenmiştir. İzolatların hepsi değişen oranlarda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> üretmiştir. İzolatların tümünün gastrik suya dayanıklılık göstermesi probiyotik ve starter kültür için aranan değerleri taşıdıklarını göstermektedir. Starter ve probiyotik özellikleri önemli bulunan bu izolatların API50CHL sistemi ile tanımlanması yapılmıştır. Tanımlaması yapılan izolatlar pastırma da 9 adet *L. plantarum*, 1 adet *P.pentosaceus* olarak tanımlanırken; sucukta izolatlar 8 adet *L. plantarum*, 4 adet *P. pentosaceus*, 2 adet *L. lactis*, 1 adet *L. curvatus* şeklinde olmuştur. Çalışmada API50 CHL sistemi ile tanımlanan *L. plantarum* ile *P. pentosaceus* izolatlarının bulunması pastırma ve sucukta bulunan bu türlerin yaygın türler olması açısından önemlidir.

Böylece bu kültürlerin teknolojik olarak tüketici tarafından kabul edilebilir ürün kalitesinde ve güvenilir fermente et ürünlerinin üretilmesi konusunda önemli fonksiyonel özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu kültürlerin sağlık yararlı probiyotik ürünlerin üretilmesinde de destekleyici çalışmalar yapılırsa kullanılabilirlik potansiyeli açısından önem taşıdığı düşünülmektedir.

**Tablo 1.** İzolatların API 50 CHL sistemi ile tanımlama sonuçları

Örnek	Tür
Pastırma Bonfile (Kahramanmaraş)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Sırt (Kahramanmaraş)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Antrikot(Kahramanmaraş)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Bonfile (Çankırı)	<i>L. plantarum</i>

Pastırma Sirt (Çankırı)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Antrikot (Çankırı)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Bonfile (İstanbul)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Bonfile (Elazığ)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Sirt (Elazığ)	<i>L. plantarum</i>
Pastırma Antrikot (Elazığ)	<i>P. pentosaceus</i>
Sucuk (İstanbul)	<i>P. pentosaceus</i>
Sucuk (İstanbul)	<i>L. lactis</i>
Sucuk (İstanbul)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Elazığ)	<i>P. pentosaceus</i>
Sucuk (Elazığ)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Elazığ)	<i>L. lactis</i>
Sucuk (Çankırı)	<i>L. curvatus</i>
Sucuk (Çankırı)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Çankırı)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Malatya)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Ankara)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Ankara)	<i>P. pentosaceus</i>
Sucuk (Ankara)	<i>L. plantarum</i>
Sucuk (Ankara)	<i>P. pentosaceus</i>
Sucuk (Ankara)	<i>L. plantarum</i>

## 5. Kaynaklar

- Adıguzel, G., Atasever, M., 2009. Phenotypic and genotypic characterization of lactic acid bacteria isolated from Turkish dry fermented sausage. *Romanian Biotechnological Letters*, 14 (1), 4130-4138.
- Akepaer, M. Bazı *Enterococcus Lactococcus* ve *Pediococcus* Bakterilerinin Probiyotik Özelliklerinin Araştırılması. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- Badel, S., Bernardi, T., Michaud, P., 2011. New perspectives for Lactobacilli exopolysaccharides. *Biotechnology Advances*, 29, 54–66.
- Cebeci, A., Gürakan, C., 2003. Properties of potential probiotic *Lactobacillus plantarum* strains. *Food microbiology*, 20: 511-518.
- Cebirbay, M.A . Fermente ve Isıl İşlem Uygulanmış Sucuklarda Bazı Lactobacillus ve Patojen Bakterilerin Antibiyotik Dirençliliklerinin Belirlenmesi. Selçuk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi , 2014.
- Cerning, J., Bouillanne, C., Desmazeaud, M.J., Landon, M., 1986. Isolation and Characterization of Exocellular Polysaccharide Produced by *Lactobacillus bulgaricus*. *Biotech .Lett.*, 8, 625-628.
- Charteris, P.W., Kelly, M.P., Morelli, L., Collins, K.J., 1998. Antibiotic susceptibility of potentially probiotic Lactobacillus species. *Journal of food protection*, 61(12), 1636-1643.
- Chaillou, S., Champomier-Verge`s, M., Cornet, M., Crutz-Le Coq, A., Dudez, A., Martin, V., Beaufils, S., Darbon-Ronge`re, E., Bossy, R., Loux, V., Zagoreci, M., 2005. The complete genome sequence of the meat-borne lactic acid bacterium *Lactobacillus sakei* 23K. *Nature Biotechnology*, 23 (12).
- Coşansu, S., Kuleasan, H., Ayhan, K., Materon, L., 2007. Antimicrobial Activity and Protein Profiles of *Pediococcus* spp. Isolated From Turkish, Sucuk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31(2):190-200.
- Çon, A. H, Gökalp, H .Y., 2000. Production of bacteriocin-like metabolites by lactic acid cultures isolated from sucuk samples. *MeatScience*, 55, 89-96.
- Demir,E., Kılıç, G.B.,Özbalcı, D., 2019. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(4), 639-645pp.
- Doğan, M. Bazı gıdalardan izole edilen bakterilerin probiyotik özelliklerinin araştırılması. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Aydın Üniversitesi, 2017.
- Erdoğrul, Ö.T., Çetin, Ö., Ergün, Ö., 2002. Fermente sucuklardan izole edilen *Pediococcus pentosaceus* suslarının bazı metabolik ve antimikrobiyal aktiviteleri üzerine çalışmalar. *İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 28 (1), 294-254.
- Ertekin, Ö., Çon, A.H., 2014. Farklı Gıdalardan İzole Edilen Laktik Asit Bakterilerinin Endüstriyel ve Probiyotik Özellikleri. *Akademik Gıda*, 12(4), 6-16.

- Fernandez-Gines, J., Fernandez-Lopez, J., Sayas-Barbera and Perez-alvarez, J., 2005. Meat products as functional foods: A review. *Journal of Food Science*, 703, 37-43.
- Gardiner, G., Stanton, C., Lynch, P.B., Collins, J.K., Fitzgerald, G., Ross, R.P., 1999. Evaluation of Cheddar Cheese as a Food Carrier for Delivery of a Probiotic Strain to the Gastrointestinal Tract. *Journal Dairy Science*, 82: 1379-1387.
- Gibson, G.R., 1998. Dietary modulation of the human gut microflora using probiotics. *British Journal of Nutrition*, 80, S209-S212.
- Gürsoy, O., Kınık, Ö., 2006. Fonksiyonel Starter Kültürlerin Teknolojik Uygulamalarına Bir Bakış. *Türkiye 9.Gıda Kongresi*.
- Hoffman, A.F., Molino, G., Milanese, M., Belforte, G., 1983. Description and stimulation of a physiological pharmacokinetic model for the metabolism and enterohepatic circulation of bile acids in man. *J. Clin. Invest.*, 71, 1003-1022.
- Hummel, A.S., Hertel, C., Holzapfel, W.H., Charles, Franz, C.M.A.P., 2007. Antibiotic resistances of starter and probiotic strains of Lactic Acid Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 73, No:3, 730-739s
- Ouwehand, A.C., Kirjavainen, P.V., Shortt, C., Salminen, S., 1999. Probiotics: mechanisms and established effects. *Int. Dairy J.*, (9), 43-52.
- Kaban, G., 2007. Geleneksel olarak üretilen sucuklardan laktik asit bakterileri ile katalaz pozitif kokların izolasyonu, identifikasyonu, üretimde kullanılabilirlik imkanları ve uçucu bileşikler üzerine etkileri. *Doktora Tezi, Erzurum*.
- Klein, G., 2003. Taxonomy, ecology and antibiotic resistance of Enterococci from food and gastro-intestinal tract. *International Journal of Food Microbiology*, 88, 2-3, 123-131.
- Klingberg, T.D., Axelsson, L., Naterstad, K., Elsser, D., Budde, B.B., 2005. Identification of potential probiotic starter cultures for Scandinavian-type fermented sausages. *Int. Journal of Food Microbiology*, 105, 419-431.
- Kostinek, M., Specht, I., Edward, V.A., Pinto, C., Egunlety, M., Sossa, C., Mbugua, S., Dortu, C., Thonart, P., Taljaard, L., Mengu, M., Franz, C.M.A.P., Holzapfel, W.H., 2007. Characterisation and biochemical properties of predominant Lactic acid bacteria from fermenting cassava for selection as starter cultures. *International journal of food microbiology*, 114:342-351.
- Kuar, I. P., Chopra, K., Saini, A. 2002. Probiotics: potential pharmaceutical application. *Eur. J. Pharmaceutical Sci.*, 15: 1-9.
- Leroy, F., De Vuyst, L., 2004. Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 67-78.

- Milci, S., Yaygın, H., 2005. Laktik Asit Bakterileri Tarafından Üretilen Ekzopolisakkaritler ve Süt Ürünlerindeki Fonksiyonları. *Gıda Dergisi*, 30 (2), 123-129.
- Nami, Y., Haghshenas, B., Haghshenas, M. and Khosroushah, A.Y., 2015. Antimicrobial activity and the presence of virulence factors and bacteriocin structural genes in *Enterococcus faecium* CM33 isolated from ewe colostrum. *Frontiers in Microbiology*, 6, 782pp.
- Nazlı, B., 1995. Türk fermente sucuğu mikroflorasından elde edilmiş bir starter kültür kombinasyonunun sucuk kalitesi üzerine etkisinin araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 21, 217-235.
- Olaoye ,O.A., Dodd C.E.R., 2010. Evaluation of Bacteriocinogenic *Pediococcus acidilactici* as Protective Culture in the Preservation of Tsire, A Traditional Nigerian Stick Meat. *J. Food Safety*, 30:867-888.
- Papamanoli, E., Tzanetakis, N., Litopoulou-Tzanetaki, E., Kotzekidou, P., 2003. Characterization of lactic acid bacteria isolated from a Greek dry-fermented sausage in respect of their technological and probiotic properties. *Meat science*, 65:859-867.
- Patrick, W. A., Wagner, H. B., 1949. Determination of hydrogen peroxide in small concentrations. *Analytical Chemistry*, 21(10), 1279-1280.
- Rosaria, M., Modesto, M., Biavati, B., 2007. Antibiotic resistance of Lactic Acid Bacteria and Bifidobacterium Spp. isolated from dairy and pharmaceutical products. *International Journal Of Microbiology*, 115, 35-42.
- Ruas-Madiedo, P., Gueimonde, M., Margolles, A., Reyes-Gavilan, C. G., Salminen, S., 2006. Exsopolisaccharides produced by probiotic strains modify the adhesion of probiotics and enteropathogens to Human intestinal Mucus. *J Food. Protect.*, 69(8), 2011-2015.
- Salminen, S., Von Wright, A., Ouwehand, A., 2006. Lactic Acid Bacteria. *International Dairy Journal*, 16, 940-941.
- Sanchez, I., Sesena, S., Poveda, J.M., Cabezas, L., Palop, L., 2005. Phenotypic and genotypic characterization of lactobacilli isolated from spanish goat cheeses. *International journal of food microbiology*, 102, 355-362.
- Schillinger, U., Lucke, F.K., 1989. Identification of Lactobacilli from Meat and Meat Products. *Appl. Environ. Microbiol.*, 4, 199-209.
- Smitinont, T., Tansakul, C., Tanasupawat, S., Keeratipibul, S., Navarini, L., Bosco, M., Cescutti, P., 1999. Exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria strains from traditional thai fermented foods: isolation, identification and exopolysaccharide characterization. *Int. J. Food Microbiol.*, 51, 105-111.
- Sneath, P. H. A., Mair, N. S., Holt, J. G. "Bergey' s Manual of Systemic Bact., Volume 2", Willims & Wilkins., London, 1208-1304, 1986.
- Stiles, M.E., Holzapfel, W.H., 1997. Lactic acid bacteria of foods and their current taxonomy. *International Journal of Food Microbiology*, 36; 1-29.

- Tekdemir, 2019. Çeşitli gıdalardan izole edilen laktik asit bakterilerinin antibiyotik direncinin belirlenmesi. Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli.
- Toksoy, A., Beyatlı, Y., Aslım, B., 1999. Sucuk ve Sosislerden İzole Edilen *Lactobacillus plantarum* Suşlarının Bazı Metabolik ve Antimikrobiyal Aktivitelerinin İncelenmesi. Türk Veterinerlik ve Hayvancılık Dergisi, 23:533-540.
- Vinderola, C.G., Reinheimer, J.A., 2003. Lactic acid starter and probiotic bacteria: a comparative “in vitro” study of probiotic characteristics and biological barrier resistance. Food Research Int., 36, 895-904.
- Yangılar, F., 2015. Probiyotik Mikroorganizmaların Biyokoruyucu Özelliği. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 20(1).
- Zalan ve ark., 2005. Influence of growth medium on hydrogen peroxide and bacteriocin production of lactobacillus strains. Food technology and biotechnology, 43(3).
- Zamfir, M., Vancanneyt, M., Makras, L., Vaningelgem, F., Lefebure, K., Pot, B., Swings, J. and De Vuyst, L. (2006) Biodiversity of Lactic Acid Bacteria in Romanian Dairy Products. Systematic and Applied Microbiology, 29: 487-495.

## **6. Teşekkür**

Bu alışmayı MFMUB019-14 numaralı proje ile destekleyen Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (MUNİBAP) teşekkür ederim.





**GIDALARDAKİ ISIL  
İŞLEM TOKSİKANTLARI:  
KLOROPROPANOLLERİN  
OLUŞUM MEKANİZMALARI,  
ANALİZ YÖNTEMLERİ VE SAĞLIK  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

*Elif EKİZ<sup>1</sup>*

*Emel ÖZ<sup>2</sup>*

*Fatih ÖZ<sup>3</sup>*

---

1 Elif EKİZ, Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye, e-mail: elifekiz@atauni.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4226>

2 Emel ÖZ, Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye, e-mail: emel.oz@atauni.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-2713>

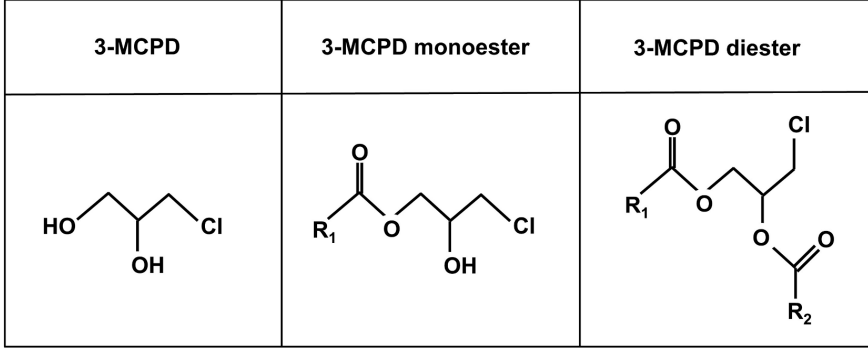
3 Sorumlu Yazar: Fatih ÖZ, Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye, e-mail: fatihoz@atauni.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5300-7519>

## GİRİŞ

Gıdalara uygulanan muhafaza yöntemlerinin başında ısıl işlem gelmekte olup, bu işlem mikrobiyolojik ve duyu kalitenin yanı sıra gıdanın besin değerini de etkilemektedir. Öte yandan, termal prosesler sırasında meydana gelen reaksiyonlar neticesinde heterosiklik aromatik aminler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar, akrilamid, furanlar ve kloropropanol esterleri gibi insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri olduğu bilinen birtakım kimyasal bileşikler oluşmaktadır (Turan et al., 2018; Hamzalıoğlu and Gökmen, 2020; Oz and Oz, 2022). Bu bileşiklerden kloropropanoller, ilk olarak asitle hidrolize edilmiş bitkisel protein hidrolizatlarında tanımlanmış olup, daha sonraki yıllarda birçok gıda örneğinde belirlenmiş ve toksikoloji incelemelerinde potansiyel genotoksik ve karsinojen bileşikler oldukları kanıtlanınca dikkatleri üzerine çekmiştir. Kloropropanoller; yağlarda veya yağ içeren gıdalarda lipitlerin (triacilgliseroller, diaçilgliseroller, fosfolipitler ve gliserol) klor iyonu varlığında ısıl işlem etkisiyle hidrolize uğrayarak oluşturdukları kontaminantlar olarak tanımlanabilmektedirler (Araujo et al., 2020; Sim et al., 2020; Martin et al., 2021).

Kloropropanoller, ilk olarak 1978 yılında, Çekoslovakyalı bilim adamları tarafından bitkisel protein hidrolizatlarında tespit edilmiş ve toksik klorohidrinler olarak adlandırılmıştır (Velíšek et al., 1978). 1979 yılında yapılan bir model sistem çalışmasında, hidroklorik asitle hidrolize edilen lipitlerde kloropropanol esterlerinden biri olan 3-kloropropan-1,2-diol (3-MCPD) bileşiği tanımlanmış ve ardından 1981 yılında asitle hidrolize edilmiş bitkisel proteinlerde de bu bileşiğin tespit edildiği belirtilmiştir (Velíšek et al., 2003; Abu-El-Haj et al., 2007; Yıldırım and Yorulmaz, 2017; Turan et al., 2018).

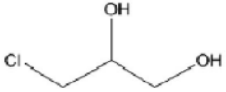
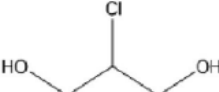
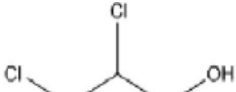
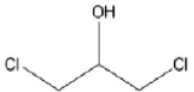
Kloropropanol esterleri, monokloropropandioller (MCPD) ve dikloropropandioller (DCP) olarak sınıflandırılmakta olup, propanol molekülüne bağlı klorun konumuna göre 3-MCPD, 2- monokloropropan-1,3-diol (2-MCPD) veya 1,3-dikloropropan-2-ol (1,3-DCP) olarak isimlendirilmektedir (Turan et al., 2018). MCPD'ler, monoester ve diester formunda bulunabilirken (Şekil 1), DCP'ler yalnızca monoester formunda bulunmaktadır. Ayrıca kloropropanoller serbest halde bulunabileceği gibi yağ asitleriyle esterleşerek bağlı halde de bulunabilmektedir (Arris et al., 2020).




Şekil 1. 3-MCPD'nin monodiester ve diester yapısal formülü (Eisenreich et al., 2023)

Gıdalarda en çok tespit edilen kloropropanol bileşiği olan 3-MCPD; renksiz, hafif yağlı, hoş kokulu, sıvı formda ve  $C_3H_7ClO_2$  moleküler formülüne sahip olup, kaynama noktası  $213^\circ C$ , moleküler ağırlığı 110.539 g/mol ve yoğunluğu ise  $1.32 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Hamlet et al., 2002; Arris et al., 2020).

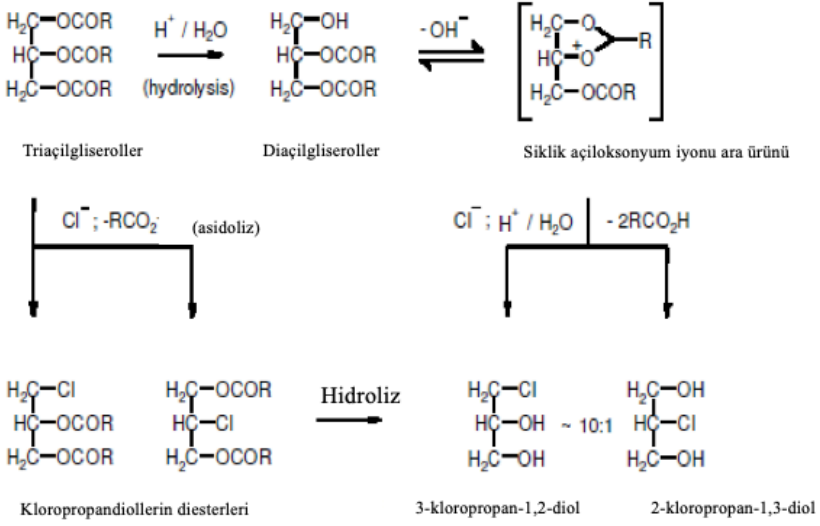
Tablo 1. Kloropropanol bileşikleri ve kimyasal yapıları (Lee and Khor, 2015)

Kimyasal İsmi	Kısaltması	Kimyasal Yapı
3-monokloropropan-1,2-diol	3-MCPD	 <p>3-kloropropan-1,2-diol (3-MCPD)</p>
2-monokloropropan-1,3-diol	2-MCPD	 <p>2-kloropropan-1,3-diol (2-MCPD)</p>
2,3-dikloropropan-1-ol	2,3-DCP	 <p>2,3-dikloropropan-1-ol (2,3-DCP)</p>
1,3-dikloropropan-2-ol	1,3-DCP	 <p>1,3-dikloropropan-2-ol (1,3-DCP)</p>

3-monokloropropan-1-ol	-	 3-kloropropan-1-ol
------------------------	---	---

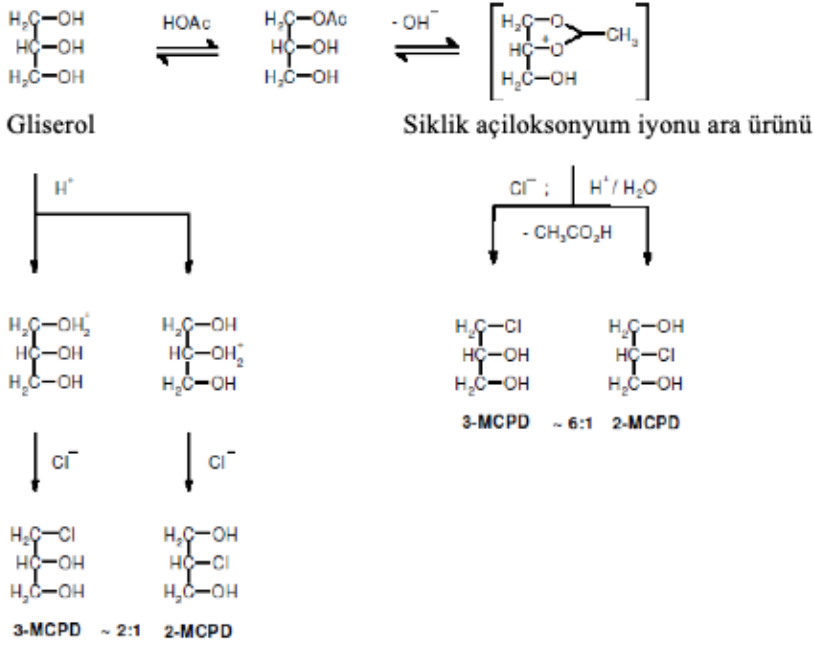
### Kloropropanollerin Oluşum Mekanizmaları

Kloropropanoller temel olarak ısıtma işlemi sırasında gıdalardaki trigliserit, gliserol veya fosfolipitler ile klor arasındaki reaksiyonlar neticesinde meydana gelmektedir (Velíšek et al., 2003; Andres et al., 2013; Önal et al., 2016; Martin et al., 2021). Serbest formda bulunan 3-MCPD; allil alkol, gliserol, lipitler, karbohidratlar ve hidroklorik asit varlığında ısıtma işlemi uygulanan ve düşük su aktivitesine sahip gıdalarda tespit edilirken, 1,3-DCP; fırıncılık ürünleri, yemeklik yağlar, kızartılmış/kavrulmuş et ürünleri, asitle hidrolize edilmiş bitkisel proteinler ve soya sosunda tespit edilmiştir (Taghizadeh et al., 2023). Bugüne kadar kloropropanollerin oluşumları üzerine farklı mekanizmalar öne sürülmüştür. Bu mekanizmalardan birincisinde; sulu ortamda lipitlerin açılma grubu ile klorun anyonu arasında meydana gelen reaksiyonda ara ürün olarak kloropropan-1-ol diesteri oluşmaktadır. Bu oluşum mekanizması esasen hidrolize edilmiş bitkisel proteinlerde ve hidroklorik asitle muamele edilmiş yağlarda belirlenmiştir. Öte yandan, birçok gıda üretiminde bu şartlar sağlanmamakla birlikte, klor anyonu gibi negatif yüklü nükleofillerin ikame reaksiyonlarının, su gibi polar çözücülerde, etrafında bariyer oluşturmaları sebebiyle substratla etkileşime girememesi sonucu reaksiyonu gerçekleştirmediği ve apolar çözücülerde bu reaksiyonun daha hızlı ilerlediği bilinmektedir. Izgara veya kavurma gibi ev tipi pişirme yöntemlerinde etin yüzey bölgesinde oluşan kabuk sebebiyle düşük su aktivitesine sahip olduğu ve bu koşullarda klor anyonunun nükleofilik reaksiyonlarının meydana gelebileceği bildirilmektedir. Kloropropanollerin lipitler ve hidroklorik asitten oluşum mekanizması Şekil 2’de sunulmuştur (Hamlet et al., 2002).



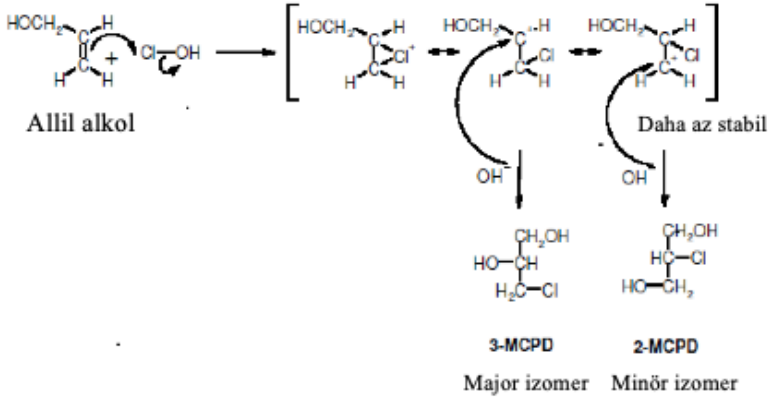
**Şekil 2.** Kloropropanol esterlerinin lipitler ve hidroklorik asitten oluşum mekanizması

İkinci oluşum mekanizması ise  $100^\circ C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda, gıdalarda halihazırda bulunan veya ısıl işlem neticesinde trigliseritlerin parçalanmasıyla oluşan gliserolün, klor anyonuyla reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Hamlet et al., 2002; Rahn and Yaylayan, 2011). Kloropropanollerin gliserolden oluşum mekanizması Şekil 3'te sunulmuştur (Hamlet et al., 2002; Robert et al., 2004).



**Şekil 3.** Kloropropanol esterlerinin gliserolden oluşum mekanizması

Kloropropanol esterlerinin oluşumu ile ilgili öne sürülen mekanizmalardan üçüncüsü ise allil alkol vasıtasıyla gerçekleşen reaksiyondur. Allil alkolün (prop-2-en-1-ol), klor ve su ile reaksiyona girerek %88 oranında monokloropropandioller ve %9 oranında dikloropropandioller oluşturduğu ve bu reaksiyonun 50-60°C’de hızla ilerlediği belirlenmiştir. Allil alkol, sarımsak ve soğan gibi bitkilerde sistein amino asidinin enzimatik bozunmasından oluşur ve alliin [(S)-alil-l-sistein sülfoksit]’in termal ayrışma ürünüdür. Herhangi bir işlemden kullanılan klorlu su vasıtasıyla ortamda hipokloröz asit ve klor bulunması ve böylece allil alkolden kloropropanol esterlerinin oluşması muhtemel olacaktır. Şekil 4’te allil alkolden kloropropanol esterleri oluşum mekanizması gösterilmektedir (Hamlet et al., 2002; Robert et al., 2004).



**Şekil 4.** Kloropropanol esterlerinin allil alkolden oluşum mekanizması

Kloropropanollerin oluşumunda monogliseritlerin, digliseritlerin, klorürlerin ve toplam klorun prekürsörler olduğu bildirilirken sıcaklık, süre ve pH gibi faktörlerin de önemli rol oynadığı belirtilmiştir (Chung et al., 2008; Albuquerque et al., 2019).

### Kloropropanoller Üzerine Yasal Düzenlemeler

Bilimsel Gıda Komitesi (SCF) 2001 yılında 3-MCPD'nin genotoksik olmayan bir karsinogen olduğunu ifade ettiği raporunda tolere edilebilir günlük alım miktarını 2 µg/kg vücut ağırlığı olarak belirlemiştir. FAO/WHO Gıda Katkı Maddeleri Ortak Uzman Komitesi (JECFA) tarafından ise 2002 ve 2007 yıllarında ortaya konan raporlarda 3-MCPD için geçici maksimum tolere edilebilir günlük alım miktarı 2 µg/kg vücut ağırlığı olarak belirtilmiştir (JECFA, 2002; 2007). Aslında ülkeler gıdalarda (özellikle soya sosunda) 3-MCPD'nin maksimum tolere edilebilir miktarı için farklı yasal düzenlemeler yapmıştır. Bu bağlamda, ülkelerin 3-MCPD için düzenlediği maksimum tolere edilebilir miktarı genel olarak gruplandırılacak olursa 0.02 mg/kg, 0.20 mg/kg ve 1.00 mg/kg olarak sıralanabilmektedir. 3-MCPD, Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı tarafından Grup 2B'de olası insan karsinogeni olarak sınıflandırılırken, 2016 yılında JECFA 3-MCPD'nin tolere edilebilir günlük alım miktarını 4 µg/kg vücut ağırlığı/gün olarak öngörmüştür (IARC, 2012; EFSA, 2013; Macmahon, 2018; Wong et al., 2020). Bununla birlikte Commission Regulation (EC) No 1881/2006'da hidrolize edilmiş bitkisel protein ve soya sosunda bulunabilecek maksimum 3-MCPD miktarı 20 µg/kg olarak bildirilmiştir. Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) soya sosları gibi gıdalarda 3-MCPD için kabul edilebilir sınırı 1 mg/kg olarak belirlerken (Yaman et al., 2021), Türkiye'de ise 2011 yılında Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Tebliğinde 3-MCPD'nin

hidrolize bitkisel protein ve soya sosunda bulunabilecek maksimum limiti 20 µg/kg olarak belirlenmiştir (TGK, 2011).

### **Kloropropanollerin Sağlık Üzerine Etkileri**

Kloropropanol esterlerinin asit, sıcaklık ve serbest formda kloropropanol üreten bağırsak lipazı ve mikrobiyal lipaz tarafından hidroliz edilebildiği bildirilmektedir. Bununla birlikte, kloropropanol esterlerinin biyolojik olarak yağ dokusunda birikebildikleri ve hücre zarına entegre olabildikleri bilinmektedir. Bu nedenle, kloropropanollerin bazı gıdalarda kısmi hidrolize uğrayan monoesterler olarak kalmaları halinde bile tüketildiklerinde sağlık riski oluşturdukları bildirilmektedir (Rahn and Yaylayan, 2011).

Kirton et al. (1970) tarafından maymunlar üzerinde incelenen ilk toksikoloji çalışmasında, 3-MCPD'nin 5-6 hafta boyunca 30 mg/kg vücut ağırlığı dozunda uygulanması halinde maymunlarda kas zayıflığı, genel koordinasyon eksikliği, lökopeni, anemi ve trombositopeni gibi toksikolojik etkilerin gözlemlendiği bildirilmiştir. Samojlik and Chang (1970) ise erkek farelere 30 mg/kg vücut ağırlığı dozunda 3-MCPD uygulamasının merkezi sinir sisteminde bozukluklara yol açarak refleks bozuklukları ve felç gibi rahatsızlıklara neden olduğunu bildirmişlerdir. 1993 yılında yapılan başka bir çalışmada ise erkek sıçanlara günlük 2.0 mg/kg, 8.3 mg/kg ve 29.5 mg/kg canlı ağırlık ile dişi sıçanlara günlük 37.0 mg/kg canlı ağırlık dozlarında 3-MCPD uygulamasının böbrekte renal tübüler hiperplazi ile sonuçlandığı tespit edilirken, erkek sıçanlarda günlük 2.0 mg/kg, 8.3 mg/kg ve 29.5 mg/kg canlı ağırlık ile dişi sıçanlarda günlük 10.3 mg/kg ve 37.0 mg/kg canlı ağırlık dozunda 3-MCPD uygulamasının ise kronik nefropati ile sonuçlandığı rapor edilmiştir (Eisenreich et al., 2023).

3-MCPD'nin toksikolojik etkisini incelemek için yapılan hayvan deneylerinde hedef organın böbrek olduğu ve kronik oral maruziyetin tübüler hiperplazi, nefropati ve adenomlarla sonuçlandığı ortaya konmuştur (JECFA, 2002; EFSA, 2013). Ayrıca 3-MCPD'nin sıçanlarda kısırlığa neden olmasının yanı sıra bağışıklık sistemi üzerinde de olumsuz etkiler sergilediği bildirilmiştir. 3-MCPD üzerine yapılan in vitro çalışmalarda ise bu bileşiğin genotoksik olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte 3-MCPD'nin sıçanlarda karsinojen etkilerine rastlanılmıştır (EFSA, 2013). Ayrıca hayvanlar üzerinde yapılan diğer çalışmalarda kloropropanollerin bağışıklık sistemi, üreme sistemi ve nörolojik sistemin yanı sıra kalp ve karaciğer üzerinde de olumsuz etkileri olduğu rapor edilmiştir. Diğer taraftan kloropropanollerin insanlar üzerinde direkt toksikolojik etki sergilediğine dair henüz kesin bir kanıt olmamakla birlikte daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Sun et al., 2023).

## Kloropropanollerin Analiz Yöntemleri

Kloropropanol esterleri çeşitli gıda örneklerinde tespit edilmiş olup, farklı matrislerde düşük seviyelerde oluşan bu bileşikler tespit edebilmek için hassas, güvenli, hızlı ve kolay analitik yöntemler önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde kloropropanollerin analiz yöntemleri direkt ve indirekt analiz yöntemleri olarak sınıflandırılmıştır. Direkt analiz yönteminde kloropropanol esterlerinin her biri ayrı ayrı tespit edilirken, bu yöntem katı faz ekstraksiyonu ile saflaştırma ve sıvı kromatografi-kütle spektrometresi (LC-MS) ile miktarlarının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. İndirekt analiz yöntemi ise iç standart ekleme, asidik veya bazik esterifikasyon, saflaştırma, türevlendirme ve gaz kromatografi-kütle spektrometresi (GC-MS) ile miktarlarının tayin edilmesi esasına dayanmaktadır. Direkt analiz yöntemi ester kompozisyonunu detaylı şekilde ele aldığı için daha avantajlı görülmekle beraber çok fazla referans standart gerektirdiği için maliyet açısından birtakım dezavantajlara sahiptir. Öte yandan direkt metotlara kıyasla indirekt metotların uygulanmasının daha kolay olması sebebiyle kalite kontrolü amacıyla yapılan analizlerde daha sık tercih edilmektedir (Carro et al., 2013; Liu et al., 2013; Jędrkiewicz et al., 2016; Albuquerque et al., 2019).

## Kloropropanol Esterlerinin Azaltılması

Kloropropanol esterlerinin konsantrasyonları; sıcaklık, süre ve pH gibi proses şartları ile birlikte klor verici iyonlar, mono-, di- ve trigliseritler, fosfolipitler ve gliserol gibi prekürsörlerin varlığına bağlı olarak değişim göstermektedir (Hamlet and Sadd, 2002; Chai et al., 2018; Alla Martin et al., 2021). Bu bağlamda, gıdalarda 3-MCPD ve esterlerinin oluşumunu azaltmada temel esas klor ve klor içeren bileşiklerin uzaklaştırılmasına dayanmaktadır. Ancak klor verici bileşiklerin hangi formda olduğunun önemli olduğu ve klor verici bileşiklerin organik formda olması durumunda reaksiyonun gerçekleştiği bildirilmektedir. Ayrıca ham madde seçimi de içerdiği açilgliserollerin miktarı ve lipazın aktivasyonu açısından önem arz etmektedir. Kloropropanollerin konsantrasyonlarında triaçilgliseroller, fosfolipitler ve gliserollerin sırasıyla azalan etkiye sahip olduğu bildirilmektedir (Hamlet et al., 2002; Yıldırım ve Yorulmaz, 2017). Ayrıca, 3-MCPD ve 2-MCPD'nin sulu alkali ortamda kararsız oldukları ve gliserole parçalandıkları belirlenmiş olup, ticari olarak üretilen asitle hidrolize edilmiş bitkisel proteinlerde bu yöntem kullanılarak bu bileşiklerin azaltılabileceği bildirilmiştir (Hamlet et al., 2002).

Genel olarak 3-MCPD miktarının azaltılmasına yönelik işlemler sıralanacak olursa;

1. Nem içeriği yüksek gıdaların pH değerinin yükseltilmesi,

2. Ürünü güvenilir kılacak seviyede ısıtılma uygulanması
3. Kullanılan tuz seviyesinin azaltılması
4. Ürüne düşük su seviyesinde yüksek sıcaklık uygulamasının yapılması
5. Gıdaya uygulanan işlem ve depolama sırasında oluşan gliserol seviyesinin sınırlandırılması
6. İşleme sırasında gıdaya eklenen kısmi gliseridlerin kullanılmaması
7. Baharat özütü kullanarak veya uygun ısıtılma işlemi ile mikrobiyal yükün azaltılması
8. Kullanılan katkı maddelerinin saf olmasına özen gösterilmesi
9. Lipazlar veya esterazlar gibi enzimlerin inaktivasyonunun sağlanması
10. 3-MCPD öncülleri olan ve gıdayla temas eden malzemelerin kullanılmaması
11. Yemeklik yağlarda rafinasyon işlemlerinin optimize edilmesidir (Baer et al., 2010; Sun et al., 2023).

### **Literatürde Kloropropanoller Üzerine Yapılan Çeşitli Çalışmalar**

Kloropropanol esterleri ilk olarak asitle hidrolize edilmiş bitkisel protein hidrolizatlarında belirlenmiş olup, hidrolizatlar gıda sanayiinde gıda çeşni olarak çorba, soya sosu gibi çeşitli soslar ve bulyon gibi pek çok üründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Velíšek et al., 2003; EFSA, 2013). Bu sebeple hidrolizatların kullanıldığı ürünlerde de kloropropanol esterlerinin varlığı risk teşkil etmektedir. Öte yandan, yapılan çeşitli araştırmalarda 3-MCPD'nin et ve et ürünleri, su ürünleri, fırıncılık ürünleri ve bazı peynir çeşitleri gibi protein hidrolizatı içermeyen gıda örneklerinde de tespit edildiği bildirilmiştir (Hamlet et al., 2002; Ariseto et al., 2013; EFSA, 2013; Stadler, 2015; Albuquerque et al., 2019). Diğer gıdalarda oluşumunun ise pişirme esnasında eklenen tuzdan ve gıdadaki bulunan yağdan kaynaklandığı belirtilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, bu bileşiklerin rafine bitkisel katı ve sıvı yağlarda da yüksek seviyelerde oluşabileceği ve tohumlardaki klor kaynağının sulamadan ya da gübreleme işleminden bulaşabileceği bildirilmiştir (Stadler, 2015; Arris et al., 2020). Ayrıca 3-MCPD'nin gıdalara uygulanan ısıtılma işlemlerinin yanı sıra epiklorohidrin ile işlenmiş sosis kılıfları, çay poşetleri ve kahve filtre kağıtları gibi muhafaza amacıyla kullanılan kağıt ve selüloz kılıflardan migrasyon yoluyla da gıdalara bulaşabileceği vurgulanmıştır (Chung et al., 2008; Vicente et al., 2015).

Kloropropanol esterleri üzerine yapılan çalışmalarda sıklıkla 3-MCPD, 2-MCPD ve 1,3-DCP bileşikler izole ve tanımlanmıştır (Jedrkiewicz et al., 2014). Zheng et al. (2021) bitkisel yağ örneklerinde 2-MCPD ve 3-MCPD esterleri ile glisidil esterlerinin tek bir analiz yöntemiyle belirlenmesine yönelik yaptıkları araştırmalarında örnekleri katı faz dispersiyon ekstraksiyonu ile saflaştırıp daha sonra türevlendirip GC-MS/MS ile tayin etmişlerdir. Diğer bir çalışmada yenebilir yağlarda (sızma zeytinyağı ve ayçiçek yağı) kloropropanol esterlerinin belirlenmesi için hassas ve hızlı yöntem doğrulaması yapılmıştır (Ioime et al., 2021). 3-MCPD esterlerinin nefrotoksisiteyi indüklenme etkisinden dolayı in vitro olarak incelendiği bir araştırmada esterler sitotoksisite ile ilişkili bulunmuştur (Mossoba et al., 2021). Sodyum klorür ve Ter-Bütil Hidrokinon (TBHQ)'nun uzun süreli derin yağda kızartma işleminde 3-MCPD oluşumu üzerine etkisinin incelendiği araştırmada tuz içeriğinin azaltılmasına bağlı olarak esterlerin oluşumunun azaldığı belirlenmiştir. İlave TBHQ'nun kızartma yağlarında 3-MCPD'nin oluşumunu azalttığı rapor edilmiştir (Guo et al., 2021).

Farklı bitkisel yağ üretim yöntemlerinin 3-MCPD esterlerinin oluşumu üzerine etkisinin incelendiği bir araştırmada soğuk preslemenin sıcak preslemeye göre daha az ester içerdiği ve özellikle rafine yağ tüketen insanlarda sağlık açısından büyük risk teşkil ettiği rapor edilmiştir (Chen et al., 2021). Kalkan et al. (2021) ayçiçek yağında patates kızartma işlemi ile 3-MCPD, 2-MCPD ve glisidil esterlerinin oluşumlarını inceledikleri araştırmalarında, en yüksek oluşumun 180°C, 40 dakika ve 300 mg NaCl/100 mL yağ pişirme koşullarında tespit edildiğini ve optimum parametrelerin ise 170°C, 40 dakika ve 100 mg/100 mL yağ pişirme koşullarında belirlendiğini rapor etmişlerdir. Nemati et al. (2021) rafine yağlarda 3-MCPD belirlenmesinde hızlı ve hassas yöntem geliştirmek için yaptıkları çalışmalarında en etkili ekstraksiyon yönteminin kolin klorür (ChCl)-asetik asitten (AcOH) oluşan solvent varlığında gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Wang et al. (2021) ise palm yağı üretiminde polifenollerin etkisini inceledikleri araştırmada; 3-MCPD inhibe edici aktivitenin polifenollerin serbest radikal süpürme aktiviteleri ile bağlantı olmadığını ve en zayıf polifenolün 3-MCPD esterleri üzerine en yüksek inhibitör aktiviteye sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Gonzalez et al. (2022) İspanya'da satışa sunulan gıda maddelerinde monokloropropandiollerin seviyelerini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmalarında 3-MCPD, 2-MCPD, 3-MCPD esterleri ve 2-MCPD esterlerinin miktarlarını sırasıyla 0.657, 0.529, 10.7 ve 5.15 µg/gün olarak tespit etmişlerdir. Kadir et al. (2022) yaptıkları araştırmada, bisküvi üretiminde farklı oranlarda palm yağı ve soya yağı kullanımı ile farklı sıcaklıklarda pişirme işleminin 3-MCPD ve glisidil esterlerinin oluşumu üzerinde etkisini incelemişlerdir. En yüksek pişirme sıcaklığı olan 220°C'de dahi

oluşan 3-MCPD (1.77 mg/kg) ve glisidil ester (1.88 mg/kg) miktarlarının kabul edilebilir limitler içerisinde yer aldığını rapor etmişlerdir. Miyazaki et al. (2022) kızarmış pirinç kraker, bisküvi, patates cipsi, kızarmış patates, fırınlanmış kraker, kraker hamuru, deniz ürünleri ve derin yağda kızartılmış tavuk gibi çeşitli ürünlerde farklı analitik yöntemlerle kloropropanol esterlerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Araştırmacılar enzimatik yöntem ile kloropropanol esterlerinin analizinde 3-MCPD esterleri için ortalama %93.7-98.5 oranında geri kazanım elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Zhong et al. (2022) mutfak kağıtları, kahve filtreleri ve pişirme kağıtları gibi gıda ile temas eden kağıtlarda kloropropanol esterlerinin belirlenmesi üzerine doğru ve hassas yöntem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar Çin’de 126 farklı gıdayla temas eden kağıt örneklerinde 4 farklı kloropropanol (1,3-DCP, 3-MCPD, 2,3-DCP ve 2-MCPD) oluşumunu incelemiş olup, 3-MCPD ve 1,3-DCP bileşiklerinin en yüksek mutfak kağıtlarında sırasıyla ortalama 49.7 µg/L ve 6.2 µg/L olarak belirlendiğini ve baskın bileşikler olduğunu rapor etmişlerdir. Custodio-Mendoza et al. (2023) ise konserve gıdaların yağ fraksiyonlarında 3-MCPD oluşumunu değerlendirmek için yeni, hızlı ve uygun maliyetli enzimatik yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntemin etkin/hassas bir yöntem olduğunu ve en düşük 3-MCPD içeriğinin sızma zeytinyağı (0.20 µg/g), en yüksek 3-MCPD içeriğinin ise ayçiçek yağı (22 µg/g) dolgululu konserve örneklerinde saptandığını rapor etmişlerdir.

## SONUÇ

Gıdalar, içerdikleri besin öğeleri ve biyoaktif bileşikler vasıtasıyla hastalıkların tedavisinde rol alırken, aynı zamanda üretimleri esnasında uygulanan ısı işlemlere bağlı olarak oluşan birtakım zararlı bileşikler vasıtasıyla da bazı hastalıklara neden olmaktadır. Bu bileşikler arasında toksik klorohidrinler olarak nitelendirilen kloropropanoller, kısaca lipitler ile klor iyonu arasında meydana gelen reaksiyonlar neticesinde oluşmaktadır. Kloropropanoller ilk olarak asitle hidrolize edilmiş bitkisel protein hidrolizatlarında tespit edilmiş olup, hidrolizat içeren ürünler başlıca risk grubu olarak değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, daha sonra yapılan çalışmalarda protein hidrolizatı içermeyen pek çok gıdada da (et ve et ürünleri, su ürünleri, fırıncılık ürünleri ve bazı peynir çeşitleri) kloropropanoller tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalarla kloropropanol bileşikleri arasında gıdalarda en çok tanımlanan bileşiğin 3-MCPD olduğu bildirilmiştir. 3-MCPD'ye maruz kalınması halinde vücutta en çok etkilenen organın böbrekler olduğu ve bunun yanı sıra bağışıklık sistemi, üreme sistemi, sinir sistemi, kalp ve karaciğer üzerinde de olumsuz etkiler sergilediği ortaya konmuştur. Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı tarafından Grup 2B'de (olası insan karsinogeni) sınıflandırılan 3-MCPD'nin tolere edilebilir günlük alım miktarı 4 µg/kg vücut ağırlığı/gün olarak belirtilmiştir. Hem literatürde hem de bilimsel çalışmalarda 3-MCPD ön planda olup, diğer kloropropanol bileşiklerine maruz kalmaya dair biyobelirteçlerin belirlenmesi, yasal düzenlemeler açısından daha faydalı olacaktır. Bu nedenle, oluşumları ve toksikolojilerine dair yeterli bilgi olmayışı risk değerlendirmesini kısıtlandırmaktadır. Bu bağlamda, kloropropanol bileşiklerinin oluşum mekanizmaları ve toksikolojileri üzerine daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



## KAYNAKÇA

- Abu-El-Haj, S., Bogusz, M., Ibrahim, Z., Hassan, H., Al Tufail, M. (2007). Rapid and simple determination of chloropropanols (3-MCPD and 1,3-DCP) in food products using isotope dilution GC-MS. *Food Control*, 18, 81-90.
- Albuquerquea, T.G., Costa, H.S., Silva, M.A., Oliveira, M.B.P.P. (2019). Are chloropropanols and glycidyl fatty acid esters a matter of concern in palm oil?. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 494-514.
- Andres, S., Appel, K.E., Lampen, A. (2013). Toxicology, occurrence and risk characterisation of the chloropropanols in food: 2-monochloro-1,3-propanediol, 1,3-dichloro-2-propanol and 2,3-dichloro-1-propanol. *Food and Chemical Toxicology*, 58, 467-478.
- Araujo, M., Beekman, J.K., Mapa, M.S., MacMahon, S., Zhao, Y., Flynn, T.J., Flannery, B., Mossoba, M.E., Sprando, R.L. (2020). Assessment of intestinal absorption/metabolism of 3-chloro-1, 2-propanediol (3-MCPD) and three 3-MCPD monoesters by Caco-2 cells. *Toxicology in Vitro*, 67, 104887.
- Arisseto, A.P., Vicente, E., Furlani, R.P.Z., Toledo, M.C.F. (2013). Estimate of dietary intake of chloropropanols (3-MCPD and 1,3-DCP) and health risk assessment. *Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas*, 33, 125-133.
- Arris, F.A., Thai, V.T.S., Manan, W.N., Sajab, M.S. (2020). A revisit to the formation and mitigation of 3-chloropropane-1,2-diol in palm oil production. *Foods*, 9(12), 1769.
- Baer, I., De la Calle, B., Taylor, P. (2010). 3-MCPD in food other than soy sauce or hydrolysed vegetable protein (HVP). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 396, 443-456.
- Carro, A.M., González, P., Lorenzo, R.A. (2013). Simultaneous derivatization and ultrasound-assisted dispersiveliquid-liquid microextraction of chloropropanols in soy milk and other aqueous matrices combined with gas-chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1319, 35-45.
- Chai, Q., Hayat, K., Karangwa, E., Duhoranimana, E., Zhang, X., Xia, S., Yu, J. (2018). Investigating the optimum conditions for minimized 3-chloropropane-1, 2-diol esters content and improved sensory attributes during savory beef flavor preparation. *Food Chemistry*, 243, 96-102.
- Chen, H., Tsao, C., Chang, Y., Lee, W. (2021). Occurrence of thermally induced glycidyl esters and 3-monochloropropane-1,2-diol esters in refined oils and pressed oils manufactured by different processes and associated with human health risks in Taiwan. *Food Chemistry*, 360, 130053.
- Chung, S.W.C., Kwong, K.P., Yau, J.C.W., Wong, A.M.C., Xiao, Y. (2008). Chloropropanols levels in foodstuffs marketed in Hong Kong. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21, 569-573.

- Custodio-Mendoza, J.A., Ramos, A., Lorenzo, R.A., Carro, A.M. (2023). Ultrasound-assisted enzymatic indirect determination of total 3-monochloropropane-1,2-diol esters in canned fish oil fraction. *Food Chemistry*, 403, 134423.
- EFSA (2013). Analysis of occurrence of 3-monochloropropane-1,2-diol (3-MCPD) in food in Europe in the years 2009-2011 and preliminary exposure assessment. *EFSA Journal*, 11(9), 3381.
- Eisenreich, A., Monien, B.H., Götz, M.E., Buhrke, T., Oberemm, A., Schultrich, K., Abraham, K., Braeuning, A., Schäfer, B. (2023). 3-MCPD as contaminant in processed foods: State of knowledge and remaining challenges. *Food Chemistry*, 403, 134332.
- European Commission (2006). Commission Regulation (EC) No 1881/2006 of 19 December 2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*, 364, 5-24.
- González, N., Marquès, M., Calderón, J., Collantes, R., Corraliza, L., Timoner, I., Bosch, J., Castell, V., Domingo, J.L., Nadal, M. (2022). Occurrence and dietary intake of food processing contaminants (FPCs) in Catalonia, Spain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106, 104272.
- Guo, Y., Zhang, Y., Liu, R., Chang, M., Huang, J., Wang, X. (2021). Contributions of different factors to ratio of 3-monochloro-1,2-propanediol to 2-monochloro-1,3-propanediol esters during frying simulation. *Food Control*, 124, 107853.
- Hamlet, C., Sadd, P. (2002). Kinetics of 3-chloropropane-1, 2-diol (3-MCPD) degradation in high temperature model systems. *European Food Research and Technology*, 215, 46-50.
- Hamlet, C.G., Sadd, P.A., Crews, C., Velíšek, J., Baxte, D.E. (2002). Occurrence of 3-chloro-propane-1,2-diol (3-MCPD) and related compounds in foods: A review. *Food Additives and Contaminants*, 19(7), 619-631.
- Hamzalıoğlu, A., Gökmen, V. (2020). Potential reactions of thermal process contaminants during digestion. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 198-208.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2012). 3-Monochloro-1,2-propanediol. In: *IARC monographs volume 101. Some chemicals present in industrial and consumer products, food and drinking-water*. Lyon, France, 349-374.
- Ioime, P., Piva, E., Pozzebon, M., Pascali, J.P. (2021). Automated sample preparation and analysis by gas chromatography tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) for the determination of 3- and 2-monochloropropanediol (MCPD) esters and glycidol esters in edible oils. *Journal of Chromatography A*, 1650, 462253.

- JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) (2002). 3-Chloro-1,2-propanediol. Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Prepared by the fifty-seventh meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), Geneva WHO Food Additives Series, 48.
- JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) (2007). 3-Chloro-1,2-propanediol (addendum). Safety evaluation of certain food additives and contaminants. Prepared by the sixty-seventh meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), Geneva WHO Food Additives Series, 58, 239-267.
- Jędrkiewicz, R., Głowacz, A., Gromadzka, J., Namieśnik, J. (2016). Determination of 3-MCPD and 2-MCPD esters in edible oils, fish oils and lipid fractions of margarines available on Polish market. *Food Control*, 59, 487-492.
- Jędrkiewicz, R., Głowacz, A., Kupska, M., Gromadzka, J., Namieśnik, J. (2014). Application of modern sample preparation techniques to the determination of chloropropanols in food samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 62, 173-183.
- Kadir, N.S.A., Khor, Y.P., Lee, Y.J., Lan, D., Qi, S., Wang, Y., Tan, C.P. (2022). Formation of 3-MCPD and glycidyl esters in biscuits produced using soybean oil-based diacylglycerol stearin-shortening blends: Impacts of different baking temperatures and blending ratios. *Food Research International*, 162, 112055.
- Kalkan, O., Topkafa, M., Kara, H. (2021). Determination of effect of some parameters on formation of 2-monochloropropanediol, 3-monochloropropanediol and glycidyl esters in the frying process with sunflower oil, by using central composite design. *Journal of Food Composition and Analysis*, 96, 103681.
- Kirton, K.T., Ericsson, R.J., Ray, J.A., Forbes, A.D. (1970). Male antifertility compounds: Efficacy of U-5897 in primates (*Macacamulatta*). *Journal of Reproduction and Fertility*, 21(2), 275-278.
- Lee, B.Q., Khor, S.M. (2015). 3-chloropropane-1,2-diol (3-MCPD) in soy sauce: A review on the formation, reduction, and detection of this potential carcinogen. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 48-66.
- Liu, Q., Han, F., Xie, K., Miao, H., Wu, Y. (2013). Simultaneous determination of total fatty acid esters of chloropropanols in edible oils by gas chromatography-mass spectrometry with solid-supported liquid-liquid extraction. *Journal of Chromatography A*, 1314, 208-215.
- MacMahon, S. (2018). MCPD Esters and glycidyl esters: A review of analytical methods. U.S. Food and Drug Administration, College Park, MD, United States.

- Martin, A.A., Fodjo, E.K., Marc, G.B.I., Albert, T., Kong, C. (2021). Simple and rapid detection of free 3-monochloropropane-1,2-diol based on cysteine modified silver nanoparticles. *Food Chemistry*, 338, 127787.
- Martin, A.A., Fodjo, E.K., Marc, G.B.I., Albert, T., Kong, C. (2021). Simple and rapid detection of free 3-monochloropropane-1,2-diol based on T cysteine modified silver nanoparticles. *Food Chemistry*, 338, 127787.
- Miyazaki, K., Takagishi, Y., Sakamoto, K., Yamada, Y., Koyama, K. (2022). Development of indirect quantitative methods for 3-MCPD fatty acid esters (3-MCPDEs) and glycidyl fatty acid esters (GEs) in thermally processed foodstuffs. *Journal of Oleo Science*, 71(1), 15-29.
- Mossoba, M.E., Mapa, M.S.T., Sprando, J., Araujo, M., Sprando, R.L. (2021). Evaluation of transporter expression in HK-2 cells after exposure to free and ester-bound 3-MCPD. *Toxicology Reports*, 8, 436-442.
- Nemati, M., Altunay, N., Tuzen, M., Farajzadeh, M.A., Nabil, A.A.A., Lotfipour, F., Mogaddam, M.R.A. (2021). Air-assisted liquid-liquid microextraction of total 3-monochloropropane-1,2-diol from refined edible oils based on a natural deep eutectic solvent and its determination by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1656, 462559.
- Oz, E., Oz, F. (2022). Mutagenic and/or carcinogenic compounds in meat and meat products: Heterocyclic aromatic amines perspective. *Теория и практика переработки мяса*, 7(2), 112-117.
- Önal, B., Özdikicierler, O., Yemişçiöğlü, F. (2016). Türkiye piyasasında satışı sunulan patates cipslerinde 3-MCPD esterleri ve glisidil esterleri Miktarları. *Akademik Gıda*, 14 (3), 267-274.
- Rahn, A. K. K., Yaylayan, V.A. (2011). What do we know about the molecular mechanism of 3-MCPD ester formation?. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(3), 323-329.
- Robert, M.C., Oberson, J.M., Stadler, R.H. (2004). Model studies on the formation of monochloropropanediols in the presence of lipase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(16), 5102-5108.
- Samojlik, E., Chang, M.C. (1970). Antifertility activity of 3-chloro-1,2-propanediol (U-5897) on male rats. *Biology of Reproduction*, 2(2), 299-304.
- SCF (2001). Opinion of the Scientific Committee on Food on 3-monochloro-propane-1,2- diol (3-MCPD) updating the SCF opinion of 1994 adopted on 30 May 2001. SCF Opinion, SCF/CNTM/OTH/17 Final. [https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/cs\\_contaminants\\_catalogue\\_mcpd\\_out91\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/cs_contaminants_catalogue_mcpd_out91_en.pdf).
- Sim, B. I., Khor, Y. P., Lai, O. M., Yeoh, C. B., Wang, Y., Liu, Y., Nehdi, I.A., Tan, C.P. (2020). Mitigation of 3-MCPD esters and glycidyl esters during the physical refining process of palm oil by micro and macro laboratory scale refining. *Food Chemistry*, 328, 127147.

- Stadler, R.H. (2015). Monochloropropane-1,2-diol esters (MCPDEs) and glycidyl esters (GEs): An update. *Current Opinion in Food Science*, 6, 12-18.
- Sun, C., Wu, N., Kou, S., Wu, H., Liu, Y., Pei, A., Li, Q. (2022). Occurrence, formation mechanism, detection methods, and removal approaches for chloropropanols and their esters in food: An updated systematic review. *Food Chemistry: X*, 17, 100529.
- Taghizadeh, S.F., Naseri, M., Ahmadpourmir, H., Azizi, M., Rezaee, R., Karimi, G. (2023). Determination of 3 monochloropropane-1, 2-diol (3-MCPD) and 1,3-dichloropropan-2-ol (1, 3-DCP) levels in edible vegetable oils: A health risk assessment for Iranian consumers. *Microchemical Journal*, 192, 108946.
- Turan, S., Solak, R., Keskin, Ş. (2018). Gıdalarda monokloropropandiollerin oluşumu ve belirlenmesi. *Akademik Gıda*, 16 (2), 210-217.
- Türk Gıda Kodeksi (TGK) (2011). Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Yönetmeliği, Gıdalardaki Bulaşanların Maksimum Limitleri, 28157.
- Velíšek, J., Calta, P., Crews, C., Hasnip, S., Doležal, M. (2003). 3-Chloropropane-1,2-diol in models simulating processed foods: precursors and agents causing its decomposition. *Czech Journal of Food Sciences*, 21 (5), 153-161.
- Velíšek, J., Davídek, J., Hajšová, J., Kubelka, V., Janíček, G., Máňková, B. (1978). Chlorohydrins in Protein Hydrolysates. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung*, 167, 241-244.
- Vicente, E., Ariseto, A.P., Furlani, P.Z., Monteiro, V., Gonçalves, L.M. (2015). Levels of 3-monochloropropane-1,2-diol (3-MCPD) in selected processed foods from the Brazilian market. *Food Research International*, 77 (3), 310-314.
- Wang, R., Tao, M., Zhu, Y., Fan, D., Wang, M., Zhao, Y. (2021). Pucararin inhibited 3-chloropropane-1,2-diol fatty acid esters formation by reacting with glycidol and glycidyl esters. *Food Chemistry*, 358, 129843.
- Wong, S.F., Lee, B.Q., Low, K.H., Jenatabadi, H.S., Radzi, C.W.J.B.W.M., Khora, S.M. (2020). Estimation of the dietary intake and risk assessment of food carcinogens (3-MCPD and 1,3-DCP) in soy sauces by Monte Carlo simulation. *Food Chemistry*, 311, 1-8.
- Yaman, Y.T., Bolat, G., Saygin, T.B., Abaci, S. (2021). Molecularly imprinted label-free sensor platform for impedimetric detection of 3-monochloropropane-1,2-diol. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 328, 1-11.
- Yıldırım, A., Yorulmaz, A. (2017). Gıdalarda bulunan 3-Monokloropropan-1,2-diol ve glisidil esterlerinin analiz yöntemleri, azaltılmalarına yönelik çalışmalar ve sağlık üzerine etkilerine ilişkin güncel gelişmeler. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5 (12), 1497-1507.

- Zheng, X., Wusheng, F., Zheng, K., Gao, B., Lin, L., Liu, W., Lin, Z., Fang, Q. (2020). A novel method for the simultaneous determination of esterified 2-/ 3-MCPD and glycidol in foods by GC-MS/MS. *Food Control*, 123, 107766.
- Zhong, H.N., Zeng, Y., Zhu, L., Pan, J.J., Wu, S. L., Li, D., Dong, B., Li, H.K., Wang, X.H., Zhang, H. and Zheng, J.G. (2022). The occurrence of Mono/ Di-Chloropropanol contaminants in food contact papers and their potential health risk. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 101002.



# YAPAY ZEKÂ TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE KARACİĞER KANSERİNİN TESPİTİ

*Mehmet Üsame KARAOSMAN<sup>1</sup>*

*Firdevs Banu ÖZDEMİR<sup>2</sup>*

---

1 Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Simav Sağlık Hizmetleri Meslek  
Yüksekokulu, Simav-Kütahya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-8786-8317)  
email: mehmetusame.karaosman@ksbu.edu.tr

2 Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Simav Sağlık Hizmetleri Meslek  
Yüksekokulu, Simav-Kütahya, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7935-2062)  
email: firdevsbanu.ozdemir@ksbu.edu.tr

## 1.Giriş

Görüntü işleme; elde edilen verilerin ölçme ve değerlendirmeden sonra başka bir cihazda okunabilmesi için dönüştürülmesine yönelik “sinyal işlemeden” ayrı bir işlemdir (Gonzalez, 2009). Farklı bir hedefe yönlendirilmiş olan görüntüler görüntü kaynağından elde edilen ayrı içeriklerden elde edilir. Bu tür görüntüler elektromikroskop, bilgisayar ve ultrason içerikli görüntülerden oluşmaktadır. Görüntü işlemede gerçekleştirilen ön hazırlık evresinde amaç görüntü üzerindeki gürültüleri azaltmaktır (Samtaş ve Gülesin, 2011). Görüntülere yüksek, orta ve düşük seviyede işlemler uygulanmaktadır. Giriş ve çıkış görüntülerinin gerçekliği filtreleme ile düşük düzeydeki işlemler için sağlanır. Orta seviye işlemlerde görüntülerde bulunan nesnelere sınıflandırılması ve tanınması amacıyla tanıma ve bölme işlemleri oluşturulur. Yüksek düzey işlemlerde görüntülerdeki nesnelere seçimi amacıyla görüntülerin analizini içerir. Bu analiz edilmiş görüntülerin detaylandırılmasıyla görüntü işleme tamamlanmış olur (Jähne, 2005).

Son yıllarda yüksek performanslı hesaplama gücü sayesinde yapay zekâ, veri analizinde hızlı ve vazgeçilmez bir yöntem olmuştur. Görüntü işleme yöntemlerinde makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemi çok kullanılan yöntemlerden ikisidir (Uysal ve Akkuş, 2022).

Yapay Zekâ (AI), minimum insan müdahalesiyle akıllı davranış modellemek amacıyla bilgisayar kullanılmasını ifade eden bir terimdir (Hamet ve Tremblay, 2017). John McCarthy yapay zekâ terimini ilk kez 1956’da akıllı makineler üretme mühendisliği ve bilimi olarak tanımlamıştır. 1980’ler ve 1990’larda yapay zekâyı olan ilgide dünya genelinde bir artış görülmüştür. Bayes ağları, Bulanık uzman sistemler, hibrit akıllı sistemler ve yapay sinir ağları gibi yapay zekâ teknikleri, sağlık hizmetlerinde farklı klinik ortamlarında kullanılmıştır. 2016 yılında diğer sektörlerle karşılaştırıldığında yapay zekâ araştırmalarına yapılan yatırımların en büyük kısmı sağlık uygulamalarına yapılmıştır (Amisha ve ark, 2019). Yapay zekâ; doktor teşhisi, epidemiyoloji, farmakolojik çalışmalar, moleküler araştırmalar, medikal teşhis ve tedavi de uygulanmak üzere sağlık sisteminde farklı seviyelerde kullanılmaktadır (Yağın, 2022). Yapay zekâ; regresyon, örnek tabanlı, düzenleme, karar ağacı, bayes, kümeleme, yapay sinir ağı, derin öğrenme, boyut azaltma, topluluk olmak üzere kullanılan birçok algoritmaya sahiptir.

Yapay zekânın fonksiyonlarına göre reaktif makineler, sınırlı bellek, zihin teorisi ve öz farkındalık olmak üzere dört farklı türü bulunmaktadır. Reaktif makineler, geçmişe ait veri saklamadığından, gelecekte yapılacak eylemlerde kullanılacak gerekli bilgi için geçmişteki verileri kullanmamaktadır. Buna örnek; Garry Kasparov’u mağlup eden IBM satranç

programıdır. Garry Kasparov'u mağlup eden IBM tarafından tasarlanmış satranç programı Deep Blue, reaktif yapay zekâ makinesi için bir örnektir (Turan, 2020; Gacar, 2019). Sınırlı bellek makineleri, reaktif makinelerin yapabildiği her şeyi yapabilmekle beraber, karar verme amacıyla yakın geçmişteki verileri kullanarak öğrenebilen makinelerdir. Bildiğimiz uygulamaların birçoğu sınırlı bellek makineleri kategorisinde bulunmaktadır. Şerit değiştirmede yanlış yapan sürücülerini uyararak sistemler ve kendi kendine gidebilen otomobiller bu grupta yer almaktadır (Mueller ve Massaron, 2021). Zihin Teorisi, insan inançları, duyguları ve düşünce süreçlerini ayırt edebilen; insan gibi sosyal etkileşimde bulunabilen yapay zekâ fonksiyonlarından biridir. Fakat bu yapay zekâ türünde henüz uygulama gerçekleştirilememiştir. Öz farkındalık, yapay zekânın son aşamasını temsil eden ve sonuçta ulaşılması hedeflenen sistemlerdir. Bu yapay zekâ türünde makinelerin insanlardakine benzer bilince sahip olması hedeflenmektedir (Turan, 2020).



Şekil 1. Fonksiyonlarına Göre Yapay Zekâ Türleri

## 2. Materyal ve Metot

Hepatoselüler karsinom riski taşıyan kronik karaciğer hastalığı olan hastalara, fokal karaciğer tespiti amacıyla periyodik karaciğer taramasına yapılır; genel olarak ultrasonografi (US) kullanılmaktadır. US'nin **şüpheli olduğu** durumlarda ise MR kullanılmaktadır (Oliva ve Saini, 2004). BT'nin hepatic metastazları tespit etmede yüksek duyarlılığı (%93) ve özgüllüğü (%100) olduğundan, tarama incelemeleri en iyi şekilde kontrastlı BT çalışmasıyla yapılır (Chezmar ve ark, 1988). Böbrek yetmezliği veya iyot alerjisi nedeniyle kontrast madde uygulaması yapılamıyorsa BT'nin yerine karaciğeri tam anlamıyla değerlendirmek amacıyla MR çekilmelidir. Benzer şekilde, hepatic steatoz mevcut olduğu durumda karaciğer metastazlarını gizlenebileceğinden, karaciğerde yağ infiltrasyonu varlığında

MR çekilmelidir (Zhao ve ark., 1998). US, karaciğer parankiminin uygun maliyetli ve hızlı bir şekilde incelenmesine olanak sağladığı ve ihtiyaç duyulan sıklıkta, genelde 3-6 aylık periyotlarla yapılabilmesi nedeniyle birincil tarama testidir (Yamashita ve ark, 1996).

*Tablo 1. Yapay zekanın klinik uygulaması (SWE: Ultrason kayma dalgası elastografi BT: Bilgisayarlı tomografi , PET: Pozitron Emisyon Tomografisi, DCCA-MKL: Derin kanonik korelasyon analizi-çoklu çekirdek öğrenimi, MR: Manyetik rezonans)*

Görev	Tip	Doğru- luk	Referans
1 Kronik karaciğer hastalığının değerlendirilmesi	SWE'ye dayalı makine öğrenimi algoritması	%87,3	Gatos vd. 2017
2 Karaciğerde yeni tümörlerin tespiti	BT'ye dayalı derin öğrenme	%86	Vivanti vd. 2017
3 Metastatik karaciğer malignitesinin tespiti	PET/BT'ye dayalı derin öğrenme	%90,5	Preis vd. 2011
4 Karaciğer tümörlerinin ayırt edilmesi	Ultrason'a dayalı DCCA-MKL çerçevesi	%90,41	Guo vd. 2018
5 Tedavi yanıtını tahmin etmek	MR'a dayalı makine öğrenimi algoritması	%78	Ibragimov vd. 2018

## 2.1 Yapay Zekâ Teknolojileri

Makine öğrenmesi, uzman sistemler, bulanık mantık ve genetik algoritmalar yapay zekâ teknolojilerini oluşturan bölümlerdir.

Uzman Sistemler: Uzman sistemi, bir problemin çözümünde bir veya birden çok uzmanın yeteneklerine sahip olup bunları kullanarak bilgiye dayalı işlemler yapan yardımcı bir bilgisayar sistemidir (Allahverdi, 2002; Turban,1993).

Bir uzman sistemi; bilginin temellendirilmesi, kullanıcı ara birimi, çıkarım mekanizması, bilgi tabanı şeklinde dört temel elemana sahiptir. (Öztemel, 2003)

Genetik Algoritmalar:

Genetik algoritmalarda (GA) veriler gen şeklinde kodlanır. Kodlanan bu genler bilgisayarda mutasyon ve çaprazlama işlemlerinin benzetilmesi

ile elde edilen sonuca uygun biçimde amaç fonksiyonun gerçekleştirilmesiyle sonuca ulaşma prensibine göre çalışmaktadır (Çalışkan ve ark, 2016).

Genetik algoritmanın ana elemanları gen ve kromozom, çaprazlama, çözüm, uygunluk fonksiyonu, mutasyon ve yeniden üretimdir (Öztemel, 2003).

Genetik algoritmalar; finans, pazarlama, optimizasyon, mekanik öğrenme, otomatik programlama bilgi sistemleri ve çizelgeleme, tesis yerleşim, montaj hattı dengeleme, gezgin satıcı, sistem güvenilirliği problemlerinde kullanılırlar.

**Bulanık Mantık:** Bulanık mantık küme teorisine dayanmakta olup ana değerler yanında ara değerlerinde sınıflandırılması ile oluşur. Bu sebeple beklenmedik durumlar ortaya çıkmakta ve karar vermeyi etkilemektedir (Zadeh, 1976). Bu durumda; bulanıklaştırma bulanık önerme işleme ve netleştirme yöntemleri kullanılmaktadır (Mamdani, 1975; Öztürk ve Şahin, 2018).

**Makine Öğrenmesi:** Bilgisayarların kullandıkları verilere göre performansını geliştiren ya da öğrenmesini sağlayan teknolojidir. Üç temel algoritma kullanılır, denetimli, denetimsiz ve takviyeli öğrenme (Öztürk ve Şahin, 2018). Makine öğrenimi teknolojisi, e-ticaret web sitelerinde önerilere, kameralar ve akıllı telefonlarda, sosyal ağlarda içerik filtreleme, web aramalarında kullanılan bir teknolojidir (Leo ve ark., 2015)

### 2.1.1 Makine Öğrenme

Makine öğrenmesi; açıklayıcı ve anlaşılır modeller ile verilerdeki anlaşılmayan durumların ortaya çıkarılmasına yardımcı olan yöntemdir. Bu yöntem, veri tabanlarındaki ilişkileri ve kalıpları açıklayabilir ve makine öğrenmesi sonucu üretilen yöntemler, sağlık alanında tedavi planlaması ve teşhis için yardımcı olabilir. Ortaya konulan yöntemler, hastane sistemlerinde teşhis süresini minimum süreye indirmek amacıyla uyum sağlayan tahmine dayalı yöntemler olarak adlandırılabilir (Sarker, 2021).

#### a. Denetimli Öğrenme

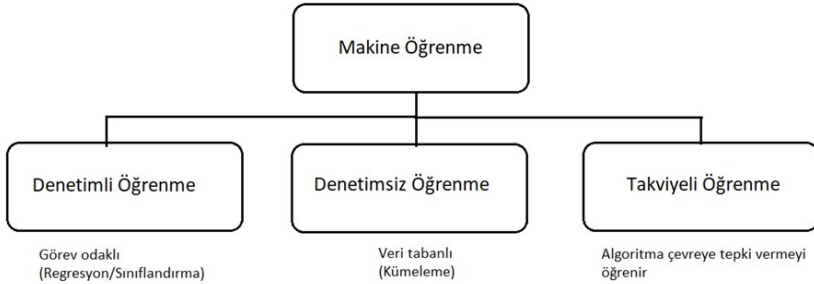
Denetimli öğrenme, makine öğrenmesindeki araştırmaların çoğunun merkezindeki metotları içermektedir. Makine öğrenmesinde bir test ile bir eğitim seti kullanılmaktadır. Test setindeki tanımlanmamış örneklerin doğruluğunu yüksek bir şekilde tanımlamak amacıyla eğitim setinde bulunan bir dizi tanımlanmış örnekten öğrenilmesi olarak tanımlanmaktadır. Denetimli öğrenmedeki temel hedef, sınıf etiketi olan örneklerin analiz edilerek yeni örneklerin sınıflandırılmasında bir prosedür veya program oluşturmayı amaçlamaktadır (Batista ve Monard, 2003).

## b. Denetimsiz Öğrenme

Denetimsiz öğrenme, genel girdi kalıpları koleksiyonunun istatistiksel yapısını sistemlerin belirli girdi kalıpları ile oluşturacak biçimde temsil etmeyi nasıl öğrenebileceğini incelemektedir. Takviyeli veya denetimli öğrenmeden farklı olarak, her giren veri ile ilişkili belirli hedef çıktılar bulunmamaktadır. Denetimsiz öğrenmede, kümeler oluşturulmakta ve bu kümelerin içerisine veriler atanmaktadır. Burada temel amaç veri noktalarının birbirlerine benzeyen veya benzemeyen özelliklerine göre ayrılmasıdır (Ucuza, 2020).

## c. Takviyeli Öğrenme

Takviyeli öğrenme, uzun süreli bir hedef için matematiksel bir ölçüyü en yüksek seviyeye çıkarmak ve sistem kontrolünü amaçlayan öğrenme çeşididir. Takviyeli öğrenme ile denetimli öğrenme arasındaki temel fark, öğrenciye öğrencinin tahminleri ile ilgili yalnızca bölüm bazlı dönüt verilmesidir. Tahminler kontrollü sistemin ilerideki durumunu etkileyebileceği için uzun süreli yansımalarıdır. Burada en önemli etken zamandır. Takviyeli öğrenmedeki temel hedef, verimli öğrenme algoritmalarını geliştirmekle birlikte algoritmaların sınırlamalarını ve yararlarını anlamaktır. Takviyeli öğrenme, yapay zekâdaki problemlerden kontrol mühendisliği veya yönelem araştırmasına gibi bir çok alanda uygulamada kullanılması sebebiyle yoğun çalışılan alanlar arasındadır (Szepesvári, 2010).



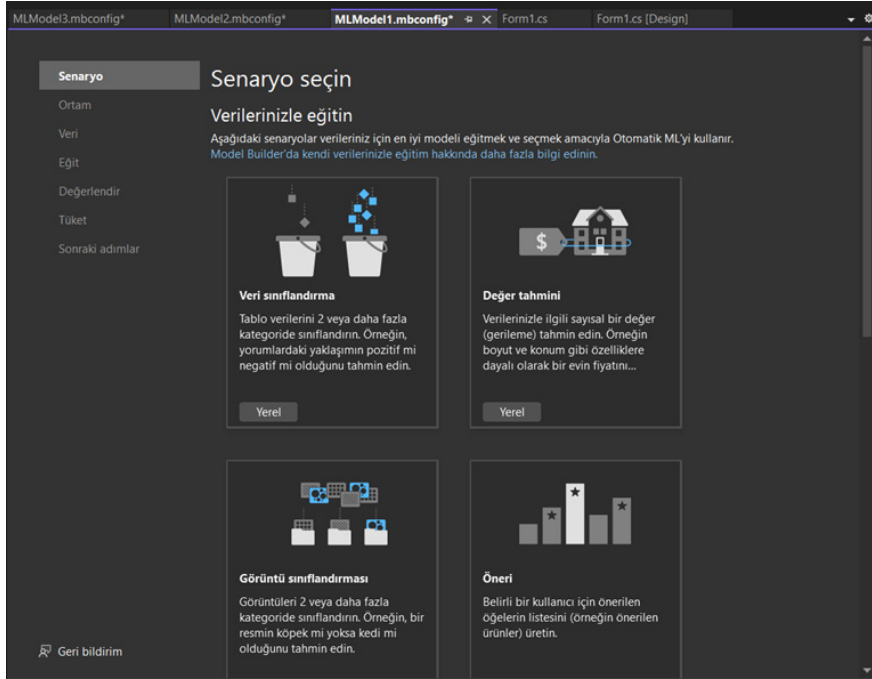
Şekil 3. Makine Öğrenme Türleri

### 3. Bulgular ve Tartışma

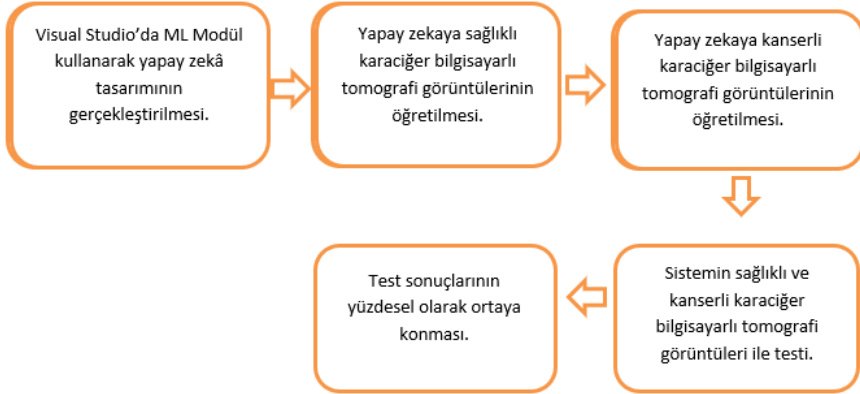
Yapay zekâ (AI), özellikle derin öğrenme algoritmaları, görüntü tanıma görevlerindeki mükemmel performansı nedeniyle büyük ilgi görüyor. Karmaşık tıbbi görüntü özelliklerinin niceliksel değerlendirmesini otomatik olarak yapabilir ve daha yüksek verimlilikle teşhis için daha fazla doğruluk elde edebilirler. Yapay zekâ, radyoloji, ultrason ve nükleer tıp da dahil olmak üzere karaciğerin tıbbi görüntülemesinde yaygın olarak kullanılıyor ve giderek daha popüler hale geliyor. Yapay zekâ, doktorların daha doğru görüntüleme tanıları koymasına yardımcı olabilir ve aynı zamanda doktorların iş yükünü azaltabilir.

Karaciğer tıbbi görüntülemesinde doktorlar genellikle karaciğerde manyetik rezonans görüntüleme, bilgisayarlı tomografi, ultrason ve pozitron emisyon tomografisi gibi görüntüleme yöntemlerini kullanıp sonuçlarını değerlendirerek hastalıkları teşhis eder ve tedavi süreci için karar verir. Uzmanlık ve tecrübeye dayanan bu görsel değerlendirme, bazen kişisel hatalar oluşturabiliyor. Yapay zekâ, doktorların kişisel teşhisleri yerine görüntü bilgilerinin otomatik bir şekilde tanımlayarak niceliksel bir değerlendirme yapabilir. Bu nedenle yapay zekâ, doktorların daha doğru görüntüleme tanıları koymasına yardımcı olabilir ve doktorların iş yükünü büyük ölçüde azaltabilir. Şu anda tıbbi görüntüleme yaygın olarak kullanılan iki tür yapay zekâ yöntemi vardır; biri geleneksel makine öğrenimi algoritmaları, diğeri ise derin öğrenme algoritmalarıdır.

Bu çalışmada, Visual Studio programı kullanılmıştır. Visual Studio programına ML modül eklemesi yapılarak makine öğrenmesi yöntemiyle yapay zekâ eklenmiştir (Şekil 4). Yazılım üç yüz adet sağlıklı karaciğer bilgisayarlı tomografisi görüntüsü eklenmiştir (Şekil 5). Böylece sistem eğitilmiş ve yazılım sağlıklı karaciğer bilgisayarlı tomografisi görüntülerini anlamlandırmıştır. Daha sonra yazılıma üç yüz adet karaciğer kanserli bilgisayar görüntüsü eklenmiştir. Böylece sistem eğitilmiş ve yazılım kanserli karaciğer bilgisayarlı tomografi görüntülerini anlamlandırmıştır. Sistemin doğruluğunu kontrol etmek için yazılıma sağlıklı ve kanserli karaciğer bilgisayarlı tomografi görüntüleri eklenmiştir. Böylece sistemin doğruluğu test edilmiştir.



Şekil 4. Visual Studio ML Model Eklentisi



Şekil 5. Sistemin çalışma algoritması

#### 4. Sonuç

Çalışmanın sonucunda literatürdeki verilerle karşılaştırdığımızda benzer doğruluk oranına ulaşılmıştır. Gerçekleştirdiğimiz yapay zekâ yazılımı sonucunda %95 oranında karaciğer kanseri bilgisayarlı tomografi görüntüleri doğru tespit edilmiştir. Siddique ve arkadaşları benzer bir çalışmada %96,66'lık bir doğruluk elde etmişlerdir (Siddique ve ark, 2023). Naaqvi ve arkadaşları derin evrişimli sinir ağları kullanılarak bilgisayarlı tomografi görüntüleri yoluyla karaciğer kanserinin tespitini yapmışlar ve %98,5'lik doğruluk elde etmişlerdir (Naaqvi ve ark, 2022). Yine benzer bir çalışmada Jose ve arkadaşları %97,6'lık bir doğruluk elde etmişlerdir. (Jose ve Chacko, 2020) Bu yazılımın doktorların karaciğer kanseri teşhisinde yardımcı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada karaciğer kanseri için bilgisayarlı tomografi görüntüleri yapay zekaya öğretilmiştir. İleriki çalışmalarda birçok kanser çeşidinin bu yöntemle bilgisayarlı tomografi görüntüleri yapay zekaya öğretilir. Doktorlara teşhis koymada büyük bir yardım sağlayacağı ve hatalı teşhisin önüne geçileceği düşünülmektedir.



## Kaynaklar

- Amisha PM., Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine. *Fam. Med. Prim. Care Rev* 2019, 8: 2328–2331.
- Batista GE, Monard MC. An Analysis Of Four Missing Data Treatment Methods for Supervised Learning. *Appl Artif Intell* 2003, 17: 519-33.
- Chezmar, J. L., Rumancik, W. M., Megibow, A. J., Hulnick, D. H., Nelson, R. C., & Bernardino, M. E. (1988). Liver and abdominal screening in patients with cancer: CT versus MR imaging. *Radiology*, 168(1), 43-47.
- E. Turban, 1993, Decision support systems, Third edit. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA.
- Gacar, A. (2019). Yapay zekâ ve yapay zekânın muhasebe mesleğine olan etkileri: Türkiye'ye yönelik fırsat ve tehditler. *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, 8, 389-394.
- Gatos I, Tsantis S, Spiliopoulos S, Karnabatidis D, Theotokas I, Zoumpoulis P, Loupas T, Hazle JD, Kagadis GC. Ultrason Kayma Dalgası Elastografi-si Kullanan, Kronik Karaciğer Hastalığının Sınıflandırılmasına Yönelik Renk Analizine Yönelik Bir Makine Öğrenimi Algoritması. *Ultrason Med Biol.* 2017;**43**:1797–1810.
- Gonzalez, R. C. (2009). Digital image processing. Pearson education india.
- Guo LH, Wang D, Qian YY, Zheng X, Zhao CK, Li XL, Bo XW, Yue WW, Zhang Q, Shi J, Xu HX. Kontrastlı ultrason görüntüleri ile karaciğer tümörlerinin bilgisayar destekli teşhisine dayalı, iki aşamalı, çok görüntülü öğrenme çerçevesi. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2018;**69**:343–354.
- Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. *Metab* 2017, 69: 36-40.
- Ibragimov B, Toesca D, Chang D, Yuan Y, Koong A, Xing L. Karaciğer SBRT'sinden sonra bireyselleştirilmiş hepatobiliyer toksisite tahmini için derin sinir ağının geliştirilmesi. *Tıp Fiz.* 2018;**45**:4763–4774.
- Jähne, B. (2005). Digital Image Processing, Springer, 6th Ed., (pp. 7-19), Berlin, 2005.
- Jose, R., & Chacko, S. (2020, December). CAD System for Detection and Classification of Liver Cancer using Optimization Neural Network & Convolution Neural Network Classifiers. In 2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC) (pp. 1-5). IEEE.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436. doi: 10.1038/nature14539
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of manmachine studies*, 7(1), 1-13.

- Mueller, J. P., & Massaron, L. (2021). *Artificial intelligence for dummies*. John Wiley & Sons.
- N. Allahverdi, 2002, *Uzman Sistemler Bir Yapay Zeka Uygulaması*, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
- Naaqvi, Z., Akbar, S., Hassan, S. A., & Ain, Q. U. (2022, May). Detection of liver cancer through computed tomography images using deep convolutional neural networks. In *2022 2nd International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2)* (pp. 1-6). IEEE.
- Oliva, M. R., & Saini, S. (2004). Liver cancer imaging: role of CT, MRI, US and PET. *Cancer imaging*, 4(Spec No A), S42.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya, s.15-18
- ÖZTÜRK, K., & ŞAHİN, M. E. (2018). Yapay Sinir Ağları ve Yapay Zekâ'ya Genel Bir Bakış. *Takvim-I Vekayi*, 6(2), 25-36.
- Preis O, Blake MA, Scott JA. Karaciğerin PET taramalarının sinir ağı değerlendirilmesi: klinik yorumlamada potansiyel olarak yararlı bir yardımcı. *Radyoloji*. 2011;**258**:714–721.
- Samtaş, G., & Gülesin, M. (2011). Sayısal görüntü işleme ve farklı alanlardaki uygulamaları. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 2(1), 85-97.
- Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN computer science*, 2(3), 160.
- Siddique, M. A., Singh, S. K., Hasan, M., & Quazi, T. (2023). Double Stage Gaussian Filtering and Marker Controlled Watershed Transform based Deep Learning Technique to automatically Detect Liver Cancer Using CT Scan Images. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(7s), 177-186.
- Szepesvári C. *Algorithms for Reinforcement Learning*. Synth Lect Artif Intell Mach Learn 2010, 4: 99-103.
- Turan, D. (2020). Yapay zekâ ve vergi uygulamalarına etkisi. *Anadolu Akademi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2(1), 55-70.
- Ucuzal H. *Yapay Zekâya Dayalı Anlamsal Video İşleme Yöntemlerinin Tıpta Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Biyoistatistik ve Tıp Bilişimi Anabilim Dalı. Yüksek Lisans tezi, Malatya: İnönü Üniversitesi, 2020.
- Uysal, E., & YB, A. (2022). Görüntü işleme ve rekonstrüksiyonda yapay zekâ. *Radyasyon Onkolojisinde Yapay Zekâ. Türkiye Klinikleri*, 30-35.

- Vivanti R, Szeskin A, Lev-Cohain N, Sosna J, Joskowicz L. Uzunlamasına karaciğer BT tarama çalışmalarında yeni tümörlerin otomatik tespiti ve tümör yükünün değerlendirilmesi. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2017;**12**:1945–1957.
- Yağın, B. (2022). Yapay zekâ tabanlı görüntü işleme yöntemleri ile COVID-19 tahmini.
- Yamashita, Y., Mitsuzaki, K., Yi, T., Ogata, I., Nishiharu, T., Urata, J., & Takahashi, M. (1996). Small hepatocellular carcinoma in patients with chronic liver damage: prospective comparison of detection with dynamic MR imaging and helical CT of the whole liver. *Radiology*, 200(1), 79-84.
- YÜKSEL, H., Çalışkan, F., & Dayık, M. (2016). Genetik algoritmaların tasarım sürecinde kullanılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 6(2).
- Zadeh, L. A. (1976). A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. In *Systems Theory in the Social Sciences* (pp. 202-282). Birkhäuser, Basel.
- Zhao, X., Wu, N., & Ouyang, H. (1998). Imaging manifestations of tumors metastasized in fatty liver. *Zhonghua Zhong liu za zhi [Chinese Journal of Oncology]*, 20(2), 132-134.





# KOMPOZİT MALZEME ÇEŞİTLERİ UYGULAMA ALANLARI VE GELECEKTEKİ DURUMU ÜZERİNE ARAŞTIRMA

*Abdülhadi KOŞATEPE<sup>1</sup>*

---

<sup>1</sup> Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Patnos Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı AĞRI TÜRKİYE

## GİRİŞ

Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Yapısı; Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu malzemeler, birbirine yapıştırılan veya takviye edilen bileşenlerden oluşur. Genellikle bir matris malzemesi ve takviye edici bileşenlerden oluşurlar (Bogdanov 2023; Xiao-Su, 2018; Munonyedi 2021). Matris malzemesi, kompozit malzemenin ana bileşenidir ve genellikle polimer, metal veya seramiklerden oluşur. Matris malzemesi, kompozit malzemenin şeklini ve dayanıklılığını belirler. Takviye edici bileşenler ise matris malzemesini güçlendirir ve özelliklerini artırır. Bu işe yarar bir kompozit malzeme aynı zamanda fiberler, parçacıklar veya partiküller şeklinde de olabilir. Kompozit malzemeler, farklı materyallerin avantajlarını bir araya getirerek özellikle mukavemet, rijitlik ve hafiflik gibi özelliklerde üstün performans sergiler. Örneğin, fiber takviyeli kompozitler yüksek mukavemet sağlarken aynı zamanda düşük ağırlığa sahiptir. Bununla birlikte, seramik takviyeli kompozitler ise yüksek sıcaklık dayanıklılığı sayesinde dikkat çekerler ( Jones, 2018; Sahmaran and Andrade, 2008; Yan et al., 2012). Kompozit malzemelerin yapısı, takviye edici bileşenlerin matris malzemesine nasıl yerleştirildiğine bağlı olarak şekillenir. Fiber takviyeli kompozitler de, fiberler matris malzemesi içine dikkatlice yerleştirilir, böylece malzemenin dayanıklılığı ve mukavemeti artar. Bununla birlikte, partikül takviyeli kompozitler de ise partiküller matris malzemesine homojen bir şekilde dağıtılır. Bu, kompozit malzemenin özelliklerini ve performansını etkiler ve istenen özelliklerini sağlamak için dikkatli bir yöntem gerektirir. Fiber takviyeli kompozitlerin diğer bir avantajı, malzemenin yüksek dayanıklılığı ve hafifliğidir. Fiberler, matris malzemesine yerleştirildiğinde, malzeme daha sağlam ve hafif hale gelir. Örneğin, fiber takviyeli polimer kompozitler uçak yapımında sıklıkla kullanılır çünkü yüksek dayanıklılıkları ve düşük ağırlıkları sayesinde daha iyi performans sağlarlar. Buna karşılık, partikül takviyeli kompozitler genellikle daha ekonomik bir seçenektir. Partiküller, matris malzemesine homojen bir şekilde dağıtıldığında, malzemenin özelliklerinde düzenlilik ve tutarlılık sağlar. Örneğin, beton gibi partikül takviyeli kompozitler, yapıların güçlendirilmesinde sıklıkla kullanılır çünkü partiküller, malzemenin dayanıklılığını artırarak yapıların daha uzun süre dayanmasını sağlar (Cale, 2023; Lawrence, 2014, Kumar et al. 2019; Wu, 2019).

Kompozit malzemelerin yapısı, bu takviye edici bileşenlerin matris malzemesine doğru bir şekilde yerleştirilmesiyle belirlendiği için, üretim sürecinde büyük bir titizlik ve dikkat gerektirir. Ayrıca, malzeme özelliklerini optimize etmek ve istenen performansı elde etmek için doğru oranlarda ve yöntemlerle takviye edici bileşenlerin yerleştirilmesi çok önemlidir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin doğru şekilde üretildiği ve kullanıl-

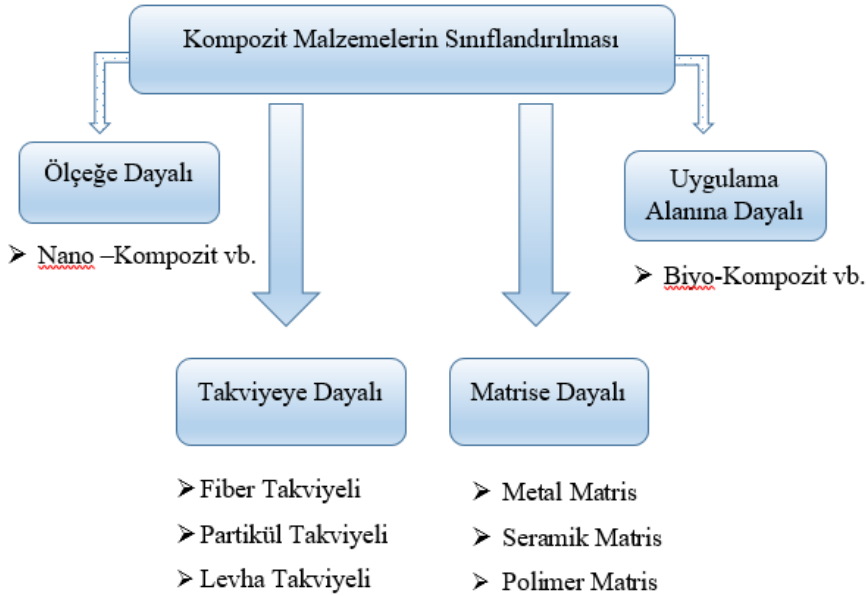
diğından emin olmak için kalite kontrol ve test yöntemleri de büyük bir öneme sahiptir. Bu şekilde, kompozit malzemelerin kullanım alanları daha da genişleyebilir ve daha fazla inovasyon ve gelişme sağlanabilir (Clyne and Hull, 2019; Dai and Fan, 2014; Ehrlich et al., 2008; Naslain and Pomeroy, 2016).

Sonuç olarak, kompozit malzemeler farklı malzemelerin bir araya gelmesiyle elde edilen özel malzemeler olarak tanımlanır. Bu malzemelerin yapısı ve bileşenleri, malzemenin performansını belirleyerek birçok endüstride geniş çapta kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin avantajları ve özellikleri, dayanıklılık, hafiflik ve mukavemet gibi önemli faktörlerle birleşerek birçok uygulama alanında tercih edilmesini sağlar. Örneğin, otomobil endüstrisinde kompozit malzemeler, araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırabilir ve performansı optimize edebilir. Ayrıca, havacılık endüstrisinde kompozit malzemeler, hava araçlarının hafif olmasını sağlayarak yakıt tüketimini ve emisyonları azaltabilir. Bunun yanı sıra, inşaat sektöründe kompozit malzemeler kullanılarak yapıların dayanıklılığı artırılabilir ve sürdürülebilir yapılar oluşturulabilir. Dolayısıyla, kompozit malzemeler, çeşitli alanlarda kullanılarak endüstriyel gelişmeye ve sürdürülebilirlik ilkelerine katkıda bulunabilen değerli malzemelerdir (Teti, 2002; Kumlutaş et al., 2003; Khalid et al., 2003; Wicks et al., 2010; Lubin, 2013; Barbero, 2010; Qin, 2015; Tsai, 2018).

**Kompozit Malzemelerin Özellikleri;** Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip olan malzemelerin birleşimi ile oluşturulan karmaşık bir yapıya sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, güçlendirme materyalleri ve bir matris malzemesi kombinasyonu ile üretilir. Matris malzemesi, kompozit malzemenin temel bileşenini oluşturan ve genellikle polimer, seramik veya metal malzemelerden yapılan bir materyali ifade eder (Michael, 2009). Kompozit malzemeler, uzmanlaşmış birleştirme teknikleri kullanılarak çeşitli özelliklere sahip farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan benzersiz yapılarla karakterizedir. Bu malzemelerin amacı, farklı malzemelerin yüksek performanslı özelliklerini birleştirerek mükemmel bir denge sağlamaktır. Kompozit malzemelerin bu çeşitliliği, çeşitli sektörlerde yenilikçi çözümler sunarak teknolojik ilerlemeyi desteklemektedir (Deborah, 2003; Kumar et al., 2019). Matris malzemeleri, kompozit malzemenin dayanıklılığını artırmak ve takviye malzemelerini tutmak için kullanılan bir yapısal destek

sağlar. Kompozit malzemeler, inşaat, havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günlük hayatımızda da karşımıza çıkan bu malzemeler, hafiflik, dayanıklılık ve mukavemet gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Örneğin, karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, bisiklet ve tenis raketleri gibi spor ekipmanlarında kullanılarak daha hızlı ve daha etkili performans sağlamaktadır ( Barbero, 2010; Wicks et al. 2010; Guo and Leu, 2013; Qin, 2015; Tsai, 2018).

**Kompozit malzeme türleri özellikleri ve uygulama alanları;** Kompozit malzemelerin gelişimi, yeni malzeme teknolojileri ve üretim yöntemleri ile birlikte sürekli ilerlemektedir. Araştırmacılar ve mühendisler, daha verimli ve sürdürülebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesi için çalışmalarını sürdürmektedirler. Kompozit malzemeler kullanılan matris ve takviye elemanına göre Şekil 1'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 1. Kompozitlerin sınıflandırma şeması

### Matrise Dayalı

**Metal Matris:** Metal matrisli kompozitler (MMK), metalik bir matris içinde takviye edici malzemelerin dağılmış olduğu malzemelerdir. Bu kompozit malzemeler, metallerin mükemmel mekanik özellikleri ile takviye malzemelerinin özel özelliklerini birleştirerek gelişmiş performans ve özellikler sunar (Miracle, 2005).

MMK'ların matris malzemesi genellikle alüminyum (Al), magnezyum (Mg), bakır (Cu), nikel (Ni), titanyum (Ti) gibi metallerdir. Bu metallerin seçimi, dayanıklılık, hafiflik, termal iletkenlik gibi özelliklere dayanır. Takviye malzemesi olarak kullanılan materyaller ise genellikle seramikler, karbürler, oksitler veya bazen diğer metallere olabilir. Örnek olarak, silikon karbür (SiC), alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) gibi malzemeler sıkça tercih edilir (Miracle, 2005; Kainer, 2006; Taya, and Arsenault, 2016; Mallick, 2020).

MMK'lar, genellikle iki temel üretim yöntemi kullanılarak üretilir: toz metalürjisi ve sıvı metal enjeksiyonu. Bu yöntemler, matris metalin eritilmesi, takviye malzemesinin eklenmesi ve ardından istenen şekli alması için soğuması aşamalarını içerir (Li, and Laghari, 2019; Mallick, 2020).

Metal matrisli kompozit malzemelerin avantajları;

*Yüksek mukavemet ve rijitlik:* Metal matrisi, kompozitin dayanıklılığını artırır

*Hafiflik:* Alüminyum veya magnezyum matrisi, genel yoğunluğu azaltır

*Termal iletkenlik:* İyi ısı iletim özelliklerine sahiptir

*Mükemmel aşınma direnci:* Takviye malzemesi, aşınma direncini artırabilir

Uygulama Alanları;

*Havacılık ve uzay endüstrisi:* Hafiflik ve mukavemet avantajlarından dolayı

*Otomotiv endüstrisi:* Yakıt verimliliğini artırmak için kullanılır

*Elektronik ve termal yönetim uygulamaları:* İyi termal iletkenlik özellikleri

bahsedilen özellikler tercih edilme nedenleri olarak öne çıkmaktadır.

Zorluklar:

*Üretim karmaşıklığı:* Metal matrisli kompozitlerin üretimi, özellikle homojen bir şekilde takviye malzemesinin dağılması konusunda zorluklar içerebilir

*Maliyet:* Diğer malzemelere göre daha maliyetlidir.

Metal matrisli kompozitler, özellikle yüksek performanslı ve özel uygulamalarda kullanılan, gelişmiş özelliklere sahip malzemelerdir (Li, and Laghari, 2019; Mallick, 2020; Kumar et al. 2023).

**Seramik Matris:** Seramik matrisli kompozitler (SMK), seramik bir matris içinde takviye edici malzemelerin dağıldığı malzemelerdir. Bu tür

kompozitler, seramiklerin yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon direnci ve sertlik gibi özelliklerini takviye malzemelerinin daha esnek özellikleriyle birleştirerek geniş bir uygulama yelpazesi sunar (Zhang, 2014).

Seramik matrisli kompozitlerde matris malzemesi genellikle oksitler (alüminyum oksit, silikon karbür, zirkonyum dioksit gibi), karbürler (silikon karbür, tungsten karbür gibi) veya nitrürler (silikon nitrür gibi) malzemeler içerir.

Takviye malzemesi olarak genellikle seramik, karbon, veya bazen metalik malzemeler kullanılır. Bu takviye malzemeleri, kompozitin mekanik dayanıklılığını artırmak için seçilir (Naslain, 2001; Kopeliovich, 2014; David, 2018).

Seramik matrisli kompozitlerin üretimi, genellikle toz metalürjisi, sıvı faza enjeksiyonu veya seramik yoğunlaştırma yöntemleri gibi özel işlemleri içerir. Bu işlemler, malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılmasını, şekillendirilmesini ve sinterlenmesini içerebilir (Polat et al., 2019).

Seramik matrisli kompozit malzemelerin avantajları;

*Yüksek sıcaklık dayanımı:* Seramik matris, yüksek sıcaklıklara dayanabilir

*Hafiflik:* Takviye malzemeleri genellikle hafif olduğu için kompozit malzeme nispeten hafiftir

*Korozyon direnci:* Seramik matris, korozyona karşı dirençlidir

*Yüksek sertlik:* Seramik takviye malzemeleri, kompozitin yüksek sertlik seviyelerine ulaşmasına katkıda bulunur.

Uygulama Alanları;

*Havacılık ve uzay endüstrisi:* Hafiflik ve yüksek sıcaklık dayanımı avantajlarından dolayı

*Elektronik endüstrisi:* Yüksek sıcaklık ve korozyon direnci gerektiren uygulamalar için

*Savunma endüstrisi:* Balistik koruma uygulamaları gibi alanlarda kullanılır,

bahsedilen özellikler tercih edilme nedenleri olarak öne çıkmaktadır.

Zorluklar:

*Kırılabilirlik:* Seramikler genellikle kırılabilir malzemelerdir, bu da kompozitin darbelere karşı hassas olabileceği anlamına gelir.

Üretim karmaşıklığı: Homojen bir şekilde dağılmış takviye malzemeleri elde etmek zor olabilir.

Seramik matrisli kompozitler, özellikle yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilen, özel özelliklere sahip malzemelerdir.

**Polimer Matris:** Polimer matrisli kompozitler (PMK), bir polimer matris içinde takviye edici malzemelerin dağıldığı malzemelerdir. Bu tür kompozitler, polimerlerin hafifliği, esnekliği ve işlenebilirliği ile takviye malzemelerinin sağladığı mukavemet, sertlik veya diğer özel özelliklerin birleştirilmesiyle çeşitli uygulama alanlarında kullanılır (Davim and Reis, 2003).

Polimer matrisli kompozitler de matris malzemesi genellikle termoplastik veya termoset polimerlerdir. Örnek olarak epoksi, polyester, vinilester, polietilen, polipropilen gibi polimerler kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak genellikle cam elyafı, karbon elyafı, aramid elyafı veya bazen doğal lifler gibi malzemeler kullanılır. Bu takviye malzemeleri, kompozitin mekanik özelliklerini artırmak için seçilir (Wisnom et al., 2006; Thoppul et al., 2009; Dang et al., 2012).

Polimer matrisli kompozitlerin üretimi; genellikle takviye malzemelerinin polimer matris içinde dispersiyonunu içeren kalıp enjeksiyonu, sargılı filament sarım, presleme veya enjeksiyon kalıplama gibi çeşitli yöntemleri içerebilir (Kumar et al., 2019; Verma and Senal, 2019).

Polimer matrisli kompozit malzemelerin avantajları;

*Hafiflik:* Polimer matris, hafif olduğu için genel olarak kompozitin ağırlığını azaltır

*İyi işlenebilirlik:* Polimerler genellikle kolayca şekillendirilebilir ve işlenebilir

*Korozyon direnci:* Polimer matris, korozyona karşı dirençlidir

*Enerji emilimi:* Polimer matris, çarpışma enerjisini emebilme yeteneğine sahiptir

*Mukavemet ve sertlik:* Takviye malzemeleri, kompozitin mekanik özelliklerini artırır

Uygulama Alanları;

*Otomotiv endüstrisi:* Hafiflik avantajı nedeniyle

*Havacılık endüstrisi:* Yüksek mukavemet ve hafiflik avantajlarından dolayı

*İnşaat sektörü:* Yüksek dayanıklılık ve düşük ağırlık için

*Spor malzemeleri:* Yüksek mukavemet ve esneklik kombinasyonu

*Elektronik cihazlar:* İşlenebilirlik ve izolasyon özellikleri nedeniyle bahsedilen özellikler tercih edilme nedenleri olarak öne çıkmaktadır.

Zorluklar;

*Isıl dayanım:* Bazı polimerler yüksek sıcaklıklara dayanıklı değildir

*Kırılma direnci:* Kırılgan olabilir, özellikle düşük sıcaklıklarda

*Yüksek maliyet:* Bazı yüksek performanslı polimerler maliyetlidir

Polimer matrisli kompozitler, geniş bir endüstri yelpazesinde yaygın olarak kullanılan ve özellikle hafiflik, mukavemet ve işlenebilirlik gibi özellikleri ile dikkat çeken malzemelerdir.

### **Takviyeye Dayalı**

Fiber takviye malzemeler: Lif takviyeli kompozit malzemelerde sentetik liflerin, özellikle cam, karbon, bazalt ve kevlar gibi dispers faz olarak kullanılması, malzeme özelliklerini artırarak yüksek mukavemet, rijitlik, sıcaklık ve aşınma direnci gibi avantajlar sağlamıştır. Cam elyaf takviyeli kompozitler düşük maliyetli, hafif ve iyi mukavemet özelliklerine sahip olduğu belirtilmiş olup genellikle otomotiv ve inşaat sektörlerinde kullanılır. Karbon elyafı kompozitler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. Havacılık, uzay ve yüksek performanslı spor malzemelerinde yaygın olarak kullanılır. Aramid elyafı kompozitler yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahiptir. Balistik zırhlar, uçak parçaları ve otomotiv uygulamalarında kullanılır. Fiber takviyeli kompozitlerin matris malzemeleri genellikle polimerler (termoset veya termoplastik), metalik alaşımlar veya seramikler olabilir. Matris malzemesi, kompozitin dayanıklılığı, kimyasal direnci ve işlenebilirliği üzerinde etkilidir (Husić et al., 2005; De Araújo, 2011; Singh and Samanta, 2015).

Üretim Yöntemleri;

*Sargılı Filament Sarım (Filament Winding):* Fiberler, matris malzemesine sarılarak katmanlar oluşturulur

*Kalıp Enjeksiyonu (Mold Injection):* Fiberler, bir kalıp içine enjekte edilerek şekillendirilir

*Presleme (Compression Molding):* Fiber ve matris malzemeleri kalıplarda sıkıştırılarak şekillendirilir

*Lamine Edilmiş Üretim (Lay-Up):* Fiberler, bir kalıp içine yerleştirilir ve ardından matris malzemesi eklenir.

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin avantajları;

*Yüksek mukavemet/düşük ağırlık oranı:* FTK'ler, geleneksel malzemelere kıyasla daha hafif olabilir

*Tasarım Esnekliği:* FTK'ler, özel uygulamalara uygun olarak özelleştirilebilir

*Kimyasal Direnç:* Bazı matris malzemeleri kimyasal ortamlara dayanıklıdır

*Elektriksel İzolasyon:* Bazı fiber türleri elektriksel izolasyon sağlar.

Uygulama Alanları;

Otomotiv endüstrisi (araç parçaları, gövdeler)

Havacılık ve uzay endüstrisi (uçak gövdeleri, pervaneler)

Rüzgar enerjisi (kanatlar)

Spor malzemeleri (bisiklet çerçeveleri, golf sopaları)

İnşaat sektörü (köprüler, yapı elemanları)

yukarıda bahsedilen özellikler fiber takviyeli kompozitlerin tercih edilme nedenleri olarak öne çıkmaktadır.

Zorluklar;

*Maliyet:* Yüksek kaliteli FTK'ler genellikle maliyetlidir

*Geri Dönüşüm:* Geri dönüşüm süreçleri bazı FTK'ler için zor olabilir

*Kırılma Davranışı:* FTK'lerin kırılma davranışı karmaşık olabilir

Fiber takviyeli kompozitler, birçok endüstriyel uygulama için tercih edilen malzemelerdir, çünkü yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve tasarım esnekliği gibi avantajlar sunarlar Rezaei et al., 2009; Davis et al.2010; Singh and Samanta 2015; Dixit et al., 2017).

**Partikül Takviyeli Kompozitler:** Genellikle bir matris malzemesine eklenmiş olan katı partikül takviyelerini içeren malzemelerdir. Bu tip takviyeler, genellikle küçük parçacıklardan oluşur ve genellikle matris malzemesine karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Partikül takviyeli kompozitler, genellikle metal, seramik veya polimer matris içinde dağılmış katı partiküller içeren malzemelerdir. Bu partiküller genellikle mikron veya nanometre ölçeğinde olabilir Gan et al., 2010). Metal matrisli partikül takviyeli kompozitler genellikle hafif alaşımların mukavemetini ve diğer özelliklerini artırmak için kullanılır. Örnek olarak alüminyum matrisli kompozitler verilebilir. Seramik matrisli partikül takviyeli kompozitler genellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu tip kompozitler, seramik matris içinde metal veya seramik partiküller içerebilir. Polimer matrisli partikül takviyeli kompozitler,

genellikle hafiflik, esneklik ve işlenebilirlik gibi özellikleri artırmak için kullanılır (Gopalakrishnan and Murugan, 2012; Balcı et al., 2019).

#### Üretim Yöntemleri;

*Karıştırma ve Sıkıştırma:* Partiküller matris malzemesi ile karıştırılır ve sıkıştırılarak şekillendirilir. Bu yöntemle özellikle metal matrisli kompozitler üretilebilir.

*Toz Metal Metalurjisi:* Toz halindeki metaller, belirli bir şekil vermek için preslenir ve ardından sinterleme veya metal enjeksiyon kalıplama gibi yöntemlerle bir araya getirilir.

*İn situ Üretim:* Partiküller doğrudan matris içinde oluşturulur. Bu, özellikle seramik matrisli kompozitlerde yaygın bir yöntemdir.

#### Özellikleri;

*Yüksek Mukavemet:* Partikül takviyeli kompozitler genellikle yüksek mukavemet sağlar, özellikle partikül-boyut etkileşimleri optimize edildiğinde

*Aşınma Direnci:* Metal veya seramik partiküller, kompozitin aşınma direncini artırabilir

*Termal ve Elektriksel Özellikler:* Matris ve takviye malzemelerinin özelliklerine bağlı olarak termal ve elektriksel özelliklerde iyileştirmeler sağlanabilir

#### Uygulamalar;

*Otomotiv:* Metal matrisli partikül takviyeli kompozitler, otomotiv sektöründe hafif yapı elemanları için kullanılır

*Elektronik:* Seramik matrisli partikül takviyeli kompozitler, yüksek ısıya dayanıklı ve izolasyon özellikleri gerektiren elektronik uygulamalarda kullanılabilir

*Ambalaj:* Polimer matrisli partikül takviyeli kompozitler, hafif ve dayanıklı ambalaj malzemeleri için kullanılabilir

Partikül takviyeli kompozitler, özellikle belirli uygulama gereksinimlerini karşılamak için özelleştirilebilen çok yönlü malzemelerdir. Bu özellikleri, geniş bir endüstriyel yelpazede çeşitli uygulamalara olanak tanır Kouzeli and Mortensen, 2002; Torralba et al., 2003; Aljerf et al., 2012).

**Levha Takviyeli Kompozit:** Levha takviyeli kompozitler, genellikle düz veya levha şeklindeki takviyelerin bir matris içine yerleştirilmesiyle oluşturulur. Takviye malzemeleri arasında genellikle fiberglas, karbon fiber, kevlar veya bazen metal levhalar bulunabilir. Matris malzemesi genellikle polimer, metal veya seramik olabilir (Vinson, 2018). Fiberglass

levhalar, polimer matris içinde yer aldığı mükemmel dayanıklılık ve hafiflik sağlar. İnşaat ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılır. Karbon fiber levhalar, yüksek mukavemet, hafiflik ve uzun ömür gibi özellikleriyle bilinir. Havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanılır. Metal levhalar, genellikle polimer matris içinde kullanılarak dayanıklılığı artırabilir ve özellikle yapısal uygulamalarda tercih edilebilir. (Jones, 2018; Narayan et al.2019).

#### Üretim Yöntemleri:

*Lamine Edilmiş Kompozit Üretimi:* Takviye malzemeleri ve matris sırayla bir araya getirilir ve ardından sıkıştırılır. Bu yöntem, düzgün bir dağılım sağlamak için sıklıkla kullanılır.

*Enjeksiyon Kalıplama:* Sıvı matris malzemesi, bir enjeksiyon kalıbına enjekte edilir ve ardından levha takviyeler eklenir. Bu yöntemle karmaşık şekillere sahip kompozitler üretilebilir.

#### Özellikleri:

*Yüksek Mukavemet:* Takviye malzemeleri, kompozitin genel mukavemetini artırır ve özellikle düzgün bir şekilde yerleştirildiklerinde homojen bir mukavemet profili sunarlar.

*Hafiflik:* Levha takviyeli kompozitler, genellikle yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip oldukları için hafiftirler.

*Dayanıklılık:* Fiberglas, karbon fiber veya metal levhaların eklenmesi, kompozitin dayanıklılığını artırır.

#### Uygulamalar:

*Otomotiv:* Hafif ve dayanıklı olmaları nedeniyle, karbon fiber levha takviyeli kompozitler otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılır.

*İnşaat:* Fiberglas levha takviyeli kompozitler, inşaat sektöründe çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılır.

*Aerospace:* Karbon fiber takviyeli kompozitler, havacılık endüstrisinde yapısal bileşenlerde tercih edilir.

Levha takviyeli kompozitler, özellikle düzgün bir şekilde tasarlandığında ve üretildiğinde çeşitli endüstrilerde geniş uygulama alanlarına sahip olan çok yönlü malzemeler.

#### **Kompozit malzemelerin gelecekteki yönelimi ve gelişmeleri**

Kompozit malzemeler, teknolojik gelişmelerle birlikte sürekli olarak evrim geçirmekte ve gelecekte daha da önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu malzemelerin teknolojik gelişimi, bir dizi faktörden etkilenmekte ve endüstrilerdeki taleplere, araştırma ve geliştirmeye yönelik ya-

tırımlara, üretim teknolojilerindeki ilerlemelere ve malzeme bilimindeki keşiflere bağlıdır. Yenilikçi malzeme bilimi olarak, kompozit malzemelerin gelecekteki durumunu belirleyen önemli bir faktör, malzeme biliminin ilerlemesi ve yeni malzeme türlerinin keşfi olacaktır. Malzeme bilimi, daha dayanıklı, hafif, esnek ve özelleştirilebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlayarak endüstrilere yeni çözümler sunabilir. Diğer taraftan nanoteknoloji ve nano-kompozitler açısından nanoteknoloji, kompozit malzemelerin yapısal özelliklerini daha da iyileştirmek için kullanılabilir. Nano-kompozitler, nanoteknolojinin avantajlarından yararlanarak, malzemenin mukavemetini artırabilir, termal iletkenliği optimize edebilir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda daha etkili hale getirebilir Hasan et al., 2023; Kumar et al. 2019, 2023).

Üretim teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda, üretim süreçlerindeki teknolojik gelişmeler, kompozit malzemelerin daha verimli ve ekonomik bir şekilde üretilmesini sağlayabilir. Otomasyon, 3D baskı ve diğer ileri üretim teknikleri, daha karmaşık ve optimize edilmiş kompozit yapıların hızlı bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Akıllı Malzemeler noktasında kompozit malzemelerin gelecekteki durumunu etkileyecek bir diğer önemli unsur, akıllı malzemelerin entegrasyonudur. Akıllı malzemeler, çeşitli koşullara duyarlı olarak tepki verebilen ve performanslarını optimize edebilen kompozit yapıları mümkün kılar. Bu, özellikle havacılık, otomotiv ve yapı sektörlerinde daha sofistike ve özelleştirilebilir ürünlerin ortaya çıkmasına olanak sağlar.

Sürdürülebilirlik odaklı yenilikler açısından gelecekteki kompozit malzemelerin gelişimi, sürdürülebilirlik odaklı yeniliklere de bağlı olacaktır. Biyo-tabanlı kompozit malzemeler, geri dönüştürülebilir bileşenler ve enerji tasarruflu üretim süreçleri gibi sürdürülebilirlik prensiplerine dayalı malzemelerin geliştirilmesi, endüstrilerin çevresel etkilerini azaltmalarına yardımcı olabilir (Tanzi et al., 2019; Verma and Senal, 2019; Qadir et al., 2023).

Sonuç olarak, kompozit malzemelerin gelecekteki durumu, malzeme bilimi, üretim teknolojileri, sürdürülebilirlik ve akıllı malzemeler gibi alanlardaki ilerlemelerle şekillenecektir. Bu gelişmeler, endüstrilere daha güvenli, dayanıklı, hafif ve çevre dostu ürünler sunma potansiyeli taşımaktadır. Gelecekteki kompozit malzemeler, daha geniş uygulama alanları ve endüstriler arası entegrasyon ile birlikte daha da çeşitlenecek ve inovasyonu teşvik edecektir.

## SONUÇ

Kompozit malzemeler günümüzde birçok endüstriyel alanda kullanılan önemli bir malzeme türüdür. Bu malzemeler, farklı özelliklere sahip olan diğer malzemelerin özelliklerini bir araya getirerek daha kullanışlı ve dayanıklı ürünlerin üretilmesini sağlarlar.

Kompozit malzemeler genellikle iki ana bileşenden oluşur. İlki, matris olarak adlandırılan bir bağlayıcı maddedir. Bu matris, güçlendirici elementleri bir arada tutan ve düzenleyen bir yapı görevi görür. Bir diğer bileşen ise güçlendirici elemanlardır. Bu elemanlar, malzemeye dayanıklılık ve mukavemet kazandıran lifler, parçacıklar veya levhalar olabilir. Matris bileşenleri ise genellikle polimerler, metal alaşımları veya seramiklerden oluşur. Polimer matrisler, hafiflik ve esneklik sağlarken, metal matrisler sağlamlık ve termal iletkenlik sunar. Seramik matrisler ise yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve korozyon direnci sağlar. Güçlendirici elemanlar ise karbon lifleri, cam elyafı veya doğal lifler gibi malzemeler olabilir. Bu takviyeler kompozit malzemelere, yüksek mukavemet-taşıma kapasitesi, iyi aşınma direnci, ayarlanabilir elektrik ve termal özelliği gibi özellikler kazandırır. Ayrıca, güçlendirici elemanların tipi, şekli, boyutu ve dağılımı da malzemenin özelliklerini etkilemektedir. Kısaca bir kompozit malzemenin özellikleri, içerisindeki matris ve güçlendirici elemanların özelliklerine bağlıdır. Dolayısıyla kompozit malzemelerin üretimi ve tasarımı sırasında matris malzemesi takviye malzemesinin özellikleri ve dahi takviye malzemesinin kompozit malzeme içerisinde dağılımı dikkate alınmalıdır.

Kompozit malzemelerin avantajları hafif olmaları ve spesifik mukavemet özellikleri sayesinde, uçak, otomobil ve uzay endüstrilerinde sıkça tercih edilmektedir. Diğer taraftan termal kararlılık, agresif ortamlara karşı yüksek direnç ve iyi aşınma özellikleri sebebiyle yüksek hızlarda, aşırı sıcak ve zorlu şartlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Kısaca kompozit malzemelerin yapısı farklı şekillerde düzenlenebilir ve özellikleri isteğe göre ayarlanabilir. Bu da tasarımcılara ve mühendislere daha fazla esneklik sağlar ve bahsedilen avantajlar, kompozit malzemelerin birçok endüstri için değerli bir seçenek haline getirmektedir. Kompozit malzemelerin avantajları göz önüne alındığında, gelecekte daha da yaygın olarak kullanılmalrı beklenmektedir.

Bu nedenle, kompozit malzemelerin özelliklerini ve uygulama alanlarını daha iyi anlamak için daha fazla araştırma yapılması önemlidir. Bu araştırmalar, kompozit malzemelerin nasıl kullanılabileceği konusunda daha fazla bilgi sağlarken, bu malzemelerin potansiyelini tam olarak anlamamızı sağlar. Özellikle, farklı endüstrilerde nasıl kullanıldıklarını ve hangi avantajlar sunduklarını daha iyi kavramak, gelecekteki üretim

süreçlerimizi iyileştirmemize ve daha yenilikçi ürünler geliştirmemize yardımcı olabilir.

Sonuç olarak, kompozit malzemelerin çeşitli avantajları ve kullanım alanları vardır. Doğru seçim ve tasarım ile bu malzemelerin güvenlik, performans ve dayanıklılık açısından üstün özellikler sunması mümkündür. Bu nedenle, kompozit malzemeler hakkında daha fazla araştırma yaparak, bu malzemelerin potansiyelini tam olarak anlamak ve yeni fırsatlar yaratmak için önemli bir adım atılabilir.

**KAYNAKLAR**

- Aljerf, M., Georganakis, K., Louzguine-Luzgin, D., Le Moulec, A., Inoue, A., & Yavari, A. R. (2012). Strong and light metal matrix composites with metallic glass particulate reinforcement. *Materials Science and Engineering: A*, 532, 325-330.
- Balcı, Ö., Prashanth, K. G., Scudino, S., Somer, M., & Eckert, J. (2019). Powder metallurgy of Al-based composites reinforced with Fe-based glassy particles: Effect of microstructural modification. *Particulate Science and Technology*, 37(3), 286-291.
- Barbero, E. J. (2010). *Introduction to composite materials design*. CRC press.
- Bogdanov, V., R. (2023). Problem of plane strain state of two-layer body in dynamic elastic-plastic formulation (Part III). *Transfer of innovative technologies*, 62-70. doi: 10.32347/tit.2022.51.0302
- Cale, James. (2023). *Materials: Composites*. doi: 10.1016/b978-0-323-90800-9.00055-x
- Chen, Bingsheng. (2015). *Composite section material plate and machining process thereof*.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge university press.
- Dai, D., & Fan, M. (2014). Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications. In *Natural Fibre Composites* (pp. 3-65). Elsevier.
- Dang, Z. M., Yuan, J. K., Zha, J. W., Zhou, T., Li, S. T., & Hu, G. H. (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer-matrix composites. *Progress in materials science*, 57(4), 660-723.
- David, W. R. (2018). *Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design*. CRC Press.
- Davis, D. C., Wilkerson, J. W., Zhu, J., & Ayewah, D. O. (2010). Improvements in mechanical properties of a carbon fiber epoxy composite using nanotube science and technology. *Composite Structures*, 92(11), 2653-2662.
- De Araújo, M. (2011). Natural and man-made fibres: physical and mechanical properties. In *Fibrous and composite materials for civil engineering applications* (pp. 3-28). Woodhead Publishing.
- Deborah, D., L., Chung. (2003). *Science of composite materials*. doi: 10.1007/978-1-4471-3732-0\_2
- Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., Shivhare, P. R., & Bhalavi, T. (2017). Natural fibre reinforced polymer composite materials-a review. *Polymers from renewable resources*, 8(2), 71-78.

- Ehrlich, H., Janussen, D., Simon, P., Bazhenov, V. V., Shapkin, N. P., Erler, C., Mertig, M., Born, R., Heinemann, S., & Hanke, T. (2008). Nanostructural organization of naturally occurring composites—Part II: silica-chitin-based biocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2008, 1-8.
- Gan, Y. X., Solomon, D., & Reinbolt, M. (2010). Friction stir processing of particle reinforced composite materials. *Materials*, 3(1), 329-350.
- Gowda, T. Y., Sanjay, M., Bhat, K. S., Madhu, P., Senthamaraiannan, P., Yogesha, B., & Pham, D. Polymer matrix-natural fiber composites: an overview, *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667>.
- Gopalakrishnan, S., & Murugan, N. (2012). Production and wear characterisation of AA 6061 matrix titanium carbide particulate reinforced composite by enhanced stir casting method. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 302-308.
- Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*, 8, 215-243.
- Hasan, S. A., Zaki, M. U., & Hasan, F. (2023). Properties & characterization of reinforced aluminium metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*.
- Husić, S., Javni, I., & Petrović, Z. S. (2005). Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based polyurethane composites. *Composites science and Technology*, 65(1), 19-25.
- Jones, R. M. (2018). *Mechanics of composite materials*. CRC press.
- Kainer, K. U. (2006). Basics of metal matrix composites. *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, 1-54.
- Khalid, F., Beffort, O., Klotz, U., Keller, B., Gasser, P., & Vaucher, S. (2003). Study of microstructure and interfaces in an aluminium–C60 composite material. *Acta Materialia*, 51(15), 4575-4582.
- Kopeliovich, D. (2014). Advances in the manufacture of ceramic matrix composites using infiltration techniques. In *Advances in Ceramic Matrix Composites* (pp. 79-108). Woodhead Publishing.
- Kouzeli, M., & Mortensen, A. J. A. M. (2002). Size dependent strengthening in particle reinforced aluminium. *Acta materialia*, 50(1), 39-51.
- Kumlutaş, D., Tavman, I. H., & Çoban, M. T. (2003). Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials. *Composites science and technology*, 63(1), 113-117.
- Davim, J. P., & Reis, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite structures*, 59(4), 481-487.

- Kumar, Dipen Rajak., Durgesh, D., Pagar., Ravinder, Kumar., Catalin, I., Pruncu. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of materials research and technology*, doi: 10.1016/J.JMRT.2019.09.068
- Kumar, D., Seetharam, R., & Ponappa, K. (2023). A Review on Microstructures, Mechanical Properties and Processing of High Entropy Alloys Reinforced Composite Materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 172732.
- Lawrence, E, Murr. (2014). *Classification of Composite Materials and Structures*.
- Li, J., & Laghari, R. A. (2019). A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2929-2943.
- Lubin, G. (2013). *Handbook of composites*. Springer Science & Business Media.
- Mallick, P. K. (Ed.). (2020). *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Woodhead publishing.
- Michael, Pfeifer. (2009). *Material Properties and Materials Science*. doi: 10.1016/B978-0-7506-8287-9.00004-5
- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites—from science to technological significance. *Composites science and technology*, 65(15-16), 2526-2540.
- Munonyedi, Kelvin, Egbo. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University: Engineering Sciences*, doi: 10.1016/J.JKSU-ES.2020.07.007
- Narayan, D. A., Ganapathi, M., Pradyumna, B., & Haboussi, M. (2019). Investigation of thermo-elastic buckling of variable stiffness laminated composite shells using finite element approach based on higher-order theory. *Composite Structures*, 211, 24-40.
- Naslain, R. R. (2001). *Ceramic matrix composites: Matrices and processing*. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 1060-1066.
- Naslain, R., & Pomeroy, M. (2016). *Ceramic matrix composites: Matrices and processing*, Reference Module In *Materials Science and Materials Engineering*, 1-8. In.
- Polat, S., Sun, Y., Çevik, E., Colijn, H., & Turan, M. E. (2019). Investigation of wear and corrosion behavior of graphene nanoplatelet-coated B4C reinforced Al-Si matrix semi-ceramic hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, 53(25), 3549-3565.
- Qadir, J., Lewis, A. S., Wessley, G. J. J., & Samuel, G. D. (2023). Influence of nanoparticles in reinforced aluminium metal matrix composites in aerospace applications—A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Qin, Q. (2015). Introduction to the composite and its toughening mechanisms. In *Toughening mechanisms in composite materials* (pp. 1-32). Elsevier.

- Rezaei, F., Yunus, R., & Ibrahim, N. A. (2009). Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials & Design*, 30(2), 260-263.
- Sahmaran, M., Li, V. C., & Andrade, C. (2008). Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*, 105(3), 243.
- Singh, T. J., & Samanta, S. (2015). Characterization of Kevlar fiber and its composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1381-1387.
- Torralba, J. D., Da Costa, C. E., & Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). *Foundations of biomaterials engineering*. Academic Press.
- Taya, M., & Arsenault, R. J. (2016). *Metal matrix composites: thermomechanical behavior*. Elsevier.
- Taylor, D. (2022). *The Theory of Critical Distances*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier.
- Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *CIRP Annals*, 51(2), 611-634.
- Thoppul, S. D., Finegan, J., & Gibson, R. F. (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures—a review. *Composites science and technology*, 69(3-4), 301-329.
- Tsai, S. (2018). *Introduction to composite materials*. Routledge.
- Verma, D., & Senal, I. (2019). Natural fiber-reinforced polymer composites: Feasibility study for sustainable automotive industries. In *Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy* (pp. 103-122). Woodhead Publishing.
- Vinson, J. (2018). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Routledge.
- Wicks, S. S., de Villoria, R. G., & Wardle, B. L. (2010). Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes. *Composites science and technology*, 70(1), 20-28.
- Wisnom, M. R., Gigliotti, M., Ersoy, N., Campbell, M., & Potter, K. D. (2006). Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(4), 522-529.
- Wu, Yunfeng. (2019). *Structure of composite materials*.
- Xiao-Su, Yi. (2018). *An Introduction to Composite Materials*. doi: 10.1007/978-981-10-5696-3\_1
- Yan, D.-X., Ren, P.-G., Pang, H., Fu, Q., Yang, M.-B., & Li, Z.-M. (2012). Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite. *Journal of Materials Chemistry*, 22(36), 18772-18774.

Zhang, C. (2014). Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites. In *Advances in ceramic matrix composites* (pp. 312-339). Woodhead Publishing.





# A356 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA DEMİR DİFÜZYONU, DÖKÜM SICAKLIĞI VE SIVI METAL TEMİZLİĞİNİN AKICILIĞA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Prof. Dr. Mehmet GAVGALI<sup>1</sup>**

*Doç. Dr. Murat ÇOLAK<sup>2</sup>*

*Melek DURMUŞ<sup>3</sup>*

---

1 Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Konya, Türkiye, mgavgali@erbakan.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1581-2605

2 Doç. Dr., Bayburt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bayburt, Türkiye, mcolak@bayburt.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8255-5987

3 Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Konya, Türkiye, melekdurmus211@gmail.com,

ORCID: 0009-0006-1439-3759

## 1. GİRİŞ

Demir dışı metaller içerisinde en yaygın olarak kullanılan metallerin başında alüminyum ve alaşımları gelmektedir. Alüminyum hammadde olarak yeraltından çıkarılan boksit cevheri veya hurdaların geri dönüşümü ile elde edilerek kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, çöktürmeyle sertleşebildiklerinden yüksek mukavemet-ağırlık oranları, mükemmel korozyon direnci, iyi yorulma özellikleri, yüksek kırılma tokluğu ve süneklik, iyi ısı iletkenliği ve kolay dökülebilirlik gibi özelliklere sahiptir. Diğer metallerle göre üstün özelliklere sahip olmasından dolayı makine elemanları, otomotiv, inşaat malzemeleri ve havacılık endüstrileri gibi birçok alanda kullanım yeri bulmaktadır [1-3]. Alüminyum döküm alaşımlarının bileşim açısından bakıldığında yedi farklı temel bileşen içermektedir. Bunlar; alüminyum-bakır, alüminyum-silisyum-bakır, alüminyum-silisyum, alüminyum-silisyum-magnezyum, alüminyum-magnezyum, alüminyum-çinko-magnezyum ve alüminyum-kalay içeren bileşenlerdir. Bunlar arasında alüminyum-silisyum alaşımları, mükemmel döküm özellikleri ve mukavemetleri nedeniyle özellikle alüminyum alaşımlı döküm endüstrisinde önemli bir yere sahiptir [4]. Ayrıca yüksek mukavemetli ve tok Al-Si-Cu-Mg döküm alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinin, otomotiv endüstrisinde döküm alüminyum alaşımlarının uygulanmasını teşvik etmek için etkili olduğu bilinmektedir [6]. Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirme üzerine oldukça yaygın çalışmalar yapılmaktadır [6-10].

Alaşımların ergitme yönteminin alaşım yüzeyinde oluşan oksit filminin kalınlığını da etkilediği yapılan çalışmalarda vurgulanmaktadır [11]. Alüminyum alaşımlı dökümlerde alaşımda bulunan kalıntılar, intermetalikler ve oksitlerin gözeneklilik oluşumunu etkilediği, korozyon direncini ve mekanik özellikleri azalttığı tespit edilmiştir [12]. Yani sıvı metalin kalitesi, alüminyum alaşımlarının özelliklerini, mikro yapılarını, mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir [13-17]. Alaşıma çeşitli elementlerin eklenmesi, alaşımların ergitme yöntemi ve döküm prosesinin tümü, alüminyum alaşımlarının nihai özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Dökümü gerçekleştirilecek sıvı metale tane incelticiler eklendiğinde, ortaya çıkan alüminyum döküm numunelerinde mikroyapının etkilendiği görülmektedir [18]. Alüminyum alaşımlarının birçok alanda kullanımında ve kaliteli ürün üretiminde belirleyici faktör, ergiyik metalin kalitesi ve alaşımların içerisinde bulunabilen istenmeyen elementlerin kontrolüdür. Ergiyik metalin kalitesi, alaşımların genel performansını ve özelliklerini belirleyen en temel unsurlardan biridir [19]. Ergiyik içerisinde bulunan istenmeyen elementlerin minimize edilmesi, alaşımların mekanik dayanıklılığını, korozyon direncini, akışkanlığını ve işlenebilirliğini doğrudan etkileyerek, kaliteli parçaların üretiminde kritik bir rol oynar. Alüminyum ve alaşımla-

rının dökümünde ergiyiği olumsuz etkileyen elementler; Fe, Zn, Cu, Mg ve Mn gibi elementlerdir [20]. Bu elementler, alüminyum metal kalitesini etkileyerek istenmeyen özelliklere veya düşük mekanik değerlere yol açabilir. Özellikle Fe, alüminyum döküm alaşımlarının saflığını olumsuz yönde etkileyen başlıca elementlerden biridir. Bu element, alüminyum alaşımlarının katılma sürecinde ara fazların oluşumunu destekleyerek son ürünün özelliklerini etkilemektedir [21]. Yani alaşımdaki demirin çoğu var olan diğer safsızlıklara veya alaşımdaki diğer elementler ile bağlı olan intermetalikler oluşturmaktadır. Bu intermetalik bileşiklerin; mekanik özellikler, gözeneklilik, akışkanlık, dökülebilirlik, korozyon direnci ve yüzey işlemlerine olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Alaşımda istenmeyen özelliklerin ortaya çıkmasını engellemek ve kaliteyi artırmak için Fe gibi etkileyici elementlerin kontrolü, alaşım üretiminde kritik bir rol oynamaktadır [22].

Alaşım safsızlıklarının en büyük etkileri mikroyapıda görülmekle birlikte, makro olarak en fazla etkisi kalıbın tam olarak dolmayışı ve parçaların hurdaya ayrılması sonuçlarını ortaya çıkarmaktadır. Alüminyum alaşımlarının akıcılığı, sıvı metalin katılma sürecine kadar kalıp içinde aktığı mesafe olarak tanımlanmaktadır. Akışkanlık bir döküm uygulamasının belirli koşulları altında bir alaşımın sıvı veya sıvı-katı ikili fazının sıvı akışı ve katılmasıyla ilgili karmaşık bir davranıştır [23]. Sıvı metalin akıcılığını etkileyen birçok değişken bulunmaktadır. Bunlar; ergimiş alaşımın sıcaklığı, alaşımın bileşimi, kalıp malzemesi katılma esnasında yapı içinde oluşan çökeltiler, inklüzyonlar, oksitler, bifilmeler, yolluk sistemi, viskozite, döküm süresi, kristalleşmenin şekli ve katılması, soğuma hızı, sıvı metal içerisinde bulunan yabancı maddeler gibi faktörlerdir [24]. Ek olarak diğer faktör ise alüminyum alaşımlarının akışkanlığı, metal saflığının azalması sonucunda hızla azalmaktadır. Yani akışkanlıktaki azalma, sıvı metal içerisinde çözünmeyen bileşiklere ve Fe içeren fazların miktarındaki artışa bağlıdır [25]. Alaşımdaki Fe seviyesindeki artış intermetalik sayısını artırdığı için akıcılığı azalttığı bilinmektedir [26,27]. Taghaddos ve arkadaşları çalışmasında 413 alaşımına Fe etkisinin akıcılığı nasıl etkilediğini vakum akıcılık kalıbında döküm yaparak araştırmıştır. Ergiyik içeriğinde bulunan demirin, intermetalik ve inklüzyon oluşumunu artırmasından dolayı sıvı metalin akıcılığını azalttığını gözlemlemişlerdir [28]. Dolayısıyla akıcılık değerinin artması için sıvı metal içerisinden çözünmeyen bileşiklerin veya Fe içeren fazların yok edilmesi gerekmektedir.

Alaşım içerisinde bulunan safsızlık elementlerinin/katışıklarının zararlı etkilerini ortadan kaldırmak için ergiyik alaşıma sıvı metal temizliği, nötrleyici alaşım elementi ilavesi, filtre kullanımı gibi işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemler, alaşım içerisindeki gaz, inklüzyon ve kalıntı gibi kirliliklerin ortadan kaldırılması veya asgari düzeye indirgenbilmesine

imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda en yaygın kullanılan işlem sıvı metal temizleme yöntemleridir. Sıvı metal temizleme işlemlerinin döner tip gaz giderme, sabit lans ile temizleme, tablet/flaks ile temizleme gibi alternatifleri mevcuttur. Sıvı metal temizliği uygulanan alaşımların mekanik özelliklerinin arttığı, kolay dökülebilirlik kazandığı, gözeneklilik oluşumunun azaldığı ve alaşımın akıcılığına olumlu yönde katkı sağladığı yapılan çalışmalarda gözlemlenmektedir [29-31].

Çalışmada A356 alüminyum alaşımının dökümünde, sıvı metal temizliği, döküm sıcaklığı ve difüzyon yoluyla alaşıma geçmesi muhtemel Fe içeriğinin akıcılık üzerinde etkisi deneysel çalışmalar ile araştırılması amaçlanmıştır. Alaşımın dökümünde akıcılığa etki eden parametreler spiral akıcılık kalıbı ile incelenmiştir. Döküm sonrası kalıplardan elde edilen deney numunelerinden ölçümler yapılarak sıvı metal ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir. Böylece alaşımın değişen şartlarda akıcılık özellikleri değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal Metot

**Çalışma kapsamında** döküm sektöründe oldukça yaygın kullanım bulan kimyasal bileşim değerleri Tablo 1’de verilen A356 alüminyum döküm alaşımı birincil külçe olarak kullanılmıştır.

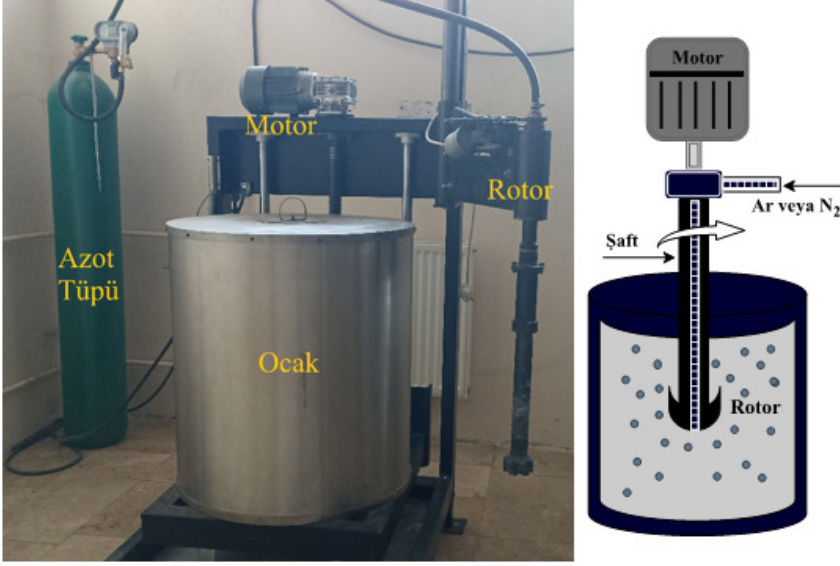
*Tablo 1. A356 alüminyum alaşımı kimyasal bileşimi*

Fe	Si	Cu	Zn	Ni	Ti	Mn	Mg	Al
0.11	7.12	0.01	0.02	0.01	0.08	0.01	0.35	Kalan

A356 alüminyum alaşımının dökümünde akıcılık üzerinde değişen sürelerde Fe difüzyonu, döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizleme işlemi deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Demir difüzyonu etkisi için 700°C ve 750°C sıcaklıklarda sıvı metal içerisine 40 mm çapında sade karbonlu çelik malzeme tatbik edilmiştir. Difüzyon etkisinin süreye bağlı değişimini kontrol etmek için çelik malzeme sıvı metal içerisinde 1 saat, 2 saat ve 5 saat bekletilmiş ve sonrasında dökümler yapılmıştır. Döküm sıcaklığı 700°C ve 750°C olarak belirlenmiştir. Ayrıca dökümlerde deney şartlarına uygun olarak hazırlanan alaşım sıvı metal temizliğinin etkisinin belirlenmesi için temizleme olmaksızın ve temizleme işlemi sonrası dökülmüştür.

Ergitme işlemleri, 10 kW güce sahip 8 kilogram kapasiteli elektrikli ergitme ocağında ve SiC pota kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıvı metal temizleme işleminde Şekil 1’de gösterilen döner tip gaz giderme yöntemi kullanılmıştır. İşlem sıvı metal içerisine daldırılan grafit çubuk ile yapılmıştır. Grafit çubuk istenilen devirde ayarlanarak döndürülmektedir. Dönme etkisiyle oluşan girdapla birlikte sıvı metal içerisine inert azot gazı

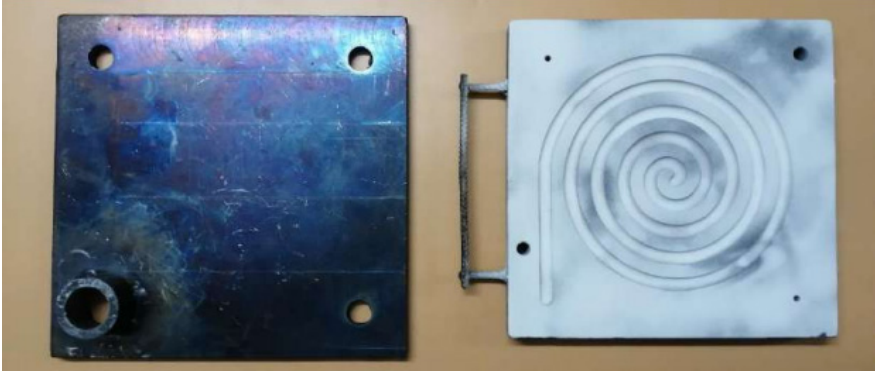
verilmektedir. Çubuğun özel tasarlanmış başlığı ve dönme etkisiyle oluşan girdap sayesinde azot gazı sıvı metalin her yerine ulaşmaktadır. Dönme ve azot gazının etkisiyle sıvı metal içerisinde kabarcıklar oluşmaktadır. Bu kabarcıkların oluşumu ile birlikte sıvı metalde bulunan inklüzyonlar, kirlilikler, oksit filmler sıvı metalin yüzeyine çıkmaktadır. Yüzeyde oluşan bu kirlilikler dökümden hemen önce alınarak döküm gerçekleştirilmektedir. Sıvı metal temizleme işleminde uygulanan gaz debisi ve çark hızı ise literatürdeki araştırmalar baz alınarak yapılan ön denemeler sonucunda 5 lt/dk ve 300 rpm olarak 5dakika boyunca uygulanmıştır.



Şekil 1. Ergitme ve sıvı metal temizleme işlemi sistemi

Deney parametresine uygun olarak gerekli işlemler sonrası hazır hale getirilen sıvı metal, akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için Şekil 2’de verilen 250°C sıcaklıkta önceden ısıtılmış spiral akıcılık kalıbına dökülmüştür.

Değişen şartlarda yapılan dökümler sonrası kalıptan çıkarılan deney numunelerinin sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçülerek aşımın belirlenen deney parametrelerinde akıcılık özellikleri incelenmiştir.



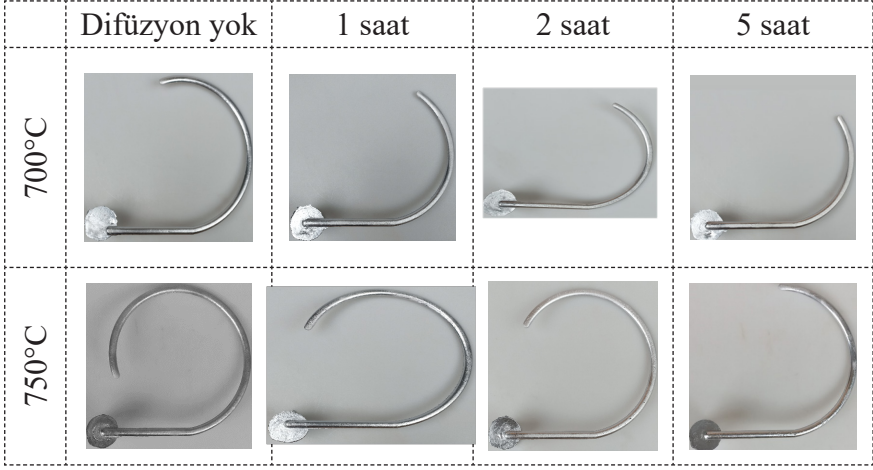
Şekil 2. Spiral akıcılık kalıbının görseli

### 3. Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirilmesi

A356 alüminyum alaşımının dökümünde akıcılığa etki eden parametreler spiral akıcılık kalıbı ile incelenmiştir. Döküm sonrası numuneler kalıptan çıkarılmış ve incelemelere tabi tutulmuştur. Şekil 3'te sıvı metal temizleme işlemi uygulanmayan döküm numuneler, Şekil 4'te temizleme işlemi sonrası gerçekleştirilen döküm numune resimleri verilmiştir.

	Difüzyon yok	1 saat	2 saat	5 saat
700°C				
750°C				

Şekil 3. Sıvı metal temizleme işlemi uygulanmayan döküm deney numunelerinin görselleri



Şekil 4. Sıvı metal temizleme işlemi uygulanmış döküm deney numunelerinin görselleri

Şekil 3 ve Şekil 4’te verilen döküm numune resimleri incelendiğinde değişen parametrelere bağlı olarak sıvı metal ilerleme mesafelerinde farklılıklar ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının artışı ve sıvı metal temizleme işleminin alایشının akıcılık özelliklerine olumlu yönde etki ettiği gözlenmiştir. Ayrıca difüzyon uygulanan deneylerde Fe etkisine bağlı olarak sıvı metal ilerleme mesafelerinde azalma olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçların daha iyi değerlendirilmesi açısından numunelere ait sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de deney numunelerinin değişen döküm şartlarındaki sıvı metal ilerleme mesafesi ölçüm değerleri verilmiştir.

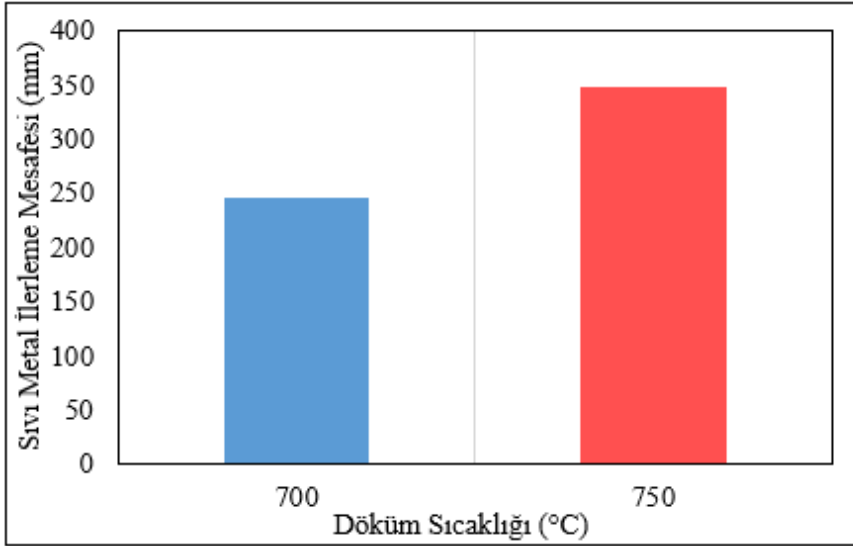
Tablo 2. Deney numunelerinin sıvı metal ilerleme mesafeleri

Sıcaklık	Difüzyon süresi (saat)	Sıvı metal ilerleme mesafesi (mm)	
		Temizleme işlemi yok	Temizleme işlemi var
700°C	0	242	429
700°C	1	100	348
700°C	2	101	365
700°C	5	74	306
750°C	0	345	547
750°C	1	138	502
750°C	2	187	492
750°C	5	163	404

Tablo 2’de verilen değerler incelendiğinde değişen parametrelerde sıvı metal ilerleme mesafelerinin değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Numune boylarının deney şartlarına bağlı olarak 74 mm ile 547 mm arasında değiştiği tespit edilmiştir. En düşük ilerleme mesafesinin 5 saat boyunca sade karbonlu çelik ile 700°C difüzyona tabi tutulduktan sonra temizleme uygulanmadan yapılan döküm deneyinde olduğu, en yüksek ilerleme mesafesinin de difüzyon yapılmamış 750°C’de temizleme sonrası yapılan dökümde elde edildiği gözlenmiştir. Sıvı metal ilerleme mesafesi ölçüm sonuçlarında her bir deney parametresinin akıcılık üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir.

### 3.1. Döküm Sıcaklığının Akıcılık Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Deney parametreleri ayrı ayrı incelenecek olursa ilk olarak döküm sıcaklığının akıcılık üzerinde etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Şekil 5’te diğer parametrelerden bağımsız olarak 700°C ve 750°C’de yapılan dökümlerden elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi değerlerinin ortalamaları verilmiştir.



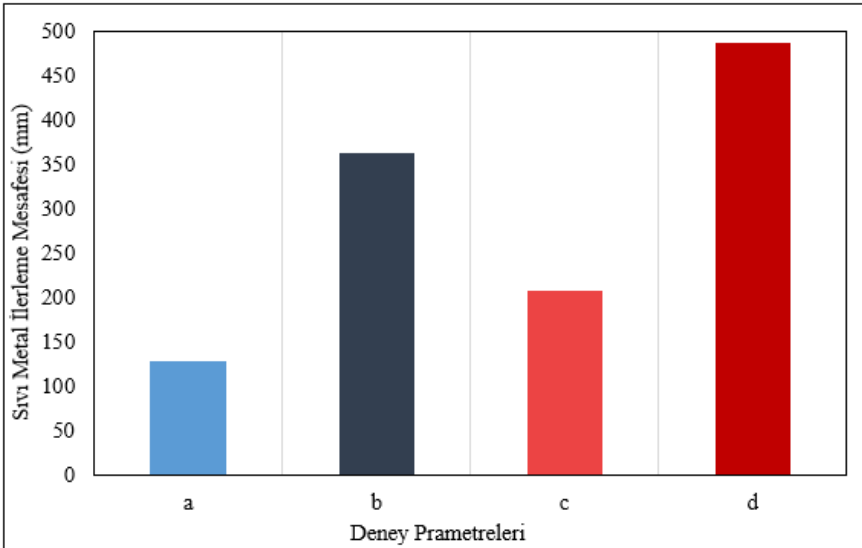
Şekil 5. Döküm sıcaklığına bağlı olarak sıvı metal ilerleme mesafesi ortalamaları

Şekil 5’te verilen grafik incelendiğinde alaşım sıcaklığı 700°C olan numunelerin sıvı metal ilerleme mesafeleri ortalaması 246 mm, 750°C’de dökülen numunelerin sıvı metal ilerleme mesafeleri ortalaması 348 mm olarak ölçülmüştür. Alaşımın döküm sıcaklığı 700°C’den 750°C’ye çıkarıldığında sıvı metal ilerleme mesafesinin yaklaşık olarak %42 oranında arttığı ve döküm sıcaklığı artışının sıvı metal ilerleme mesafesini artırdığı

görülmüştür. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda da alüminyum döküm alaşımlarında sıcaklık değişiminin alaşımın akışkanlığını etkilediği vurgulanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının akıcılığı, çeşitli faktörlerden etkilenen çok yönlü bir olgudur. A356 alüminyum alaşımına çeşitli element ilavelerinin yapılması, yeniden kristalleşme sıcaklığını arttırdığından alaşımın akışkanlığını etkilemektedir [32]. Belirli aralıklarla alaşım sıcaklığı artırıldığında alaşım akışkanlığında artış gözlemlenmiş ve alaşımın en yüksek döküm sıcaklıklarında akışkanlığının arttığı görülmüştür [33, 34]. Ayrıca alüminyum alaşımları ergitilirken ergime sıcaklığının artırılması alüminyum alaşımlarında akışkanlık uzunluğunda orantılı bir artışa yol açtığı belirtilmiştir [35]. Farklı bir çalışmada da akışkanlık sadece döküm sıcaklığı değil kalıp sıcaklıklarının artırılmasıyla da artış göstermektedir [36]. Yapılan çalışmalarda genel olarak, alüminyum döküm alaşımlarının akışkanlığını etkilemede sıcaklığın çok önemli bir rol oynadığını ve farklı alaşımların sıcaklık değişikliklerine farklı tepkiler sergilediğini göstermektedir.

### 3.2. Sıvı Metal Temizliğinin Akıcılık Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Şekil 6'da difüzyondan bağımsız olarak döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizliğinin akıcılık üzerine etkisinin değerlendirilmesi için yapılan deneylerden elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi değerleri verilmiştir.



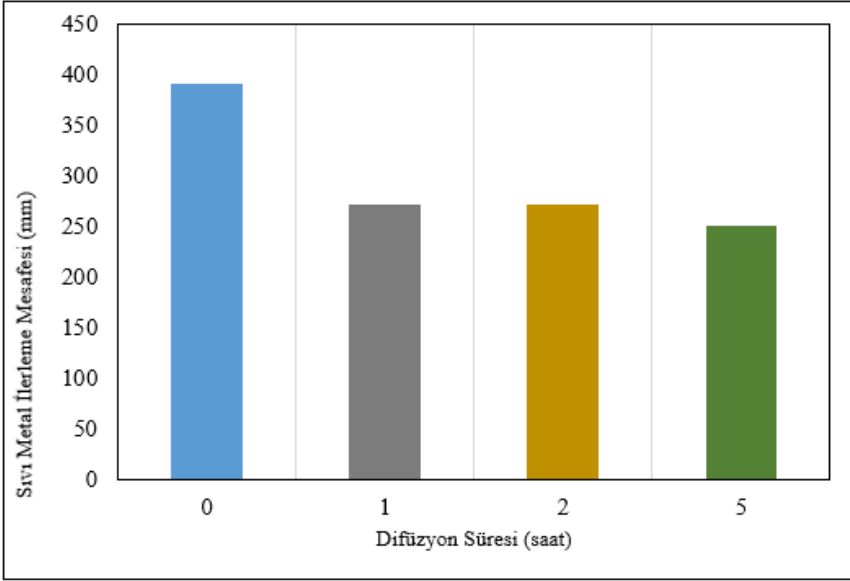
**Şekil 6.** Sıvı metal temizleme ve döküm sıcaklığının akıcılık üzerinde etkisi, a) 700°C temizleme işlemi olmadan, b) 700°C temizleme sonrası, c) 750°C temizleme işlemi olmadan, d) 750°C temizleme sonrası

Şekil 6’da verilen değerler incelendiğinde 700°C temizleme işlemi olmayan durumda sıvı metal ilerleme mesafesi 130 mm, temizleme yapıldığında 362 mm olarak ölçülmüştür. 700°C’de yapılan dökümlerde temizleme işlemi etkisi ile alaşımın sıvı metal ilerleme mesafesinin %180 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Alaşım döküm sıcaklığı 750°C’de temizliği yapılmayan numunelerin sıvı metal ilerleme mesafesi ortalama 208 mm, sıvı metal temizliği yapıldığında 486 mm olarak ölçülmüştür. Temizleme işleminin 750°C’de akıcılık üzerine etkisi karşılaştırıldığında, sıvı metal ilerleme mesafesinin %133 artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca alaşımın döküm sıcaklığı 700°C’den 750°C’ye çıkarıldığında ise sıvı metal ilerleme mesafesi temizleme olmadığı durumda %61 arttığı, sıvı metal temizleme yapıldığında %34’lük bir artış olduğu görülmektedir.

Alüminyum döküm alaşımlarına sıvı metal temizliğinin akışkanlık üzerinde önemli etkileri olduğu yapılan birçok çalışma ile vurgulanmıştır. Alüminyum alaşımlarının akışkanlığı katılaşma aralığı, katılaşma sıcaklığı, alaşımın kayma hızı ve takviye parçacıklarının varlığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir [23]. Alüminyum döküm alaşımlarında alaşım içinde bulunan takviye parçacıklarının, farklı elementlerin varlığının sıvı metalin akışkanlığını azalttığı ve katılaşma oranını etkilediği gösterilmiştir [37]. Ayrıca, çelik ve alüminyum döküm alaşımları arasındaki bimetal bağ kalitesini iyileştirmek için döküm yapıldığında kullanılan malzemelerin kirliliklerinin temizlenmesi önerilmiştir. Bu da döküm kalitesinin sağlanmasında temizliğin kritik rolünü göstermektedir [38].

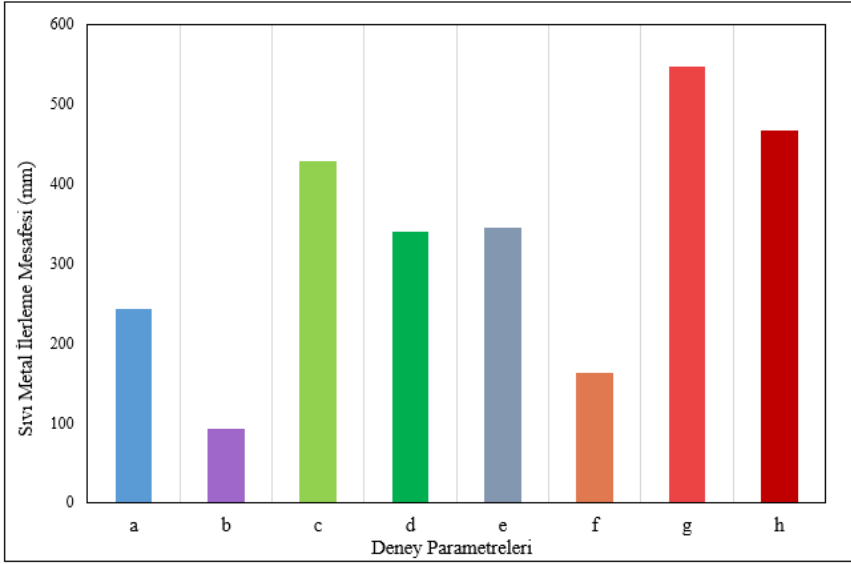
### 3.3. Demir Difüzyonunun Akıcılık Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Deneylerde demir etkisini incelemek için sade karbonlu çelik çubuk, deney parametresine uygun olarak belirlenen sıcaklıklarda 1 saat, 2 saat ve 5 saat boyunca sıvı metal içerisinde tutulmuştur. Difüzyonsuz ve değişen sürelerde demir difüzyonunun etkisini belirlemek için yapılan deneylerden elde edilen sıvı metal ilerleme mesafelerinin ortalama değerleri Şekil 7’de grafik olarak verilmiştir.



*Şekil 7. Difüzyon süresine bağlı olarak sıvı metal ilerleme mesafesinin ortalama değerleri*

**Şekil 7**'de verilen değerler incelendiğinde difüzyon olmadan yapılan dökümlerde elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi ortalaması 390 mm, 1 saat difüzyon uygulama süresinde 272 mm, 2 saat difüzyon uygulama süresinde 271 mm ve 5 saat difüzyon uygulama süresinde 251 mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen ortalama veriler ışığında alaşıma demir difüzyonu uygulandığında diğer dökümlere nazaran %35 üzerinde sıvı metal ilerleme mesafesinde azalma olduğu görülmektedir. **Şekil 8**'de verilen grafikte difüzyon süresi, döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizliği açısından elde edilen sonuçların daha detaylı bir değerlendirmesi grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 8.** Değişen şartlarda sıvı metal ilerleme mesafeleri, a) 700°C temizlemesiz-difüzyonsuz, b) 700°C temizlemesiz-difüzyonlu, c) 700°C temizlemeli-difüzyonsuz, d) 700°C temizlemeli-difüzyonlu, e) 750°C temizlemesiz-difüzyonsuz, f) 750°C temizlemesiz-difüzyonlu, g) 750°C temizlemeli-difüzyonsuz, h) 750°C temizlemeli-difüzyonlu

Döküm sıcaklığı, sıvı metal temizliği ve difüzyon süresinin sıvı metal ilerleme mesafesine etkisinin ortalama değerleri **Şekil 8**'de verilmiştir. 700°C'de temizleme işlemi ve difüzyon etkisi olmadan elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi 242 mm iken difüzyon etkisi ile yaklaşık 92 mm'ye düştüğü tespit edilmiştir. Aynı şartlarda 750°C'de yapılan dökümlerde ilgili değerler 345 mm iken yaklaşık ortalama 162 mm'ye düşmüştür. Burada Fe difüzyonunun değişen şartlara rağmen akıcılık üzerinde olumsuz etkileri ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Temizleme işlemi sonrası ilgili deney numuneleri karşılaştırıldığında 700°C'de difüzyonsuz deney numunelerinde sıvı metal ilerleme miktarı 429 mm iken, difüzyon etkisi ile ilgili değerler 340 mm'ye kadar düşmüştür. 750°C'de ölçülen sıvı metal ilerleme mesafeleri sırasıyla 547 mm ve 466 mm şeklindedir. Elde edilen sonuçlarda döküm sıcaklığı ve sıvı metal temizlemeden bağımsız olarak tüm deneylerde difüzyon etkisi ile sıvı metal ilerleme mesafelerinde ortalama %15 ile %60 arasında bir azalma söz konusudur. Yapılan incelemeler sonucunda Fe difüzyonu ile yapılan dökümlerde alaşımın akıcılık özelliklerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum Fe difüzyonu ile yapıda ortaya çıkması muhtemel bileşiklerin akıcılığı etkilemesinden kay-

naklandığı düşünülmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda literatürde de benzer sonuçlar bulmak söz konusudur.

Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarında bulunan Fe safsızlık elementidir ve intermetalik bileşiklerin oluşumuna katkıda bulunmaktadır [39]. Alüminyum alaşımlarının içeriklerinde bulunan farklı bileşikler, demir ve alüminyumun reaktivitesini vurgulayan, kırılğan intermetalik bileşikler oluşturma eğilimi göstermektedir [40]. Ayrıca alüminyum alaşımında magnezyumun varlığı, demirin alüminyuma difüzyonunun artmasına sebep olmaktadır ve  $Fe_2Al_5$  intermetalik bileşiğinin oluşumunun artmasını teşvik etmektedir [41]. Alüminyum alaşımlarında Fe elementinin katı çözünürlüğü oldukça düşüktür. Fe elementini katı çözünürlüğünün düşük olması intermetalik bileşiklerin oluşumunu artırmaktadır [42]. İntermetalik bileşiklerin oluşumu, alaşım içinde bulunan metallere ve bileşiklerin bağlantılarının etkileşim bölgelerinin boyutundan etkilenmektedir [43]. Alüminyum bazlı alaşımlarda Fe, alaşım içinde temas ara yüzeylerde demir ve alüminyumun reaktivitesini gösteren intermetalik bileşiklerin oluşumuna yol açmaktadır [44]. Ayrıca Fe elementinin sıvı alüminyuma difüzyonu, alüminyum ve çelik malzemelerde alaşım içinde bulunan farklı bağlantılarda intermetalik  $Fe_2Al_5$  fazlarının oluşmasına neden olduğu bilinmektedir [45]. Alüminyum alaşımlarında çözünen Fe, katı parçacıklar olmasından dolayı güçlü bir ayrışma eğilimine sahiptir ve bu yüzden Fe içeren intermetalik bileşikler oluşumunu artırmaktadır [26]. Fe elementi, alüminyum ve mangan elementleriyle birleştiğinde çeşitli intermetalik fazları oluşturarak, alaşım içinde demir ve alüminyumun reaktivitesini belirgin bir şekilde göstermektedir [46]. Ek olarak alüminyum açısından zengin olan bileşikler  $Fe_2Al_5$  veya  $FeAl_3$  gibi alüminyum açısından zengin intermetalik bileşikler oluşma eğilimi göstermektedir [47].

Alüminyum alaşımlarının yapısındaki Fe içeriğini arttırmak, alaşımın çeşitli özellikleri ve davranışları üzerinde çeşitli etkilere neden olmaktadır. Demirin varlığı, alaşımlarda mekanik özellikleri ve korozyon direncini etkileyebilecek Fe intermetalik fazların oluşumuna yol açabilir. Alüminyum alaşımı içerisine eklenen Fe miktarı arttıkça yapıda bulunan Fe intermetaliklerinin miktarı artmaktadır [48]. Alüminyum alaşımlarının katılaşması sırasında alaşım içinde bulunan Fe, son ürünün özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek intermetalik bileşiklerin (farklı fazların) oluşumunu desteklemektedir [49]. Alüminyum döküm alaşımlarına Fe ilavesi, döküm kusurlarını artırmaktadır. Bu da döküm süreci ve ürün kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye işaret etmektedir [50].

Alüminyum alaşımlarına demir ilave edilmesi, alaşım içinde bulunan diğer elementlerden dolayı alaşım içeriğini olumsuz yönde etkileyebilen intermetalik bileşiklerin oluşumu nedeniyle akışkanlığın azalmasına yol açabilir [51]. Alüminyum döküm alaşımlarında alaşım içeriğinde Fe ele-

menti varlığının, sıvı metalin akışkanlığını azalttığı ve katılaşma oranını etkilediği bulunmuştur [43]. Alüminyum alaşımlarının akışkanlığının, alaşımın uluslararası standartlara göre bileşiminin yanı sıra döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi döküm koşullarından da etkilendiğini belirtilmektedir [52]. Sonuç olarak, demirin alüminyum alaşımlarının dökümünde akışkanlık üzerindeki etkisi çok yönlüdür. Alaşımdaki demirin etkisi, çeşitli metaller arası bileşiklerin oluşumuyla sonuçlanır ve bu da farklı alaşım sistemlerinde demir ve alüminyum arasındaki reaktiviteyi ve etkileşimi gösterir. Alaşım içinde bulunan Fe ara fazların oluşumunu, intermetalik bileşikleri ve diğer alaşım elementlerinin etkisini içermektedir.

## KAYNAKÇA

1. Sajadifar, S. V., Scharifi, E., Weidig, U., Steinhoff, K., & Niendorf, T. (2020). Performance of thermo-mechanically processed AA7075 alloy at elevated temperatures—From microstructure to mechanical properties. *Metals*, 10(7), 884.
2. Isadare, A. D., Aremo, B., Adeoye, M. O., Olawale, O. J., & Shittu, M. D. (2013). Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy. *Materials Research*, 16, 190-194.
3. Tokatlı, M., Uslu, E., Çolak, M. Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Sıvı Metal Temizliği Kontrol Yöntemlerinin İncelenmesi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 235-247.
4. Kaufman, J. G., Rooy, E. L., & Handbook, A. S. (2004). Aluminum Casting Alloys Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications. Materials Park: ASM International, 7-20.
5. Zhang, M., Tian, Y., Zheng, X., Zhang, Y., Chen, L., & Wang, J. (2023). Research Progress on Multi-Component Alloying and Heat Treatment of High Strength and Toughness Al–Si–Cu–Mg Cast Aluminum Alloys. *Materials*, 16(3), 1065.
6. Gao, Q., Yang, B., Gan, G., Zhong, Y., Sun, L., Zhai, W., ... & Lu, Y. (2020). Microstructure and wear resistance of TiB<sub>2</sub>/7075 composites produced via rheocasting. *Metals*, 10(8), 1068.
7. Çolak, M. (2019). Modification of eutectic Al–Si alloys by Sr and CuSn<sub>5</sub>. *Materials Research Express*, 6(10), 1065a2.
8. Çolak, M., & Kayıkçı, R. (2009). Alüminyum dökümlerinde tane inceltme. *Sakarya University Journal of Science*, 13(1), 11-17.
9. Teke, Ç., Çolak, M., Taş, M., & İpek, M. (2019). Modeling of the impact of initial mold temperature, Al<sub>5</sub>Ti<sub>1</sub>B and Al<sub>10</sub>Sr additions on the critical fraction of solid in die casting of aluminum alloys using fuzzy expert system. Polish Acad Sciences Inst Physics.
10. Yılmaz, G., Colak, M., & Uslu, E. (2023). Solidification analysis for variable thickness aluminum castings: simulation and chill design insights. *Engineering Research Express*, 5(4), 045021.
11. Grachev, V. (2017). Aluminium Alloys Smelting in Shaft-Reverberatory Furnaces in a Liquid Bath Mode. *Archives of Foundry Engineering*, 17(2), 183-189.
12. Chen, Y. J. (2010). Ultrasonic evaluation of the quality of A356. 2 alloy by fluxing treatment. *Materials transactions*, 51(4), 803-809.
13. Erzi, E., Gürsoy, Ö., Yüksel, Ç., Colak, M., & Dispınar, D. (2019). Determination of acceptable quality limit for casting of A356 aluminium alloy: supplier's quality index (SQI). *Metals*, 9(9), 957.

14. Çolak, M., Kayikci, R., & Dispınar, D. (2016). Melt cleanliness comparison of chlorine fluxing and Ar degassing of secondary Al-4Cu. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47, 2705-2709.
15. Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., Yüksel Ç. (2022). Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yaygınca Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(1), 423-434.
16. Tigli, A., Tokatli, M., Uslu, E., Colak, M., & Dışpınar, D. (2023). Correlation Between K-value, Density Index and Bifilm Index in Determination of Liquid Al Cleanliness. *Archives of Foundry Engineering*, 23(3).
17. Tokatlı, M., Uslu, E., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Investigation of the effect of liquid metal quality on feedability in casting of A356 aluminum alloys. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 7(3).
18. Maumela, M., Moema, J., & Buthelezi, T. (2022). Efficiency of different commercial TiBAl grain refiners on refinement of pure aluminum cast structures. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 370, p. 04003). EDP Sciences.
19. Usenko, N. I., Shevchenko, M. A., Kotova, N. V., Berezutskii, V. V., Ivanov, M. I., & Sudavtsova, V. S. (2015). Mixing enthalpies of Al-Co melts. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 54, 324-330.
20. Han, J., Liu, Z., Jia, Y., Wang, T., Zhao, L., Guo, J., ... & Chen, Y. (2020). Effect of TiB<sub>2</sub> addition on microstructure and fluidity of cast TiAl alloy. *Vacuum*, 174, 109210.
21. Rathinasuriyan, C., Bharath, A., & Sridhar, K. (2022). Reducing iron content from aluminium molten bath through filter bag, centrifugal separation and flux refining method. *Materials Today: Proceedings*, 62, 1026-1032.
22. Design, L. E. O. S. C. (2007). Handbook. NASA, Washington, DC, NASA HDBK-4006, approved June, 3.
23. Ravi, K. R., Pillai, R. M., Amaranathan, K. R., Pai, B. C., & Chakraborty, M. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 456(1-2), 201-210.A.
24. Fazeli, A. H., Saghafian, H., Boutorabi, S. M. A., & Campbell, J. (2021). The fluidity of aluminium ductile irons. *International Journal of Metalcasting*, 1-10.
25. Taylor, J. A. (2012). Iron-containing intermetallic phases in Al-Si based casting alloys. *Procedia Materials Science*, 1, 19-33.
26. Wang, L., Makhlof, M., & Apelian, D. (1995). Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships. *International materials reviews*, 40(6), 221-238.
27. Gowri, S., & Samuel, F. H. (1994). Effect of alloying elements on the solidification characteristics and microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25, 437-448.

28. Taghaddos, E., Hejazi, M. M., Taghiabadi, R., & Shabestari, S. G. (2009). Effect of iron-intermetallics on the fluidity of 413 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 468(1-2), 539-545.
29. Colak, M., Kayikci, R., & Dispınar, D. (2015). Influence of different cross sections on fluidity characteristics of A356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68, 275-281.
30. Şensoy, A. T., Çolak, M., Kaymaz, I., & Dispınar, D. (2020). Investigating the optimum model parameters for casting process of A356 alloy: A cross-validation using response surface method and particle swarm optimization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 9759-9768.
31. Çolak, M., & Kaya, S. (2021). Investigation of the effect of inoculant and casting temperature on fluidity properties in the production of spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74, 205-214.
32. Prukkanon, W., Srisukhumbowornchai, N., & Limmaneevichitr, C. (2009). Influence of Sc modification on the fluidity of an A356 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 487(1-2), 453-457.
33. Timelli, G., & Bonollo, F. (2007). Fluidity of aluminium die castings alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, 20(6), 304-311.
34. Teke, Ç. (2022). Determination of flow distance of the fluid metal due to fluidity in ductile iron casting by artificial neural networks approach. *Open Chemistry*, 20(1), 1019-1028.
35. Liu, Y., Liu, M., Luo, L., Wang, J., & Liu, C. (2014). The solidification behavior of AA2618 aluminum alloy and the influence of cooling rate. *Materials*, 7(12), 7875-7890.
36. Huang, H., Wang, Y. X., Fu, P. H., Peng, L. M., Jiang, H. Y., & Xu, W. Y. (2013). Fluidity of AZ91D and Mg-3Nd-0.2Zn-Zr (wt-%) magnesium alloys: response to pouring and mould temperature. *International Journal of Cast Metals Research*, 26(4), 213-219.
37. Behera, R., Chatterjee, D., & Sutradhar, G. (2012). Effect of reinforcement particles on the fluidity and solidification behavior of the stir cast aluminum alloy metal matrix composites. *American Journal of Materials Science*, 2(3), 53-61.
38. Suryadarma, E. H. E., Ai, T. J., Bawono, B., & Siswantoro, A. T. (2022). Improving bimetal bond quality between cast steel and aluminum alloys using response surface methodology. *International Journal of Metalcasting*, 1-10.
39. Song, L. Y., Liu, H. X., Nie, S. N., Yu, B. Y., Wang, S. C., Zheng, L., & Li, R. X. (2019). Microstructure and fracture behavior of Al-Si-Mg alloy prepared with recycled alloy. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 50(4), 462-470.

40. Chen, C. M., & Kovacevic, R. (2004). Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(11), 1205-1214.
41. Watanabe, T., Sakuyama, H., & Yanagisawa, A. (2009). Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al–Mg alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16), 5475-5480.
42. Zhang, W., Sun, D., Han, L., Gao, W., & Qiu, X. (2011). Characterization of intermetallic compounds in dissimilar material resistance spot welded joint of high strength steel and aluminum alloy. *Isij International*, 51(11), 1870-1877.
43. Mohan, D. G., Tomków, J., & Karganroudi, S. S. (2022). Laser welding of UNS S33207 hyper-duplex stainless steel to 6061 aluminum alloy using high entropy alloy as a filler material. *Applied Sciences*, 12(6), 2849.
44. Goto, I., Shirai, K., Ohyama, R., & Kurosawa, K. (2022). Dissolution Mechanism of Intermetallic Layer by Iron Erosion in Aluminum-Based Molten Binary Alloys. *Materials Transactions*, 63(5), 730-739.
45. Shao, L., Shi, Y., Huang, J. K., & Wu, S. J. (2015). Effect of joining parameters on microstructure of dissimilar metal joints between aluminum and galvanized steel. *Materials & Design*, 66, 453-458.
46. Scharf, C., & Ditze, A. (2007). Iron pickup of AZ91 and AS31 magnesium melts in steel crucibles. *Advanced Engineering Materials*, 9(7), 566-571.
47. Sasaki, T., Yakou, T., Mochiduki, K., & Ichinose, K. (2005). Effects of carbon contents in steels on alloy layer growth during hot-dip aluminum coating. *ISIJ international*, 45(12), 1887-1892.
48. Khalifa, W., Samuel, F. H., & Gruzleski, J. E. (2003). Iron intermetallic phases in the Al corner of the Al-Si-Fe system. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34, 807-825.
49. de Moraes, H. L., de Oliveira, J. R., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2006). Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration. *Materials transactions*, 47(7), 1731-1736.
50. Bolibruchová, D., & Richtárech, L. (2013). Effect of adding iron to the Al-Si7Mg0.3 (EN AC 42 100, A356) alloy. *Manufacturing technology*, 13(3), 276-281.
51. Ahmad, R., Asmael, M. B. A., & Ourdjini, A. (2014). Effect of high Cerium and Lanthanum on Impact toughness of Al-11Si-Cu eutectic cast alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 195-198.
52. Haga, T., Imamura, S., Watari, H., & Nishida, S. (2020, September). Effect of Casting Conditions on Fluidity of Aluminum Alloy in Die Casting. In *International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing* (Vol. 83624, p. V001T05A013). American Society of Mechanical Engineers.



# OTONOM ARAÇLARDA KULLANILAN SENSÖRLERİN İNCELENMESİ

**Doç. Dr. Mustafa NAMDAR<sup>1</sup>**  
***Dr. Öğr. Üyesi Arif BAŞGÜMÜŞ<sup>2</sup>***  
***Ferhat AĞAÇ<sup>3</sup>***

---

1 Doç. Dr. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye, mustafa.namdar@dpu.edu.tr,

ORCID: 0000-0002-3522-4608

2 Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, basgumus@uludag.edu.tr,

ORCID: 0000-0002-0611-3220

3 Yüksek Lisans Öğrencisi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Anabilim Dalı, Bursa, Türkiye, 502338009@ogr.uludag.edu.tr,

ORCID: 0009-0008-3055-5951

## Giriş

Ulaşım sektöründe büyük gelişmeler ortaya çıkmış ve çıkmaya devam etmektedir. Ulaşım sektörünün en önemli parçalarından biri olan karasal ulaşım araçları her geçen gün gelişmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte insan faktöründen kaynaklanan hataları minimuma indirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla sensör teknolojisi alanında çalışmalar yapılmış ve modern bir araç üzerinde onlarca sensör konumlandırılmıştır. Sensör teknolojisinin de gelişimiyle birlikte ulaşım sektöründe bir basamak daha atılmış ve insan faktörünü tamamen ortadan kaldırmaya yönelik adımlar atılmaktadır. Bunlardan biri otonom araçların kullanıma sunulması olarak gösterilebilir. Otonom araçlar üzerinde çeşitli amaçlara hizmet eden sensörler bulunmakla birlikte, bunlardan RADAR (Radio Detection and Ranging), LiDAR (Light Detection and Ranging), kameralar ve ultrasonik sensörler en önemlileri olarak sayılabilir.

Sensör ve iletişim teknolojisindeki önemli ilerlemeler ve engel tespit teknikleri ile algoritmaların güvenilir bir şekilde uygulanmasıyla birlikte otonom sürüş, ulaşım ve mobilitenin geleceğinde devrim yaratabilecek önemli bir teknoloji haline gelmektedir. Sensörler, otonom bir sürüş sisteminde araç çevresinin algılanması açısından temel öneme sahiptir ve birden fazla entegre sensörün kullanımı ve performansı, otonom sürüşlü araçların güvenliğini ve fizibilitesini doğrudan belirleyebilir [1].

Otomotiv radarları, LiDAR, ultrason ve kameralar gibi diğer sensörlerle birlikte, sürücüsüz araçların ve gelişmiş sürücü asistanı sistemlerinin (Advanced Driver-Assistance Systems, ADAS) omurgasını oluşturur. Bu teknolojik gelişmeler, radarlardan/sensörlerden kontrolöre kadar uzun bir sinyal işleme yoluna sahip son derece karmaşık sistemler tarafından sağlanmaktadır. Otomotiv radar sistemleri, nesnelere ve engellerin, konumlarının ve araca göre hızlarının algılanmasından sorumludur. Milimetre-dalga (mm-dalga) yarı iletken teknolojisindeki ilerleme ile sinyal işleme tekniklerinin gelişmesi, otomotiv radar sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır [2].

LiDAR'lar, çevrelerindeki nesnelere algılamak ve mesafe, hız ve konum bilgilerini elde etmek için lazer ışını kullanırlar. LiDAR'lar

genellikle 360° görüş sağlamak için aracın üzerine monte edilir ve aracın etrafındaki nesnelerin üç boyutlu haritasını oluştururlar. Ultrasonik sensörler ise kaynaktan iletilen akustik dalgaların yansımından faydalanarak mesafe, konum gibi çevresel bilgileri elde ederek otonom sürüş için katkı sağlarlar.

## 1. Otonom Araçlarda Kullanılan Sensör Çeşitleri

Akıllı araçlardaki sensörler, çeşitli sürüş aktivitelerinin yönetimine ait geniş bir yelpazeyi izlemeyi mümkün kılar. Elektronik algılama sistemleri ve veri işleme kapasitesi, sürücünün iş yükünü azaltır ve yenilikçi hizmetler sunar. Düzenli araçlarda geniş bir sensör yelpazesi kullanılır, bunların çoğu iç mekanizmalar hakkında bilgi toplamak içindir. Günümüzde otonom araçlar çevreleri analiz etmek için kritik olan dış sensörleri içermektedir. Bu sensörler, otomotiv ekipmanları fonksiyonel güvenliği için bir standart olan ISO 26262-1'e uygun olmalıdır. Bu nedenle, araç algılama artık sadece mekanik olmayıp, iç ve dış değişkenlerin analizine yapılmasını sağlar. Bu nedenle, sensörlerin temel bir sınıflandırması, algılanan değişkenlere göre, proprioseptif veya eksteroseptif olarak yapılır [3].

### 1.1. Proprioseptif Sensörler

Aracın dahili sistemleri tarafından üretilen sinyallerdeki değişiklikleri (motor hızı, akü seviyesi vb.) ölçer. Bu ölçümler, akıllı araçlara yönelik diğer ilgi konularının yanı sıra motor devri, sıvı seviyeleri, hızlanma gibi farklı spesifik ölçümlerin tahmin edilmesine olanak tanır. Tipik olarak proprioseptif sensörler aracın bir parçasıdır ancak araçta dolaylı olarak ölçümler gerçekleştirmek için üçüncü taraf cihazlarda da bulunabilirler [3].

### 1.2. Dış Algılayıcı Sensörler

Araçların kendilerini çevreleyen ortamdan gelen uyarılarla temas halinde olmasını sağlar. Bunun sonucunda mesafe, ışık şiddeti, ses genliği, yaya tespiti, çevredeki araçlar gibi ölçümler elde edilir. Bu nedenle, dış algılayıcı sensörlerden alınan ölçümler, araçlar tarafından anlamlı çevresel özellikler üretecek şekilde yorumlanır.

Proprioseptif ve dışsal algılama, çeşitli fiziksel değişkenleri, çevredeki değişiklikleri, ortamdaki değişiklikleri veya tepkileri tespit etmek amacıyla çevreyle etkileşimi almak ve ölçmek için ölçüm yöntemlerini kullanır. Pasif yöntemde sensörler ortamla etkileşime girmeden ölçüm yapabilir;

yani sensör çevreden enerji uyarınları toplar. Aktif yöntemde ise sensörler veri elde etmek için ortamla etkileşime girer; yani sensörün dışına dalgalar yayabilir ve ortamın bu dalgalara tepki düzeyini ölçebilir. Dalga yayıcılar sese, elektromanyetizmaya veya ışığa dayalı olabilir. Proprioseptif ve dış algılayıcı sensörler, OTS (Off-The-Shelf) cihazlarına yerleştirilebilir ya da araca sabitlenebilir ve sürücü destek sistemleriyle birlikte çalışabilir [3].

### 1.3. OTS Cihazları

OTS cihazları proprioseptif ve eksteroseptif sensörleri aynı anda kullanabilir. Örneğin akıllı telefonlar kendilerini özellikle sigorta telematiği için uygun kılan çok sayıda sensör (GNSS, kamera, mikrofon, ivmeölçer vb.) içerir. Bu arada, diğer sensörler özel donanım ve kurulum süreci gerektirir.

#### 1.3.1. OBD-II Dongle'lar ve CAN Bus Okuyucular

Modern bir araç, genellikle mekanik, motor çalışması ve araç sistemleriyle ilgili yüzden fazla sensör içerebilir. Otomotiv sistemleri temel olarak üç alana yoğunlaşmıştır: güç aktarma organları, şasi ve gövde. Her biri, her sistemin ECU (Electronic Control Unit)'su tarafından yönetilen ve bir arama tablosunda yorumlanan, fiziksel miktarları ölçmek için bir dizi sensör içerir. Veriler, araç aktüatörlerini ve hız kontrolü, araç stabilitesi gibi performanslarını kontrol etmek için kullanılan profillerde saklanır. Belirli sensörlerin kullanımı aynı zamanda mevzuat ve güvenlik gibi diğer faktörlerle de ilişkilendirilebilir.

ECU'lardan gelen veri profilleri, OBD-II (On-Board Diagnostics) arayüzü aracılığıyla kontrol etmek için kullanılır. CAN (Controller Area Network) veri yolu üzerinden ECU'lar tarafından kontrol edilen araç alt sistemlerine erişim sağlar. Ayrıca OBD-II, otomotiv üreticileri tarafından teşhis ve veri analizi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, OBD-II yoluyla veri edinimi tek bir bağlantı noktasıyla sınırlıdır ve veriler, özel mesaj kodlarını tanımlayan her üreticiye özeldir. Bu arada, ticari OBD-II donanım kitleleri ve CAN veri yolu okuyucuları aracın güç kaynağına bağlanır ve içerilerinde GNSS (Global Navigation Satellite Systems) veya ivmeölçer gibi ekstra sensörler bulunabilir [4].

#### 1.3.2. Kara Kutu ve Rüzgarlık Cihazları

Genellikle, kara kutu ve rüzgarlık cihazları araç içine monte edilir. Bunlar, kendi kendine yeten sensör sistemleri ile donatılmıştır veya CAN

veri yolu aracılığıyla bilgi alabilirler. Bu cihazlar, sert hızlanma, frenleme veya çarpışma hakkında sürüş profillerini tanımlamak için bir GNSS ve bir ivmeölçer sensörü gömülüdür. Ayrıca, bir rüzgarlık cihazı, uzaktan yardımla sesli iletişim kurmak için bir SIM kart ve bir mikrofon içerebilir [3].

### 1.3.3. Araç Kameraları

Araç kamerası, genellikle ön panelin üzerine monte edilen ve aracın ön görünümünü kaydeden yerleşik bir kameradır. Yaygın kullanımlar arasında video gözetim hizmetleri sunmanın yanı sıra çarpışmaları ve yol tehlikelerini kaydetme imkanı sağlar. Kamera içerisindeki görüntü kareleri tarafından toplanan veri hacmi önemli olduğundan, toplanan görüntüler işleme sistemi tarafından önceden seçilir. Ek araç içi kamera işlevleri arasında jest ve ses biyometrisi bulunur. Bununla birlikte, bazı ülkelerde gizlilik endişeleri nedeniyle araç içi kameraların kullanımı sınırlıdır [5].

### 1.3.4. Akıllı Telefonlar

Akıllı telefonlar, iletişim ve algılama yeteneklerinin yanı sıra veri ve grafik işleme yeteneğine sahiptir. Akıllı telefonlar kendilerini gelişmiş bilgisayarlar haline getiren çeşitli teknolojilere sahiptir. Akıllı telefonlar, sürekli veri toplamayı sağlayan çok sayıda yerleşik sensöre sahiptir. Mobiliteye ek olarak, karmaşıklık, ayrıntı düzeyi ve yanıt süresi açısından özel gereksinimlere sahip çeşitli uygulamaların güçlendirilmesine olanak sağlar. Ayrıca akıllı telefonlar, Wi-Fi veya Bluetooth bağlantısı aracılığıyla OBD-II donanım kiti aracılığıyla CAN veri yolundan veri alabilir [6].

### 1.3.5. Giyilebilir Cihazlar

Akıllı telefonları tamamlayan giyilebilir cihazlar, insanın fizyolojik ve biyometrik sinyallerini izlemektedir. Akıllı araçlarda da güvenlik ve sürüş davranışı uygulamaları için kullanılmaktadır. Giyilebilir cihazlar arasında akıllı saatler, akıllı gözlükler, akıllı kasklar ve elektrokardiyogram (EKG) sensörleri bulunmaktadır [7].

OTS cihazlarındaki yerleşik sensörlerin dezavantajı, bunların araç uygulamaları için tasarlanmamış olması ve özelliklerinden dolayı hataları azaltacak algoritmalar gerektirmesidir. Bu nedenle araçlarda sabit sensörlerin kullanılması gerekmektedir. Harici ve araç içi izleme görevlerinde kullanılan dış algılayıcı sensörler bir sonraki bölümde anlatılmaktadır [6].

## 1.4. Araç Uygulamalarında Exteroseptif Sensörler

SAE J3016 sınıflandırma standardında açıklandığı gibi belirli bir özerklik seviyesine sahip araçlarla ilgili olarak, çalışma sırasında araçları denetlemek, araç çevresi hakkında doğru bilgi almak için izleme sistemlerinde dış algısal algılama kullanılabilir. Dış algılayıcı sensörlerin temel özellikleri arasında, araç kabininde ve farklı aşırı koşullardaki (yağmur, sis, kar, gece vb.) dış ortamlarda çalışabilmesi yer almaktadır. Ayrıca, aracın çevresine ilişkin bilgiler, trafik çatışmalarına hangi hususların dahil olduğunu daha iyi anlamaya yardımcı olabileceği gibi, sürücü/yolcu güvenliğiyle ilgili diğer parametreleri de iyileştirmeye destek verebilir [3].

### 1.4.1. Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS)

Bazı OTS cihazları, gömülü bir GNSS alıcısı kullanarak LBS (Location Based Services) uygular. GNSS sistemleri, özel coğrafi sabit yapay uydulardan gelen trilaterasyon sinyalleri aracılığıyla, yeryüzünde oldukça doğru bir lokalizasyona olanak sağlar. GNSS sistemleri, PNT (Positioning, Navigation and Scheduling) hizmetleri sağlayan MEO (Middle Earth Orbiting) uydu takımı yıldızlarından oluşur. Takımı yıldızların boyutları GNSS sistemine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Küresel kapsama sahip GNSS sistemleri arasında GPS (Global Positioning Services), GLONASS (Global Navigation Satellite System), Bei-Dou ve Galileo bulunmaktadır.

GNSS sistemleri 1.1GHz ile 1.6GHz arasındaki frekans bantlarında çalışır ve iletim kanallarına göre değişiklik gösterir. Aslında farklı takımı yıldızlar aynı kanalda bir arada bulunabilir. OEM cihazlarının çalıştığı platforma bağlı olarak farklı LBS sunulmaktadır. Akıllı telefonlarda bazı konum servisleri, GNSS verilerine ek olarak Wi-Fi, Bluetooth ve hücresel ağlar gibi kısa ve uzun menzilli kablosuz ağları birleştirir. Günümüzde android ve iOS (iPhone Operating System) tabanlı cihazlar, NMEA (National Marine Electronics Association) 0183 standardını temel alan mesajları kullanmaktadır. Bu standarda yapılan en son güncellemeler arasında sözde menzil ve Doppler kaymasının ölçümü; ham GNSS ölçümlerinin işlenmesine basitlik ve sağlamlık katar. Bununla birlikte, GNSS alımı, çok yönlü etkiler ve NLoS (Non-Line of Sight) koşulları nedeniyle kentsel kanyonlarda girişim, sinyal yayılımı ve ölçüm doğruluğu nedeniyle kesintilere uğrayabilir [8].

### 1.4.2. Manyetometre

Manyetometrenin işlevi, yönünü belirlemek için dünyanın manyetik alan gücünü okumaktır. MEMS (Micro-Electro Mechanic Systems) tabanlı manyetometreler, akıllı telefonlar gibi ticari cihazlara yerleştirilmiştir ve manyetik alanı  $\mu\text{T}$  duyarlılığıyla 3 ekseninde (x, y, z) bildirir. Üstelik minyatürleştirilmiş form faktörü ve düşük enerji tüketimi, birden fazla cihazda kullanılabilirliğini kolaylaştırır. Böylece navigasyon ve LBS hizmetlerinin sağlanmasında değerli bir bileşen olarak ortaya çıkar.

### 1.4.3. Mikrofon

Mikrofon ses dalgalarını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu sensörler, MEMS cihazları veya OTS cihazlarına bağlanan yoğunlaştırılmış mikrofonlar olarak yerleştirilmiştir. Mikrofonlar, gerçek zamanlı sinyal işleme için uygun maliyetli bir çözümdür.

ISO 9613-2 standardına göre, kentsel senaryoda yüksek yoğunluklu sesler için algılama menzilleri 200 m'ye kadar ulaşmaktadır. Üstelik mikrofonlar düşük enerji tüketir, daha küçük boyutlara ve çok yönlü algılama özelliğine sahiptir. Bir dizi mikrofonu sahip cihazlar, DoA (Direction of Arrival) tahmin etmek ve her mikrofon çifti arasındaki varış zaman farkını hesaplayarak ses kaynağının yerini belirlemek için kullanılır. Öte yandan verimlilikleri büyük ölçüde hassasiyetlerine, ses dalgalarının genliğine ve çevresel gürültüye bağlıdır.

### 1.4.4. Biyometrik Sensörler

Biyometrik sensörler, bireylerin benzersiz fizyolojik veya davranışsal özelliklerini ölçmek ve yakalamak için kullanılan cihazlardır. Fizyolojik biyometrik veri, parmak izleri, yüz özellikleri, iris desenleri, el geometrisi, damar desenleri, vücut kokusu ve retinal taramalar gibi özellikleri içerir. Davranışsal biyometrik veri ise bireyin yürüyüşü, imzası, el yazısı ve ses gibi davranışlarına dayanır.

Biyometrik sensörler, farklı teknolojiler kullanarak bu verileri elde eder. Örneğin, parmak izi tarayıcıları, yüz tanıma kameraları, iris tarayıcıları, el geometrisi sensörleri gibi cihazlar fizyolojik veri toplamak için kullanılırken, yürüyüş tanıma için kameralar, imza ve el yazısı yakalamak için cihazlar, ses tanıma için mikrofonlar gibi cihazlar ise davranışsal veri toplamak için kullanılır.

Elde edilen veriler, desen madenciliği teknikleri kullanılarak işlenir ve analiz edilir. Bu sayede bireyin benzersiz biyometrik özelliklerinin dijital bir temsili oluşturulur. Bu dijital temsil, kimlik doğrulama ve erişim kontrolü gibi uygulamalarda kullanılır [9].

## 2. RADAR

RADAR dedektörleri yansıyan EM (Elektromanyetik) dalgaları kullanır. Cihaz, aracın dışındaki nesnelere yansıyan radyo dalgası darbeleri yayar. Bir süre sonra sensöre ulaşan yansıyan darbeler, farklı bilgilerin çıkarılmasına olanak sağlar. Radar verileri bir nokta bulutunda toplanır ve çevredeki nesnelere hakkında yön, mesafe gibi soyut bilgiler sağlar ve nesne boyutunu tahmin eder. Hareketli hedeflerin bağlı hızı, Doppler kaymasının neden olduğu frekans değişiklikleri yoluyla hesaplanabilir. RADAR, EM dalgalarını modüle etmek için çeşitli teknikler uygular.

CW (Continuous Wave), nesne tespiti için periyodik darbe iletimlerini kullanır. Ancak darbe CW'si dalga enerjisine ve ortam gürültüsüne bağlıdır. Ayrıca iletilen dalgalarda zamanlama işaretleri bulunmadığı için hedefe olan mesafeyi tahmin etmek güvenilir değildir. Gürültüden kaynaklanan algılama sorunlarını iyileştirmek için frekans modülasyonlu sürekli dalga (FMCW) ile sürekli bir sinyal yayarak çalışma frekansının ölçüm sırasında değiştirilmesine olanak tanır. Böylece zaman senkronizasyonuna güvenmek yerine gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki frekans farkları ölçülür. FMCW, hedefin menziline ve hızını tahmin etmek için hem menzili hem de Doppler bilgisini dikkate alır.

Otomotiv radarları aynı zamanda MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) gibi anten çeşitliliği tekniklerini de kullanır. MIMO radarlarında, her verici anten diğer antenlerden bağımsız olarak isteğe bağlı bir dalga biçimi yayabilir ve herhangi bir alıcı anten bu sinyali alabilir. Böylece, MRx (Multiple Receive) ve MTx (Multiple Transmit) elemanlarına sahip bir radar,  $MRx \times MTx$  sanal anten dizisini üretir. Böylece FoVi (Field of View)'ler, hedef tespit yeteneklerine ek olarak açısız çözünürlüklerin (daha yüksek azimut ve sensör yüksekliği) gelişmesine olanak sağlar.

DCM (Digital Code Modulation) radarlar, her vericinin benzersiz kodlarla tanımlanmasına olanak tanır. Dijital radarlar, açısız çözünürlüğü iyileştirmenin yanı sıra kodlama yoluyla paraziti en aza indirmeyi, bulunan hedeflerin tanımlanmasını iyileştirmeyi, HCR (High Contrast Resolution) yoluyla yakınlıkları tespit etmeyi amaçlamaktadır.

Radar sensörleri hem aracın ön tarafında hem de köşelerde kısa ve uzun menzilli algılama için kullanılır. SRR (Short Range Radar) sistemleri, tekli veya çoklu hedeflere yönelik karmaşık pasif ve aktif güvenlikle uğraşmayı gerektiren, araca yakın ortamları izlemek için kullanılır. SRR, 24 GHz mm-dalga frekans bandında çalışır. Bu arada, LRR (Long Range Radar), öndeki araçlara olan mesafeyi izlemek ve ego-aracın hızını kontrol etmek için ACC (Adaptive Cruise Control) sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

LRR, 70, 77 ve 79 GHz mm-dalga frekans bandında çalışır. SSR'lerden farklı olarak, LRR'deki FoV daha uzun mesafelere ulaşır fakat azimut ve yükseklik açıları daha dardır. Radarlar olumsuz iklim koşullarında (sis veya yağmur) ve aydınlatmanın az olduğu veya hiç olmadığı durumlarda dayanıklıdır. Bununla birlikte, diğer sensör okumalarıyla birleştirilmezse, sınıflandırma sorunları için sinyal işleme daha zordur.

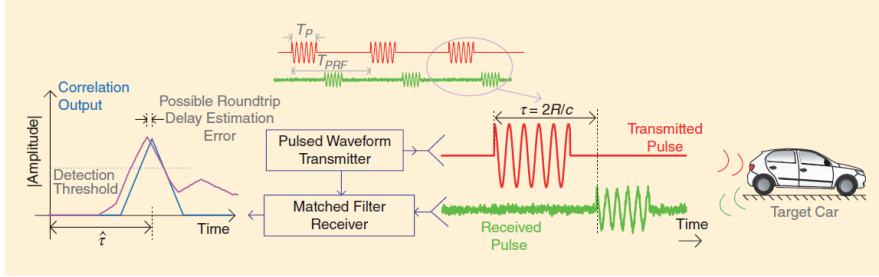
## 2.1. Temel Radar Operasyonları

Bir radar, 3 MHz'den 300 GHz'e kadar değişen frekans bantlarındaki EM dalgalarını eş zamanlı olarak iletebilir ve alabilir. Bu hedeflerden yansıyan EM dalgalarını kullanarak hedefler hakkında bilgi (konum, menzil, hız ve RCS (Radar Cross Section) çıkarmak için tasarlanmıştır. Otomotiv radar sistemleri tipik olarak, daha yüksek hız ve menzil çözünürlüğü elde edilebilmek için mm-dalga frekansları olarak bilinen EM spektrumunun 24 GHz ve 77 GHz kısımlarındaki bantlarda çalışır. Temel radar operasyonu üç ana görevi içerir: menzil (mesafe), bağlı hız ve yön tahmini.

### 2.1.1. Menzil Tahmini

Menzil tahmini otomotiv radarları için en temel uygulamadır. Kaynağın ( $R$ ) bir hedefe olan aralığı, EM dalgalarının o hedefe doğru ve hedeften yayılması için gereken gidiş-dönüş zaman gecikmesine göre belirlenir: ( $R = c\tau/2$ ), burada  $\tau$ , saniye cinsinden gidiş-dönüş zaman gecikmesi ve  $c$ , ışığın saniyede metre cinsinden hızıdır ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ). Böylece  $\tau$ 'in tahmini aralık ölçümünü mümkün kılar. Radarın ilettiği EM dalgaların (sinyallerin) şekli, gidiş-dönüş zaman gecikmesi tahmini için önemlidir. Örneğin, darbe modülasyonlu sürekli dalgalar (CW), periyodik ve kısa güç darbelerinden ve sessiz periyotlardan oluşur. Sessiz periyotlar, radarın yansıyan sinyalleri almasına izin verir ve Şekil 1'de

gösterildiği gibi radarın menzil tahminini gerçekleştirmesi için zamanlama işaretleri olarak kullanılır.



**Şekil 1.** İlişki bazlı alıcıya sahip darbeli bir CW radarı, hedef arabanın R menzilinı ölçebilir [2].

Modüle edilmemiş CW sinyalleri ( $\cos(2\pi f_c t)$ ) zaman işaretlerine sahip olmaması sebebiyle menzil tahmini için kullanılamaz. Ek olarak hedeften yansıyan sinyalin bir sonraki darbe başlamadan önce gelmesi gerekir. Bu nedenle, bir radarın maksimum tespit edilebilir menzili TPRF (Pulse Repetition Frequency)'ye bağlıdır. Radardan iletilen sinyal, geri alınana kadar yol kaybı ve hedeften hatalı yansıma nedeniyle zayıflamaya uğrar. Ek olarak, alınan hedef sinyalleri, radar elektroniklerindeki dahili gürültüye ve ilgi konusu olmayan nesnelere yansıyan sinyallerin bir sonucu olabilecek ve insan yapımı kaynaklardan gelebilen girişime maruz kalır. Tipik gidiş-dönüş zaman gecikmesi tahmini problemi, sadece toplam beyaz Gauss ortam gürültüsünü hesaba katar.

Demodülasyon sürecinde taşıyıcı sinyalin kaldırıldığı varsayılarak temel banttaki  $x(t)$  hedef sinyalinin şu şekilde modellenebilir:

$$x(t) = \alpha s(t - \tau) + \omega(t) . \quad (1)$$

Burada  $\alpha$ , anten kazancına, yol kaybına ve hedefin RCS'ine bağlı zayıflamayı temsil eden karmaşık bir skalerdir ve  $\omega(t)$  ise sıfır ortalamalı ve varyansı  $\sigma^2$  olan toplamsal beyaz Gauss gürültüsüdür. Amaç, iletilen radar dalga formu  $s(t)$ 'nin tam bilgisiyle  $\tau$ 'i tahmin etmektir.

$s(t)$  birim genliğe ve sonlu enerji  $E_s$ 'ye sahip olduğunu varsayılırsa, ideal radar alıcısı, SNR (Signal-to-Noise Ratio) değerini  $\left( SNR = \left( \frac{a^2 E_s}{\sigma^2} \right) = \left( \frac{a^2 T_p}{\sigma^2} \right) \right)$  maksimize eden eşleşmiş bir filtre kullanılarak bulunabilir. Bu filtre, sinyal tepki verme özelliğine sahip  $h(t) =$

$s^*(-t)$ 'dir. Bu sayede eşleşmiş filtre tabanlı alıcı, iletilen sinyal ile hedeften yansıyan darbeler arasındaki korelasyonu bulur:

$$t(\tau) = \int x(t)s^*(t - \tau)dt. \quad (2)$$

Zaman gecikmesinin en olası tahmini, eşleşen filtre çıkışının büyüklüğünün zirveye ulaştığı zamandır:

$$\hat{t} = \arg \max_{\tau} |y(\tau)| \quad (3)$$

Gürültünün varlığı, zirvenin konumunu bozabilir ve bu da tahmin hatasına neden olabilir. Ayrıca, radarın alınan bir sinyalin aslında bir hedeften gelen bir yansıma sinyali içerip içermediğine karar vermesi gerekmektedir. RADAR literatürünün önemli bir kısmı, en uygun tespit performansını sağlayan stratejiler geliştirmek için kullanılmaktadır.

Tipik bir karar stratejisi, istatistiksel hipotez testlerine (bir hedefin mevcut olup olmadığına) dayalı olarak formüle edilebilir. Bu, eşleşen filtre çıkışında basit bir eşik testine yol açar. Bir diğer önemli performans ölçüsü olan menzil çözünürlüğü, yakın aralıklı hedefleri ayırt etme yeteneğini ifade eder.

Radar kapsama alanında iki hedef ancak zaman alanında örtüşmeyen getiriler üretiyorsa ayrılabilir. Dolayısıyla menzil çözünürlüğü darbe genişliği  $T_p$  ile orantılıdır. Başka bir deyişle, daha ince darbeler daha yüksek çözünürlük sağlar. Bununla birlikte, daha kısa darbeler daha az enerji içerir, bu da alıcı SNR ve algılama performansının zayıf olduğu anlamına gelir. Bu problem, faz veya frekans modüle edilmiş darbeleri kullanan darbe sıkıştırma adı verilen yöntemle aşılır.

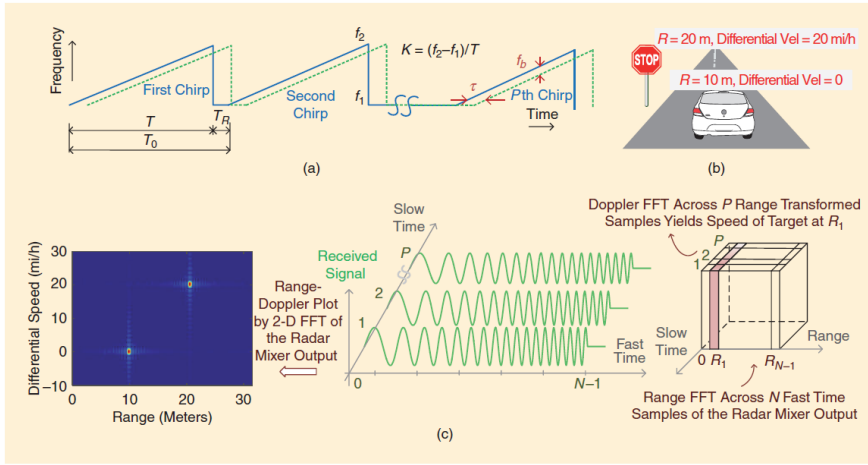
### 2.1.2. Hız Tahmini

Hedef hızın tahmini, Doppler etkisinde faydalanılarak yapılmaktadır. Şekil 2'de gösterilen aracın farklı bir hızla ilerlediği varsayıldığında, iki araç arasında görel hareketin varlığıyla, yansıyan dalgalar  $\tau$  ile gecikir ( $\tau = 2(R \pm vt)$ ). Zaman bağımlı gecikme terimi, Doppler kaymasına neden olur ve alınan dalga üzerinde frekans kaymasına yol açar. Doppler kayması  $f_d = \left(\mp \frac{2v}{\lambda}\right)$  olarak bilinir. Doppler kayması dalga boyu  $\lambda$  ile ters orantılıdır ve işareti, hedefin radarın yaklaştığına veya uzaklaştığına bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Bu frekans kayması sürekli dalga radarı kullanılarak tespit edilebilir, ancak hedefin menziline ölçme yeteneğine sahip değildir. Burada, çoklu hedef trafik senaryolarında aynı anda menzil-

hız tahmini sağlayan frekans modüleli (FM) CW darbeleri kullanan bir darbe radarı konfigürasyonu açıklanmaktadır.

FMCW radarı periyodik geniş bantlı FM darbeleri gönderir, darbe sırasında açılmal frekans lineer olarak artmaktadır. Taşıyıcı frekans  $f_c$  ve modülasyon sabiti  $K$  için, tek bir FMCW darbesi şu şekilde yazılabilir (Şekil 2(a)'da fark frekansı açıklanmıştır).

$$s(t) = e^{j2\pi(f_c + 0.5Kt)t} \quad 0 \leq t \leq T \quad (4)$$



**Şekil 2. (a)** Bir FMCW dalga formunun spektrogramı, modülasyon sabiti  $K = (B/T)$ , sıfırlama süresi  $T_R$  ve darbe periyodu  $T_0$ ;  $P$  ardışık chirp gönderimi ile. gidiş-dönüş gecikmesi  $\tau$ , fark frekansı  $f_b$ 'ye dönüştürülür, **(b)** Tipik trafik senaryosu: sabit trafik işareti, radar ve yolcu aracı  $20$  mil/s hızla hareket eder, **(c)**  $77$ GHz FMCW radar ile 2-D menzil-Doppler tahmini  $\{[N,P] = [64,64]$ ,  $SNR = 10$  dB,  $BW = 300$  MHz,  $T = 300$  ns  $\}$  [2].

Hedeften yansıyan sinyal, iletilen sinyalle eşlenik olarak karıştırılır ve hedefin menziline veren düşük frekanslı bir vuruş sinyali üretilir. Bu işlem  $P$  ardışık vuruş için tekrarlanır. Şekil 2(c)'deki iki boyutlu (2-D) dalga formları, ardışık yansıyan vuruşları iki zaman indisine yayılmış şekilde gösterir. Yavaş zaman indisi  $p$  basitçe vuruş numarasına karşılık gelir. Öte yandan, hızlı zaman indisi  $n$ , her vuruş için, karşılık gelen sürekli vuruş sinyalinin frekansı  $f_s$  ile örneklendiği ve zaman süresi  $T$  içinde  $N$  örneğin toplandığı varsayılır. Tek bir hedef varsayımıyla ve yansıyan sinyal

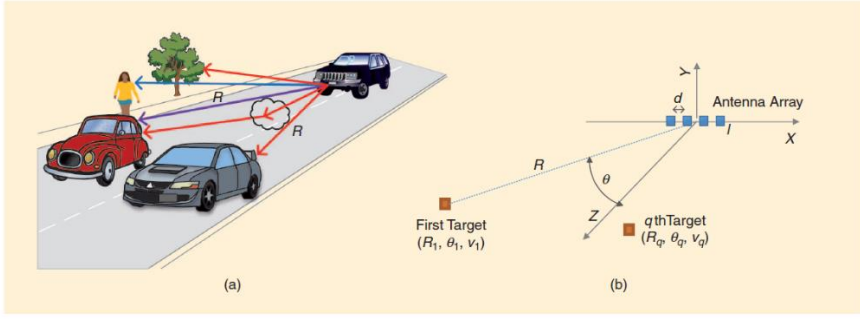
bozulmalarını ihmal ederek, FMCW radar alıcısı çıkışı, bu iki zaman indisinin bir fonksiyonu olarak verilir.

$$d(n, p) = \exp \left\{ j2\pi \left[ \left( \frac{2KR}{c} + f_d \right) \left( \frac{n}{f_s} \right) + f_d p T_0 + \frac{2f_c R}{c} \right] \right\} + \omega(n, p) \quad (5)$$

Bu nedenle, Şekil 2(c)'de gösterildiği gibi, hızlı  $n$  süresi boyunca ayrık Fourier dönüşümü, Doppler frekansı  $f_d$  ile birleştirilmiş vuruş frekansı  $f_b = (2KR/c)$  elde etmek için uygulanabilir. Bu işlem aynı zamanda menzil dönüşümü veya menzil geçitlemesi olarak da bilinir; bu, yavaş zaman boyunca ikinci Fourier dönüşümünün uygulanmasıyla benzersiz menzil kapısına karşılık gelen Doppler kaymasının tahmin edilmesine olanak tanır. Bir aralık-Doppler haritası, 2 boyutlu FFT (Fast Fourier Transform) (5) kullanılarak verimli bir şekilde bulunabilir. Yukarıda belirtilen tartışmaya dayanan açıklayıcı bir örnek Şekil 2'de gösterilmektedir.

### 2.1.3. Yön Tahmini

FMCW gibi geniş bantlı darbelerin kullanımı, hedeflerin hem mesafesinde hem de hızında ayırım yapılmasını sağlar. Yöndeki ayırım bir anten dizisi aracılığıyla yapılabilir. Şekil 3(a), radarı çevreleyen birkaç hedefin doğrudan ve çoklu yol yansımalarını topladığı gerçekçi bir trafik senaryosunu göstermektedir. Bu tür durumlarda, eşit uzaklıktaki hedefleri uzaysal olarak çözmek ve trafik sahnesinin kapsamlı bir temsilini sunmak için hedeflerin açısız konumu tahmin edilmelidir. Bu nedenle, otomotiv radarlarında, bir hedefin konumu genellikle bir küresel koordinat sistemi  $(R, \theta, \varphi)$  terimleriyle tanımlanır, burada  $(\theta, \varphi)$  sırasıyla azimut ve yükseklik açıları gösterir. Ancak bu durumda, menzil-hız tahmini problemlerinde kullanılan tek antenli radar kurulumu yeterli olmayabilir, çünkü ölçülen zaman gecikmesi  $\tau = (2(R \pm vt)/c)$ , hedeflerin açısız konumları açısından bilgi eksikliği taşır.



**Şekil 3. (a)** Aynı  $R$  mesafesindeki iki araba dahil olmak üzere farklı hedeflerden gelen yansımaları içeren tipik bir trafik senaryosu, **(b)** Düzgün doğrusal anten dizisini kullanan azimut açısı tahmin kurulumu [2].

Radara yön tahminini etkinleştirmek için yansıyan dalga verilerinin birden fazla farklı boyutta toplanması gerekir. Örneğin, bir hedefi iki boyutlu olarak ele almak için nesneden yansıyan dalga verilerinin iki farklı boyutta toplanması gerekir. Bu farklı boyutlar, zaman, frekans ve uzayın kombinasyonları kullanılarak birçok farklı şekilde oluşturulabilir. Örneğin, lineer bir anten dizisi ve FMCW gibi geniş bantlı dalga formları iki farklı boyut oluşturur. Ayrıca, mm-dalga bantlarında daha küçük dalga boyları, daha küçük açıklıklı boyutlara karşılık gelir ve bu sayede bir anten dizisine çok sayıda anten elemanı sıkı bir şekilde yerleştirilebilir. Bu durum, etkili radyasyon demetini güçlendirir ve keskinleştirir, bu da açısal ölçümlerin çözünürlüğünü artırır.

Düzlemde  $z = 0$  konumlanmış bir anten dizisi var ve her alıcı anten konumuna karşılık gelen apsis  $l$  olsun [Şekil 3(b)].  $(R_q, \theta_q)$ , küresel koordinatlarda  $q$ . hedefin konumu olsun ve bu hedefler radara göre  $v_q$  hızıyla hareket etsin. Uzak alan yaklaşımı yardımıyla,  $q$ . hedef için, orijinde konumlanmış verici ve koordinat  $l$ 'ye yerleştirilmiş bir alıcı arasındaki gidiş-dönüş zaman gecikmesi şu şekilde verilir:

$$\tau_{lq} = \frac{2(R_q + v_q t) + l \sin \theta_q}{c} \quad (6)$$

Burada  $d$  doğrusal anten elemanları arasındaki mesafedir (yarım dalga boyu). (5) ve (6)'nın birleştirilmesi, mesafe, hız ve açının tahmin edilmesini sağlayan üç boyutlu FMCW radar çıkış sinyalini verir.  $Q$  hedef sayısı için, sinyal şu şekilde temsil edilebilir:

$$d(l, n, p) = \sum_{q=0}^{Q-1} \alpha_q \exp \left\{ j2\pi \left[ \left( \frac{2KR_q}{c} + f_{dq} \right) \left( \frac{n}{f_s} \right) + \frac{f_c l d \sin \theta_q}{c} + f_{dq} p T_0 + \frac{2f_c R_q}{c} \right] \right\} + \omega(l, n, p) \quad (7)$$

Burada  $\alpha$  ve  $\omega$ , menzil tahmini probleminde açıklandığı gibi aynı miktarlara karşılık gelir. Gecikme terimi  $\tau_{lq}$ , anten elemanları arasında düzgün faz ilerlemesi oluşturur, bu da denklem (7)'de gösterildiği gibi FFT ile uzaysal alanda açı tahminine izin verir. Bu nedenle, 2-D konum (menzil ve açı) ve hedeflerin hızı, 3-D FFT ile ortak olarak tahmin edilebilir [2].

### 3. LiDAR

LiDAR, radyo dalgaları yerine lazer yansımaları kullanır. LiDAR sensörü, cisimleri tespit etmek için ışık darbeleri gönderir. Genellikle, 850 nm ile 940 nm arasındaki dalga boylarında çalışan LiDAR'lar, darbeleri ve AMCW (Amplitude-Modulated Continuous Wave) tekniklerine dayalı uçuş süresi (Time of Flight, ToF) kullanırlar.

Darbeleri sinyal ile ölçülen ToF, cisimlerden seken fotonların gönderilme ve alınma süresi arasındaki tur süresine dayalı olarak hedef mesafesini hesaplar. ToF ölçümünden farklı olarak, AMCW, gönderilen ışık demetinde bir yoğunluk deseni kodlar ve doğrusal bir radyo frekansı chirp oluşturur; hedef mesafe, seken sinyalin genliği ve gönderilen chirp'in faz kayması temel alınarak hesaplanır. Hem darbeleri sinyal ile ölçülen ToF hem de AMCW, gün ışığı girişimi ve görünür ışık spektrumuna yakınlıkları nedeniyle sınırlıdır.

Öte yandan, 1550nm dalga boyunda yayılan LiDAR'lar FMCW kullanır. AMCW tabanlı LiDAR'lardan farklı olarak, FMCW LiDAR'lar gönderilen lazer ışığını bir LO (Local Oscillator) içinde bir referans sinyale ve dışarıya doğru faz modüle edilmiş ve chirp edilmiş olarak böler. Hedeften yansıyan ışık, gönderilen ışıkla karıştırılır ve LO'daki referans sinyali ile karşılaştırılır. Gönderilen ve yansıyan ışık arasındaki frekans farkı, hedefin hareket halindeyken mesafe hesaplamasını, hızını ve mesafesini mümkün kılar. FMCW LiDAR'lar, nesne tespitinde daha yüksek menzil ve çözünürlüğe, parlak ortamlarda işletme menziline ve karanlık senaryolarda daha derinliğe ulaşır.

LiDAR, dairesel ve dikey bir şekilde tarar; yansıyan darbelerin yönü ve mesafesi nokta vektörü olarak kaydedilir, her veri noktası yansıtma değerini ve yerel koordinat sistemi ile ilgili 3D koordinatı içerir. Dahası,

bir dizi vektör daha sonra yüksek doğrulukla 3D model işleme imkânı sağlayan mekânsal temsili olan bir nokta bulutunu oluşturur.

LiDAR'ın boyut fonksiyonu açısından üç türü bulunmaktadır. 1D LiDAR'lar belirli bir hedefe veya yöne olan mesafeyi ölçer. Diğer yandan, 2D ve 3D LiDAR sensörleri elektromekanik veya MEMS tipi tarama yöntemlerini kullanarak daha iyi performans göstermektedir. 2D LiDAR sensörleri, ışınını x ve y düzleminde döndürür ve algılama örnekleri arasında eşit zaman aralıklarıyla ardışık olarak gerçekleşir. Diğer yandan, 3D LiDAR sensörleri, algılanan nesnelerin boyutsallığını genişletmek için x, y ve z düzlemlerini kullanarak çalışır. Hem dikey (V FoV) hem de yatay (H FoV) için genişletilmiş görüş alanı ile, eksenler boyunca konum ve mesafe hakkında bilgi sağlar [10].

### 3.1. LiDAR Tipleri

Literatürde çeşitli LiDAR türleri bulunmaktadır. Otomatik sürüş ve ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) uygulamaları için kullanılan LiDAR türlerinden bazıları şunlardır:

- Elektromekanik LiDAR
- Katı hal LiDAR

Bu kategorilerin her birinde hem 2D hem de 3D LiDAR'lar bulunmaktadır. Aşağıda farklı LiDAR teknolojilerinin avantajları ve dezavantajları açıklanmaktadır.

#### 3.1.1. Elektromekanik LiDAR

Elektromekanik LiDAR'lar, bir lazer ve alıcı montajını fiziksel olarak döndürerek veya bir döner aynayı kullanarak geniş bir alanda 360 dereceye kadar veri toplar. Elektromekanik LiDAR'lar, odaklanmış optikler aracılığıyla dönüş sinyalini dedektör üzerinde yoğunlaştıran güçlü, paralelleştirilmiş lazerler kullanır.

Elektromekanik LiDAR'lar, 2D veya 3D nokta bulutu döndürmek için tasarlanabilir. 2D LiDAR'da, yalnızca tek bir dönen lazer ışını veya tek bir eksen boyunca düzenlenmiş lazer ışınlarının lineer dizisi olabilir. Ortaya çıkan nokta bulutu, 360 derece kapsama alanına sahip olabilir, ancak yalnızca tek bir düzlemde engeller hakkında bilgi sağlayabilir. 2D LiDAR'lar genellikle düşük çözünürlüklü bir segment tabanlı tespit haritası sağlar. Bu, AV'nin (Autonomous Vehicles) hemen yakınındaki engelleri tespit etmek için kullanışlı hale getirir. Düzlemsel yüzeylerde basit tespit

ve mesafe ölçüm görevlerini yerine getirmek için uygundur. Fakat herhangi bir otonom sistem için detaylı nesne tespiti ve tüm yönlü algılama için uygun değildir.

3D elektromekanik LiDAR'da, verici-alıcı dizisi ya dikey lineer bir şekilde ya da dönme eksenini etrafında düzlemsel bir dizi olarak düzenlenebilir. Velodyne markasına ait VLS-128 model numaralı gibi yüksek çözünürlüklü LiDAR sensörleri, büyük sayıda verici-alıcı çiftini barındırmak ve tarama çözünürlüğünü artırmak için karmaşık bir lazer verici-alıcı desenine sahiptir.

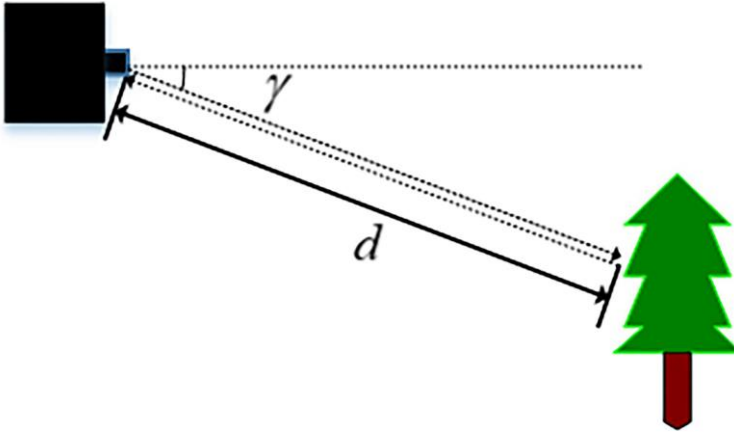
### 3.1.2. Katı Hal LiDAR

Katı hal LiDAR'lar, motorlu mekanik tarama olmadan tasarlanmıştır. Hareketli mekanik parçaları olmayıp, anlık sahne aydınlatması sağlayarak ve nesnelere üzerinde artımlı değişim algılama kullanarak çalışmaktadır.

2D katı hal LiDAR'ların yalnızca bir dizi doğrusal yayıcı-alıcı çifti olabilir. MEMS teknolojilerindeki ilerlemeler ve gelişmiş üretim teknikleri ile katı hal 3D LiDAR'lar da geliştirilmektedir. Bunlar genellikle sensörün önündeki 3D bir alanı tarayabilmek ve nokta bulutunu oluşturabilmek için lazer flaşları gönderen yayıcı-alıcıların 2 boyutlu bir dizisine dayanmaktadır. Genel olarak, 3D LiDAR'lar, bir ortamın detaylı analizi için daha uygun olup bu nedenle otomatik araçlarda nesne tespiti ve çarpışma önleme gibi görevlere uygundur. Detaylı algılama görevlerinde kullanıldıkları için, 3D LiDAR'lar genellikle daha uzun algılama menzillerini hedefleyen yüksek lazer yayıcı gücü ve dedektör amplifikasyonu kullanılarak tasarlanmıştır [10].

### 3.2. LiDAR'ın Menzil Mekanizması

Bilindiği üzere LiDAR, otomasyonun her kademesinde çevreyi algılamak için gerekli olan teknolojidir ve sabit olmayan nesnelere gerçek zamanlı olarak işleyebilir. LiDAR kendi ışık kaynağı gibi davrandığı için ışıktan etkilenmeden çevresini de algılayabilir. Kullanılan cihaz, dünyayı gerçek zamanlı olarak 360° 3D olarak görüntülemek için dönen LiDAR ile donatılmıştır. Bu kameraların görüş alanı insan gözünden bile daha etkili bir sistemdir. LiDAR sensörünün nasıl çalıştığını göstermek için tek bir lazer noktası vurgulanmaktadır. Şekil 4'te gösterildiği gibi, sensörden tek bir lazer noktası yayılır, bir engele çarpar ve sensöre geri döner. Yansıyan veriler kaydedilir. Algılama mesafesini hesaplamak için uçuş süresi kullanılır.



Şekil 4. Tek hatlı LiDAR aralığının prensibi [11].

Şekil 4'te gösterildiği gibi, lazer emisyonu ve geri kazanımı arasındaki gecikme  $\Delta t$  olarak ayarlanır, ardından havadaki sensör ile engel arasındaki mesafe:

$$d = \frac{1}{2} c \times \Delta t \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $c$  ışık hızını ifade etmektedir. Kesin emisyon açısı  $\gamma$  bilindiğinden, konumlandırmanın nokta koordinatı:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \times \cos\gamma \\ d \times \sin\gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\gamma$  LiDAR'ın emisyon açısıdır,  $d$  ise ölçüm mesafesidir. Hesaplama sonucu elde edilen tarama noktalarının koordinat değerleri kutupsal koordinatlar halinde kaydedilir.

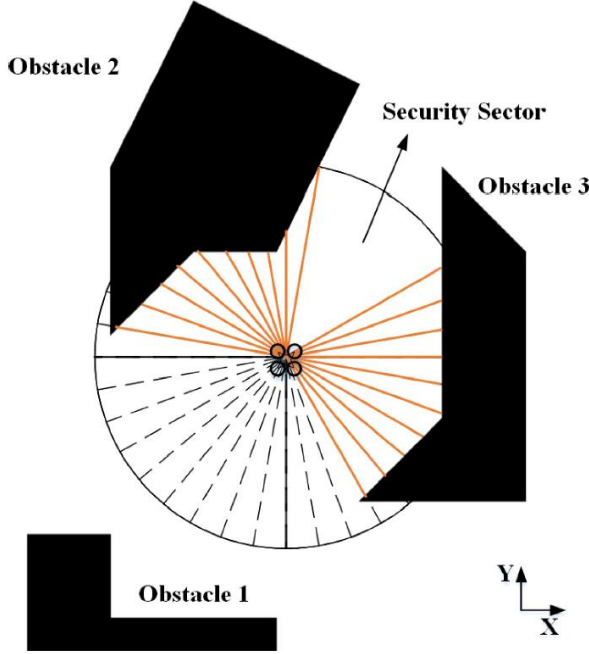
LiDAR yardımıyla uçuş yapan bir cihaz için olasılıksal bir yön tahmini mekanizması bölüm 3.3'te anlatılmaktadır. Burada cihaz için yön tahmin sürecinde vektör histogram algoritması kullanılmıştır.

### 3.3. VFH Algoritmasının Prensibi

Vektör histogram algoritması, havadaki sensör aracılığıyla bilinmeyen engeller ile kaynak arasındaki mesafe verilerini ölçer, verileri gerçek zamanlı olarak günceller ve kaynak için çarpışmasız bir yerel yol oluşturur. Yöntem esas olarak iki aşamada tamamlanır. İlk aşamada, havadaki sensör

tarafından toplanan engel verileri, kaynağın anlık konumu etrafında oluşturulan tek boyutlu bir kutupsal koordinat çubuk grafiğine dönüştürülür. İkinci aşamada algoritma, kutupsal çubuk grafiğinden engel yoğunluğunun düşük olduğu sektörü seçer ve daha sonra cihazın hareket yönünü bu güvenli sektörün yönüne göre hizalayarak hareket yönünü belirler.

Şekil 5'te, havadaki LiDAR'ın menzil diyagramı gösterilmektedir. LiDAR tarafından toplanan engel mesafesi bilgisi kutupsal koordinatlar biçiminde kaydedilir ve ardından VFH algoritması, verileri bir histogram ızgara grafiğine dönüştürür.



**Şekil 5.** Havadaki LiDAR menzil sensörü. Çok yönlü engel algılaması sağlayacak şekilde donatılmış 36 menzil sensörünün her biri 10 derecelik bir sensör görünümüne sahiptir. Siyah çokgenler engelleri temsil eder [11].

Cihazın hareket yönünü tanımlamak için tek boyutlu bir kutupsal koordinat histogramı kullanılmaktadır. Aktif hücre, DCP (Drone Center Point) olarak tanımlanmaktadır. Aktif hücre ve cihaz birlikte hareket eder ve her hareket eden adım yeni bir alanı kaplar. Histogram ızgarasındaki her aktif hücrenin  $(i, j)$  içeriği, yönü DCP tarafından belirlenen bir engel vektörü olarak ele alınacaktır. Daha sonra  $\beta_{i,j}$ 'nin formülasyonu:

$$\beta_{i,j} = \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (10)$$

şeklinde yazılır ve  $m_{i,j}$  büyüklüğü:

$$m_{i,j} = (c_{i,j}^*)^2 (a - b d_{i,j}) \quad (11)$$

olarak tanımlanır. Burada  $a$  ve  $b$  pozitif sabitlerdir,  $\beta_{i,j}$  aktif hücre  $(i,j)$ 'den DCP'ye olan yöndür,  $(x_0, y_0)$  DCP'nin mevcut koordinatlarıdır,  $(x_i, y_i)$  aktif hücrenin koordinatlarıdır  $(i,j)$ ,  $c_{i,j}^*$  aktif hücrenin  $(i,j)$  kesinlik değeridir, buradaki kare sensör tespitinin tek bir oluşumundan kaynaklanan gürültüyü azaltmayı ifade eder.  $D_{i,j}$  ise aktif hücre  $(i,j)$  ile DCP arasındaki mesafedir.  $k$ , engelin hareket eden birimine karşılık gelen sektördür ve her bir sektör  $k$ 'ya karşılık gelen ayrı açısı, havadaki sensörün açılal çözünürlüğünün  $\alpha$  katıdır:

$$k = INT \left( \frac{\beta_{i,j}}{\alpha} \right) \quad (12)$$

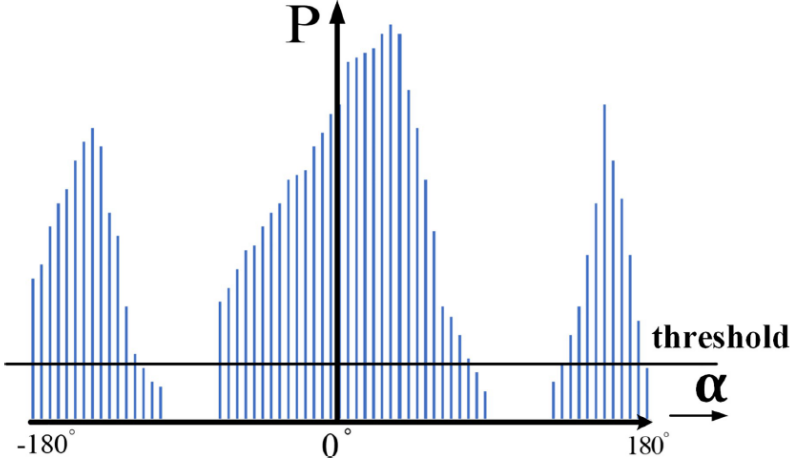
$h_k$  sektör yönünde bir engelle karşılaşma olasılığını temsil eden kutupsal engel yoğunluğudur ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$h_k = \sum_{i,j} m_{i,j} \quad (13)$$

Polar bariyer yoğunluğunun dağılımı ayrık olduğundan, bu da eşit olmayan engel tahminine yol açabilir. Bu nedenle düzgün kutupsal engel yoğunluğu  $h'_k$  aşağıdaki fonksiyonun uygulanmasıyla elde edilir:

$$h'_k = \frac{h_{k-1} + 2h_{k-l+1} + \dots + lh_k + \dots + 2h_{k-l+1} + h_{k+1}}{2l+1} \quad (14)$$

Burada  $n$  sektör sayısı,  $l$  deney veya simülasyonla seçilen sabit bir tamsayıdır. Algoritma ile veri işlendikten sonra, Şekil 6'da gösterildiği gibi çevresel engellerin kutupsal histogramı elde edilebilir.



**Şekil 6.** Polar histogram. X eksenini cihaz tarafından algılanan engelin açısıdır. Y eksenini o yönde bir engelin olasılığını temsil eder [11].

Polar histogramın tüm sektörü,  $\eta_1$  eşik değeri ile güvensiz ve güvenli vadilere bölünmüştür. Cihazın optimal yönünü belirlemek için güvenlik vadisi  $\eta_2$  eşik değeri ile dar vadi ve geniş vadi olarak ikiye ayrılmıştır. VFH algoritmasında benimsenen maliyet fonksiyonu şu şekilde gösterilmektedir:

$$g(c) = \mu_1 \cdot \Delta(c, k_t) + \mu_2 \cdot \Delta\left(c, \frac{\theta_i}{\alpha}\right) + \mu_3 \cdot \Delta(c, k_{n,i-1}) \quad (15)$$

Burada,  $\Delta(c_1, c_2)$ ,  $c_1$  ve  $c_2$  sektörleri arasındaki mutlak açı farkını hesaplayan bir fonksiyondur.  $\Delta(c, k_t)$ , hedef yönü ifade eder,  $\Delta\left(c, \frac{\theta_i}{\alpha}\right)$  mevcut hareket yönünü ifade eder ve  $\Delta(c, k_{n,i-1})$  önceden seçilen hareket yönünü belirtir.

Maliyet fonksiyonunda ilk terim olası yön ile hedef yön arasındaki farkı temsil eder. Fark ne kadar büyük olursa, olası yönün cihazı hedef yönden uzağa yönlendirmesi o kadar fazla olur. İkinci terim, olası yön ile robotun mevcut yönü arasındaki farkı temsil eder. Fark ne kadar büyük olursa, hareketin yönünü de o kadar fazla değiştirilmesi gerekir. Üçüncü terim, olası yönden ve önceden seçilen hareket yönünden farkı temsil eder. Değer ne kadar büyük olursa, yeni dönüş komutundaki değişiklik de o kadar büyük olur.

$\mu_1$  robotun davranışı hedef odaklı olduğu oranda yüksek olur. Robot  $\mu_2$ 'nin yüksek olduğu oranda, verimli bir yol izlemeye ve hareket yönünde

minimum değişiklik yapmaya çalışır. Robot  $\mu_3$ 'ün yüksek olduğu oranda önceden belirlenmiş yöne gitmeye çalışır ve izlenen yol daha düzgün olur.

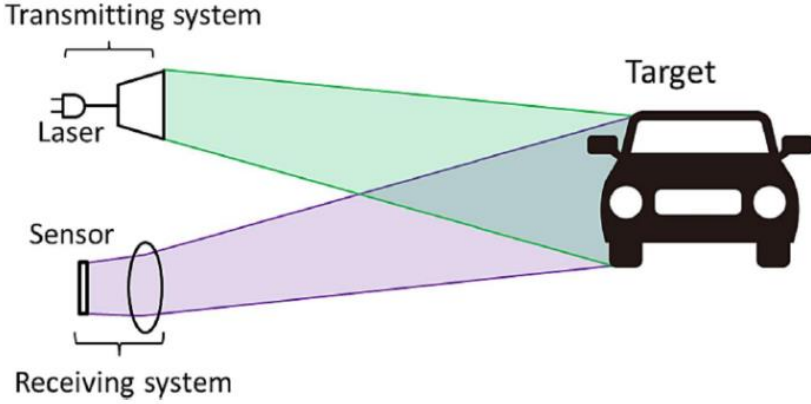
Maliyet fonksiyonunun ikinci ve üçüncü terimleri, robotun hareket yörüngesinin düzgünlüğünü belirlemek için kullanılır. Cihaz engellerinden kaçınmanın hedefe yönelik olduğu varsayılmaktadır. Dolayısıyla maliyet fonksiyonunun ağırlık ayarının  $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$  gereksinimini karşılaması gerekir.

Uygulamada polar histogram öncelikle cihazın geçmesine izin verecek kadar büyük olan tüm boşlukları belirlemek için kullanılır. Daha sonra tüm bu boşluklar için maliyet fonksiyonu hesaplanır ve son olarak en düşük maliyet fonksiyonuna sahip yol geçilecek şekilde seçilir. Maliyet fonksiyonu üç faktörden etkilenir: hedef yön, cihazın mevcut yönü ve önceden seçilen yön. Ortaya çıkan maliyet, bu üç faktörün ağırlıklı değeridir. Farklı ağırlıkları ayarlayarak cihaz tercihi ayarlanabilir [11].

### 3.3. LiDAR Görüş Alanı

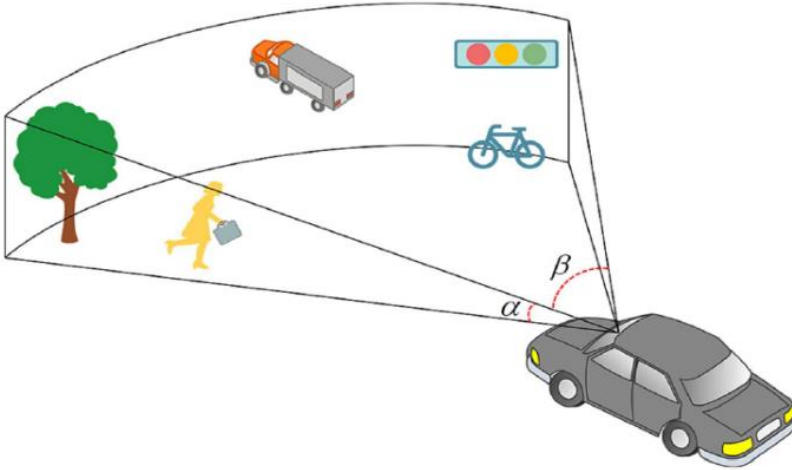
Görüntüleme LiDAR'ı, araç ortam algılama sistemlerinde kullanım için önemli bir sensördür ve FOV (Field of View) ve IFOV (Instantaneous Field of View), sırasıyla sistemin uzaysal kapsamını ve uzaysal algılama çözünürlüğünü belirler. Daha küçük bir IFOV, LiDAR'ın daha büyük bir mesafeden bir hedefi tanıyabildiğini gösterir. Geleneksel dizi tipi LiDAR sistemlerinin FOV'si ve IFOV'si dedektör tarafından sınırlandırılır ve aynı uzaysal kapsama alanını korurken hedef tanıma mesafesini artıramaz.

LiDAR'ın çalışma prensibi Şekil 7'de gösterilmiştir. Verici sistemi, lazer ışınını aktif olarak gönderir ve alıcı sistem daha sonra hedeften dağınık olarak yansıyan ışınları alarak hedefin mesafe ve azimut bilgisini elde eder. Aracın sürüş durumunun akıllı kontrolünü sağlamak için araca monteli LiDAR'ın aracın önündeki üç boyutlu ortamı algılayabilmesi gerekmektedir.



**Şekil 7.** LiDAR'ın çalışma prensibi. Verici sistem, lazer ışını aktif olarak iletir ve alıcı sistem daha sonra hedeften dağınık olarak yansıyan ışınları alır, böylece hedefin mesafesini ve azimutunu elde eder [12].

Şekil 8'de gösterildiği gibi, LiDAR sistemi dikdörtgen bir algılama FOV'sine sahiptir ve dikey ve yatay FOV açıları sırasıyla  $\alpha$  ve  $\beta$ 'dir. LiDAR'ın dikdörtgen FOV tespitini gerçekleştirebilmesinin üç yolu vardır: iki boyutta noktadan noktaya tarama gerçekleştirerek, tek boyutta doğrusal dizi taraması veya 3D flaş tespiti. Örnek olarak tek boyutta doğrusal dizi taraması sunan LiDAR sistemini ele alınırsa; burada  $\alpha$  açısı, doğrusal dizi dedektörüne karşılık gelen dikey FOV açısıdır ve FOV açısı  $\beta$ , yatay yönde tarama ile gerçekleştirilir.



**Şekil 8.** Araca monteli LiDAR'ın algılama FOV'u [12].

Geleneksel tek boyutlu tarama LiDAR'ında, hedefin doğrusal dizi dedektörü üzerindeki görüntü yüksekliği  $H$  ile dikey FOV  $\omega$  arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$H = f \cdot \tan\omega \quad (16)$$

burada  $f$ , LiDAR alıcı sistemin odak uzaklığıdır. Geleneksel LiDAR için IFOV:

$$IFOV(\omega) = \frac{d_{pixel}}{f \sec^2\omega} \quad (17)$$

burada  $d_{pixel}$  doğrusal dizi dedektöründeki tek bir pikselin boyutudur. LiDAR sisteminin IFOV'u tam FOV boyunca yaklaşık olarak eşittir.

LiDAR'ın aracın merkez yüksekliğine yerleştirildiğini varsayarsak, uzun mesafelerde bir hedef tespit edildiğinde hedef daha küçük bir FOV açısı kaplayacak ve LiDAR'ın FOV'unun merkezinde yer alacaktır. Merkezi FOV'un IFOV'unu azaltmak, hedefin uzaysal çözünürlüğünü iyileştirebilir. Alan odak uzaklığı FFL (The Field Focal Length), optik sistemin IFOV'unu kontrol etmek için kullanılabilir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$FFL(\omega) = \frac{\Delta H}{\Delta\omega} \quad (18)$$

Burada  $\Delta\omega$ , FOV açısındaki hafif değişiktir ve  $\Delta H$ , FOV açısındaki hafif değişikliğin neden olduğu görüntü yüksekliğindeki değişiktir. Bu durumda LiDAR sisteminin IFOV'u şöyledir:

$$IFOV(\omega) = \frac{d_{pixel}}{FFL(\omega)} \quad (19)$$

Dedektör özellikleri göz önüne alındığında, mevcut  $FFL(\omega)$ , optik sistemin IFOV'unu belirler. Bu nedenle, LiDAR IFOV'un eşit olmayan dağılımı, uygun  $FFL(\omega)$ 'nin kurulması ve ardından karşılık gelen alıcı sistemin tasarlanmasıyla gerçekleştirilebilir [12].

#### 4. Ultrasonik Sensörler

Ultrasonik, bir vericinin ses dalgaları gönderdiği ve bir alıcının yakındaki nesnelere yansıyan dalgaları yakaladığı akustik dalgaları ifade eder. Bu tür bir nesnenin mesafesi uçuş süresi (ToF) aracılığıyla belirlenir. Bu dalgalar, ses hızında (yayıma ortamının yoğunluğuna bağlı olarak) konik bir şekilde yayılır ve insan kulağının duyabileceğinden daha yüksek, 20-180 kHz arasındaki frekansları kullanır. Ultrasonik sensör, park

yardımlı, kör nokta tespiti ve yanal hareket gibi düşük hızlı, kısa mesafeli uygulamalar için uygundur. Düşük güç tüketimi (6W'a kadar) ile nispeten uygun fiyatlı bir nesne algılama sensörüdür.

Ultrasonik sensörler endüstriyel uygulamalardaki birçok algılama görevi için uygundur. Katı, sıvı, taneli veya toz halindeki nesnelere tespit etme yeteneğine sahiptirler. Ultrasonik sensörler, otomotiv uygulamaları için 40-70 kHz aralığındaki ses dalgalarını iletmek için ses dalgalarını dönüştürücüleri kullanır. Bu frekans aralığı insanların duyabileceği aralığın ötesinde olduğundan insan kulağı için güvenlidir. Bir arabanın park sisteminin, net bir sinyal alımı sağlamak için, bir jet motorundan gelen duyulabilir ses basıncına eşdeğer olan 100 dB'den fazla ses basıncı üretebildiği göz önüne alındığında, bu önemli bir faktördür.

Çoğu ultrasonik sensör, iletim ve alım arasındaki ses dalgalarının ToF'sinin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Ölçülen bu ToF daha sonra Denklem (20)'de gösterildiği gibi ölçüm aralığı içindeki bir nesneye veya bir reflektöre olan mesafeyi (d) hesaplamak için kullanılır

$$d = \text{Ses Dalga Hızı} \times \frac{T_{oF}}{2} \quad (20)$$

Ses dalgaları havada 340 m/s hızla hareket eder ve hava sıcaklığının, basıncın ve nemin bir fonksiyonudur (her santigrat derece için sesin hızı 0,6 m/s artar). Bir ses dalgasının 1 m'ye ulaşması için gereken süre yaklaşık  $3 \times 10^{-3}$  s iken, ışık ve radyo dalgaları için bu süre  $3 \times 10^{-9}$ 'dir. Bu çeşitli büyüklük farklılıkları, ultrasonik sistemlerde düşük hızlı sinyal işlemenin kullanılmasına izin verir. Bununla birlikte, basınca dayalı atmosferik koşullar, ultrasonik sensörlerin genel performansını zayıflatabilir. Bu sebeple SRR ve diğer teknolojiler ultrasonik sensörlere oranla daha fazla tercih edilir [13].

Ultrasonik sensörler farklı ölçüm teknikleri kullanır. Bunlardan piezoelektrik etki, frekans ve mesafe ölçümü kullanılarak yapılan ölçümler aşağıda açıklanmıştır.

**Piezoelektrik Etki:** Bir malzemenin mekanik stres altında elektriksel yük üretmesi veya tam tersi olarak elektriksel yük uygulandığında mekanik bir deformasyon oluşturmasıdır. Bu etkiyi kullanarak, otomobillerdeki ultrasonik sensörler genellikle piezoelektrik kristalleri kullanır. Örneğin, bir piezoelektrik kristalin elektrotlarına voltaj uygulandığında, kristalde mekanik bir deformasyon meydana gelir ve bu da akustik dalgaların oluşmasına neden olur. Tersine, kristale gelen bir akustik dalga, kristalin

salınımına neden olur ve bu da elektrotlarda alternatif bir voltaj üretir. Ancak, piezo dönüştürücülerin kararlı mekanik titreşimler yayması zaman alır ve bu gecikmeye başlatma süresi adı verilir.

**Frekans:** Ultrasonik sensörler genellikle 40 ila 50 kHz arasındaki bir frekans bandında çalışır çünkü bu frekans aralığının, hassasiyet ve menzil açısından en iyi dengeyi sağladığı ve aynı zamanda ortam seslerine karşı dayanıklılık gösterdiği kanıtlanmıştır. 50 kHz'den daha yüksek frekanslar, hava ortamındaki seslerin zayıflaması nedeniyle daha zayıf yankılara neden olurken, 40 kHz'den daha düşük frekanslar için girişim yapan sesin oranı daha fazladır. Ayrıca, ultrasonik sensörler hoparlörlerin aksine kendi rezonans frekanslarında çalışmaya eğilimlidir ve geniş bant sinyallerini verimli bir şekilde iletemezler. Bu nedenle, belirli bir frekans bandında çalışarak, ultrasonik sensörlerin performansını optimize etmek mümkün olur.

**Mesafe Ölçümü:** Ultrasonik sensörler, bir elektronik kontrol ünitesinden (ECU) aldıkları komutla birlikte devreyi çalıştırır ve dönüştürücüyü rezonans frekansında periyodik dalgalarla 300 µs boyunca uyarır. Bu uyarı, membranın titreşimine ve ultrasonik ping'lerin yayılmasına neden olur. Ancak, dönüştürücü iletim sırasında dinleme yapamaz. İletim durduktan sonra bile, sensör yankıları hemen alamaz çünkü zilin kapanma süresi yaklaşık 700 µs'dir. Bu nedenle, ultrasonik sensörler yakın çevredeki nesnelere tespit edemez. Dinlenme durumuna geçtikten sonra, zar yankıları algılar ve analog sinyallere dönüştürür. Daha sonra bu sinyaller güçlendirilir, filtrelenir ve sayısallaştırılır. Yankıların geliş zamanlarını belirlemek için bir eşikle karşılaştırılır. Bu işlem sonunda, yankılar tarafından tekrar titreştirilen zar, bir nesnenin mesafesini ölçmek için kullanılabilir [14].

#### 4.1. Ultrasonik Sensör Ölçme Şekli

Bir taşıt gövdesinin bir noktasının yerden uzaklığı şu şekilde hesaplanır:

$$D = k \cdot T_f \cdot V_s \cdot \quad (21)$$

Burada  $T_f$  ultrasonik darbenin uçuş süresini,  $k$  sensör geometrisine bağlı olarak değişen yaklaşık değeri 0,5 olan sabit ve  $V_s$  sesin havadaki hızını temsil eder.

Ultrasonik darbe bir piezoelektrik dönüştürücü kullanılarak üretilir ve yerden yansıyan yankı başka bir piezoelektrik dönüştürücü tarafından

alınır. İki dönüştürücü, ölçüm kafasını oluşturmak için birbirine yakın monte edilir. Sabitten kaynaklanan belirsizlik katkısı, ölçüm başlığı monte edildikten sonra sensör kalibrasyonu yoluyla ihmal edilebilir hale getirilebilir. Ölçülen büyüklükler  $T_f$  ve  $V_s$  ilişkisiz kabul edilebildiğinden, ölçülen mesafenin standart belirsizliği  $u(D)$  denklem (20)'den elde edilebilir.

$$u(D) = \sqrt{(kT_f)^2 u^2(V_s) + (kV_s)^2 u^2(T_f)} \quad (22)$$

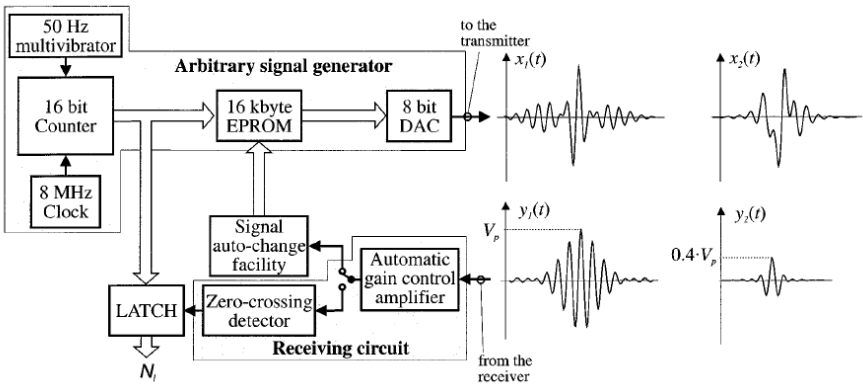
Burada  $u(V_s)$  ve  $u(T_f)$  ses hızı ve uçuş süresine ilişkin standart belirsizliklerdir. Sesin hızı ortam sıcaklığına ( $\theta$ ) göre ve sıcaklığa oranla daha az etkili olan hava nemi ( $h$ ) sebebiyle değişim gösterebilir.

$$V_s = f(\theta, h) \quad (23)$$

Böylece (20), aşağıdaki şekle kavuşur.

$$u(D) = \sqrt{(k \cdot T_f) \cdot \left[ \left( \frac{df}{d\theta} \right)^2 \cdot u^2(\theta) + \left( \frac{df}{dh} \right)^2 \cdot u^2(h) \right] + (k \cdot V_s)^2 \cdot u^2(T_f)} \quad (24)$$

Nem, %10 RH (Relative Humidity) ile %90 RH aralığında düzgün bir şekilde dağılmış rastgele bir değişken olarak kabul edilirse, bunun ses hızı üzerindeki etkisi 20 °C'de yaklaşık %0,15'tir. Bu, bir ortam için yaklaşık 0,3 mm'lik standart belirsizlik katkısına yol açar. Mesafe aralığı 0,3 m olduğundan nem sensörüne gerek yoktur.



Şekil 9. Ultrasonik sensör düzenlemesi ve uyarıcı sinyallere ve beklenen yankılara ilişkin iki örnek [15].

Şekil 9'daki daha güçlü eko  $y_1(t)$  (tepe genliği  $V_p$ ), vericinin  $x_1(t)$  sinyaliyle uyarılmasıyla elde edilir. Düşük gürültü koşullarına uygun olan daha dar ve daha zayıf eko  $y_2(t)$  (zirve genliği  $0.4V$ ),  $x_2(t)$  uyarı sinyali kullanılarak elde edilir. Sesin havadaki hızı,  $V_s = 20.055\sqrt{T}$ 'ye göre sıcaklığa bağlıdır. Burada  $T$  kelvin cinsinden sıcaklığı ifade eder. Bu nedenle  $0-40$  °C aralığındaki sıcaklık değişimlerinde ses hızının  $330-360$  m/s aralığında değişmesi beklenmelidir. Mesafenin belirlenmesinde bu tür etkinin dikkate alınması gerekir. Dolayısıyla bir sıcaklık sensörü gereklidir.

Ölçülen mesafenin belirsizliğini etkileyen bir başka olgu, ultrasonik darbenin yoluna dik olarak akan rüzgâr bileşeniyle aynı etkiye sahip olan araç hızıdır. Bu etki, darbe yolunun ve dolayısıyla ölçülen mesafenin arttırılmasından oluşur. Maksimum araba hızı  $V_w$ , ses hızının %10'u düzeyinde olduğundan, araba hızından kaynaklanan mesafe hatası yaklaşık olarak:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_w}{V_s}\right)^2 \quad (25)$$

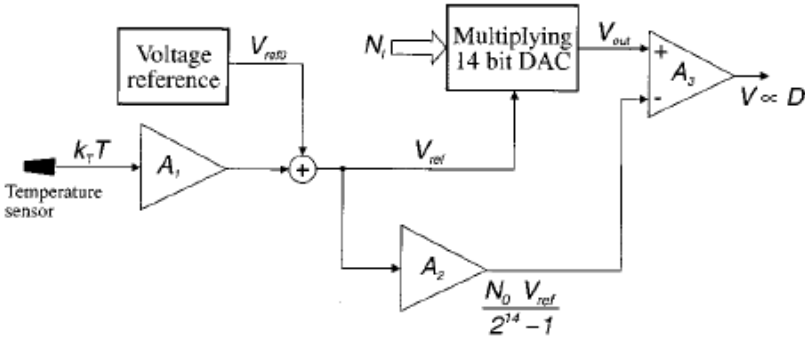
denklemlerle hesaplanır.  $33$  m/s'lik (yaklaşık  $120$  km/saat) bir araba hızı için,  $0$  °C'deki ( $V_s=330$  m/s) mesafe hatası yaklaşık %0,5'tir. Bu hatanın arabanın hızının bilinmesiyle kolayca düzeltilebileceğini unutmamak gerekir.  $0,1-0,3$  m aralığındaki mesafe ölçümü, uçuş süresinin  $0,5-2$  ms aralığında ölçülmesini gerektirir. Gerekli olan  $1$  mm'lik mesafe standart belirsizliği, uçuş süresinin  $2,5$  µs standart belirsizlikle, sıcaklığın  $1$  °C standart belirsizlikle ölçülmesiyle ve nem sensörünün kullanılmasından kaçınılmasıyla elde edilebilir.

Darbe oluşturmak için  $30$  kHz-  $5$  MHz aralığında frekanslara sahip ultrasonik sinyaller kullanılabilir. Daha düşük dalga boyları ve dolayısıyla potansiyel olarak daha iyi bir çözünürlük anlamına geldikleri için daha yüksek frekanslar tercih edilebilir, ancak frekans arttıkça havadaki ses zayıflaması önemli ölçüde artar. Ayrıca, daha yüksek frekanslar hem pahalı dönüştürücülere ve hızlı elektronik cihazlara ihtiyaç duymaktadır, dolayısıyla düşük maliyetli bir düzenlemenin elde edilememektedir. Daha düşük frekanslar, düşük saçılma sorunları avantajına sahiptir ve düşük maliyetli dönüştürücülerle elde edilebilir, ancak havadaki dalga boyu birkaç milimetredir, dolayısıyla dalga boyundan daha düşük ölçüm belirsizlikleri elde etmek için özel dikkat gerektirir.

Oldukça iyi sonuçlarla dalga boyu altı belirsizlikleri elde etmek için çeşitli yaklaşımlar araştırılmıştır, ancak önerilen çözümler genellikle elde edilen verilerin bir tür dijital işlenmesinin kullanılmasını gerektirir, dolayısıyla sensör maliyetini artırır [15].

#### 4.2. Uçuş Süresi Ölçümü

Sensör, ultrasonik darbeyi üretmek için yaygın 40 kHz piezoelektrik rezonans dönüştürücüleri kullanır. Hırsızlık önleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bu tür dönüştürücüler, düşük maliyetli olarak kolaylıkla temin edilebilir. Üretilen sinyalin periyodu 25 mikrosaniyedir ve 20 °C 'de yaklaşık 9 mm'lik bir dalga boyuna karşılık gelir. Sinyal üretici (Şekil 10), üretilecek sinyallere karşılık gelen örnekleri içeren 16 kbyte'lık bir EPROM, EPROM'u taramak için kullanılan 16 bitlik bir sayaç ve 8 bitlik DAC'tan (digital-to-analog converter) oluşur.



Şekil 10. Sıcaklık dengeleme devresi [15].

Sıfır geçiş dedektörü iki eşik dedektöründen oluşur. Eşiği alınan sinyal zirvesinin bir kısmı olan bir birinci detektör, alınan sinyali referans zemine göre karşılaştıran ikinci bir detektörü mümkün kılar. Bu, sinyal bölgesinde maksimum eğimde algılamaya olanak tanır, böylece gürültü etkileri en aza indirilir. EPROM'da saklanan uyarıcı sinyalleri, birinci eşik dedektörünün yankının farklı periyotlarında ateşlemesini önleyecek kadar dar yankılar elde etmek için özel olarak tasarlanmıştır. Bu tür özel sinyaller, yankı zirvesini sabit bir değere ulaşacak şekilde sınırlandırırken yankı enerjisinin en aza indirilmesine dayanan kısıtlı bir optimizasyon prosedürü aracılığıyla tasarlanır. Sabit genliğin en dar yankısını  $Y_p(f)$  almaya izin veren optimum sürüş sinyali  $X_{opt}(f)$ , aşağıdaki denklemlerin çözülmesiyle elde edilir.

$$X_{opt}(f) = \frac{1}{2} \lambda_1 \cdot \frac{H^*(f)}{|H(f)|^2 + \lambda_2} \quad (26)$$

$$Y_p(f) = \frac{1}{2} \lambda_1 \cdot \frac{|H(f)|^2}{|H(f)|^2 + \lambda_2} \quad (27)$$

Burada  $H(f)$  verici, yayılma ortamı ve alıcıdan oluşan iletim kanalının frekans tepkisi;  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  parametreleri ise doğrusal olmayan denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle hesaplanan Lagrange çarpanlarıdır.

$$-\frac{\lambda_1}{2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|H(f)|^2}{|H(f)|^2 + \lambda_2} df = \alpha y_{pmax} \quad (28)$$

$$-\frac{\lambda_1^2}{4} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|H(f)|^2}{[|H(f)|^2 + \lambda_2]^2} df = W \quad (29)$$

Burada  $W$ , uyarıcı sinyalin izin verilen maksimum enerjisidir ve  $\alpha y_{pmax}$  ( $\alpha \leq 1$ ) ekonun gerekli tepe genliğidir.

Optimizasyon sonucu seçilen yankı genliğine bağlıdır: gerekli genlik ne kadar düşük olursa, yankı o kadar dar olur ve dolayısıyla belirli bir bağlı gürültü genliği için yanlış ateşleme olasılığı da o kadar düşük olur. Şekil 9'da uyarıcı sinyalleri  $x(t)$  ve bunlara karşılık gelen beklenen yankılar  $y(t)$ 'nin iki örneği gösterilmektedir. Bu nedenle, herhangi bir koşulda kullanılacak en iyi sinyal, gerçek gürültü miktarına bağlıdır.

Sensör, yankısız aralıklarla giriş sinyalini izleyerek gerçek gürültüyü tahmin eden basit bir gürültü ölçüm sistemi içerir. Gürültü ölçüm sistemi çıkışı, düşük, orta ve yüksek gürültü koşullarında iyi sonuçlar elde etmek üzere uyarlanmış üç optimal sinyal arasında geçiş yapmak için kullanılır. Ek olarak, yankı genliği temel olarak zeminin yansıtıcılığına ve mesafesine bağlıdır. Bu tür etkiler, yankı genliğinin sabit bir değerde tutulacağı şekilde alıcı devrede bir otomatik kazanç kontrol amplifikatörü kullanılarak en aza indirilir [15].

Sistem 8 MHz'de çalışır, bu nedenle zaman çözünürlüğü 125 ns'dir ve ölçülebilir maksimum uçuş süresi yaklaşık 8 ms'dir. Bu durum 1 m'den daha büyük bir mesafeye karşılık gelir. 50 Hz'lik bir multivibratör, her 20 ms'de bir okuma sağlayarak sayacı yeniden başlatır.

### 4.3. Sıcaklık Ölçümü ve Mesafe Tahmini

Hava sıcaklığının ölçümü,  $k_T$  duyarlılığı 10 mV/C olan bir katı hal sensörü kullanılarak gerçekleştirilir. Sensör, ölçüm başlığının içine monte edilmiştir ve 1 °C'den daha az kalibre edilmemiş bir hataya sahiptir. Düşük maliyetli, çarpan 14 bitlik bir DAC, uçuş süresiyle orantılı bir  $V_{out}$  voltajı üretmek için sayaç çıkışı  $N_l$  ile beslenir:

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \frac{N_l}{2^{14} - 1} \quad (30)$$

14 DAC dijital girişi sayacın en önemli bitlerine bağlanır, böylece daha az önemli olan bit 0,5 mikro saniyelik bir zaman aralığına karşılık gelir. DAC'ın doğrusal olmaması genel ölçüm belirsizliğini ihmal edilebilir düzeyde etkiler. DAC voltaj referansı  $V_{ref}$ , sabit bir referans  $V_{ref0}$ 'ı sıcaklık sensörü tarafından üretilen voltajın kalibre edilmiş bir varyasyonu ile toplanarak elde edilir, böylece aşağıdaki formüle göre sıcaklıkla orantılı bir voltaj üretilir:

$$V_{out} = V_{ref0} + A_1 k_T T \quad (31)$$

$A_1$  katsayısının değerlerini ayarlayarak, ses değişiminin hızını kısmen telafi eden sıcaklıktaki bir  $V_{ref}$  değişimini elde etmek mümkündür. Sesin hızı sıcaklığın kareköküyle değiştiğinden ve referans voltajı sıcaklıkla doğrusal olarak değiştiğinden telafi tamamlanmamıştır. Artık sıcaklık etkisi, sesin havadaki hızının ve sıcaklığa bağlı referans voltajının çıkış voltajı  $V$  üzerindeki etkileri karşılaştırılarak analitik olarak tahmin edilmiştir. Beklenen sıcaklık etkisi 0 °C ila 40 °C aralığında  $\pm 0,03$ 'ten azdır (0,3 m'lik ölçülen mesafe için yaklaşık  $\pm 0,1$  mm). Otomotiv sensörleri için makul bir sıcaklık aralığı olan 20 °C ila 70 °C sıcaklık aralığı dikkate alınır aynı etki yaklaşık %0,1'dir ( $D=0,3$ mm için  $\pm 0,3$ m).

Analog devre, çıkıştan sabit  $N_0$  koduna karşılık gelen bir voltajı çıkaran ve böylece yalnızca mesafeyle orantılı bir voltaj üreten işlemsel yükselteçler  $A_2$  ve  $A_3$  tarafından tamamlanır. Dijital çıkış, 8 bitlik bir analogdan dijitale dönüştürücü tarafından sağlanan isteğe bağlı bir dijital sıcaklık değeriyle birlikte daha ileri dijital işleme için mevcuttur. Sensör kalibrasyonu, sensör kafasını bilinen iki mesafe arasında hareket ettiren kazanç ve sıfır düzelticiler üzerinde çalıştırılarak elde edilebilir [15].

## 5. Kameralar

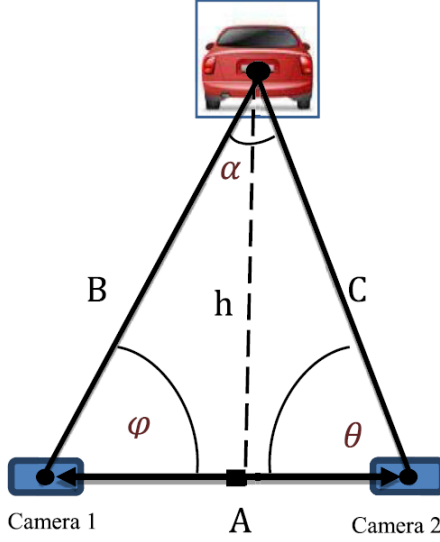
Mono görüş sistemleri, kamera görüş alanındaki referans noktalarına dayalı olarak mesafeyi tahmin etmek için bir kamera kullanır ve genellikle görsel yönlendirme amacıyla kullanılır. Stereo görüş sistemi, mesafeyi hesaplamak için stereoskopik mesafe belirleme tekniklerini temel alan bir bilgisayarlı görme sistemidir. Bu sistem, iki kamerayı tek kamera gibi kullanarak derinlik izlenimi vermeye ve kameralar arasındaki nesnelerin eşitsizliğinden yararlanarak mesafeyi yüksek doğrulukla hesaplamaya çalışır.

Nesne mesafe ölçümü ile ilgili mevcut birçok çalışma olsa da bunların mesafe ölçüm yöntemlerinde profesyonel kameralar kullanılmış ve hesaplama formülleri, süreci zaman alıcı hale getiren karmaşık hesaplama terimleri içermiştir. Ancak burada, yalnızca web kameraları kullanılarak mesafe ölçümü için stereo görüşe dayalı bir algoritma açıklanacaktır.

### 5.1. Stereo Görüş Yöntemi

Stereo görüş, yatay olarak hizalanmış ve dikey olarak birbirinden diğerine yerleştirilmiş iki kameradan bir sahnenin derinlik bilgisini çıkarmayı, kendi gözlerimize benzer şekilde aynı sahnenin aynı anda iki farklı görüntüsünü elde etmeyi amaçlayan iyi bilinen bir tekniktir. Temel fikir, bir sahneyi iki farklı bakış açısından kaydetmek ve sahnedeki nesnelerin konumunu, ilişkisini ve yapısını belirtmek için eşitsizlikten yararlanmaktır. İki görüntüdeki piksel konumları arasındaki fark derinlik izlenimi yaratır. Nesnenin mesafesi, iki kameranın örtüşen görüş alanında olduğunda ölçülür.

Şekil 11'de gösterildiği gibi, iki kamera yatay olarak monte edilmiştir ve A mesafesi kadar ayrılmıştır; burada  $h$ , nesne ile kameralar arasında istenen mesafedir. Bu mesafeyi ölçmek için şu parametreler gereklidir: nesne ile sol kamerayı ayıran mesafe B, nesne ile sağ kamera arasındaki mesafe C, ve nesne ile iki kameranın oluşturduğu üçgenin açılarıdır  $(\alpha, \varphi, \theta)$  [16].



Şekil 11. Stereo kamera olarak monte edilmiş iki kamera örneği [16].

Trigonometrik fonksiyonlara bağlı olarak:

$$\sin\varphi = \frac{h}{B} \quad (32)$$

$$\sin\theta = \frac{h}{C} \quad (33)$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca sinüs kuralına göre;

$$h = B \cdot \sin\varphi = C \cdot \sin\theta \quad (34)$$

$$\frac{A}{\sin\alpha} = \frac{B}{\sin\theta}, \quad B = \frac{A \sin\theta}{\sin\alpha} \quad (35)$$

elde edilmektedir. Sonuçta (34) ve (35) denklemleri kullanılarak:

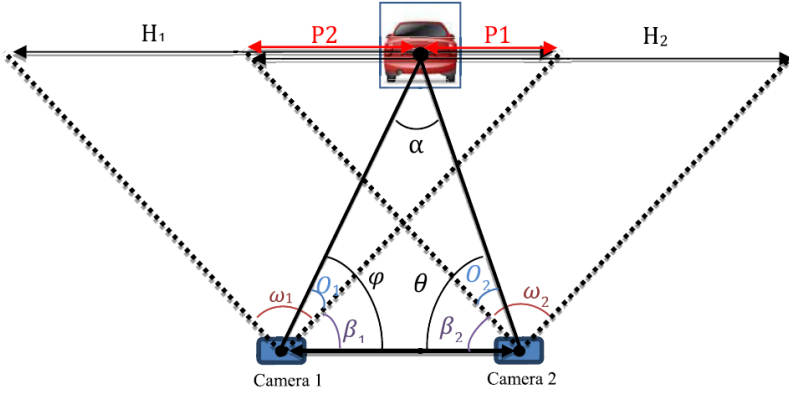
$$h = \frac{A \sin\theta \sin\varphi}{\sin\alpha} \quad (36)$$

sonucuna ulaşılır.

### 5.1.1. Açıların ( $\theta$ , $\varphi$ , $\alpha$ ) Hesaplanması

Öklid geometrisinde bir üçgenin açılarının toplamı her zaman düz açıya eşittir, dolayısıyla:

$$\theta + \varphi + \alpha = 180^\circ \quad (37)$$



Şekil 12. Mesafeyi hesaplamak için kullanılan açıların çizimi [16].

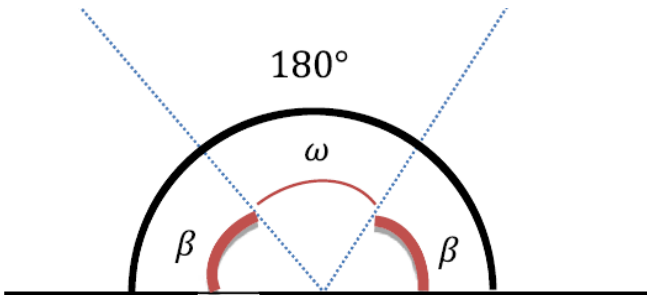
Şekil 12'de,  $\omega_1, \omega_2$  sırasıyla iki kameranın görüş açıları,  $H_1, H_2$  sırasıyla iki kameranın yatay piksel sayısı,  $P_1, P_2$  ise nesnenin her iki kameradaki konumunu göstermektedir. Burada  $P_1$ , nesnenin ağırlık merkezi ile soldaki kamera için örtüşme alanının sonu arasındaki piksel cinsinden mesafedir.  $P_2$  ise nesnenin merkez noktası ile sağ kamera için örtüşme alanının başlangıcı arasındaki piksel cinsinden mesafeyi vermektedir.

$$\varphi = O_1 + \beta_1, \theta = O_2 + \beta_2 \quad (38)$$

denklemleri ile ifade edilir. Buradan Şekil 13'e göre:

$$\beta = \frac{180-\omega}{2}, \beta_1 = \frac{180-\omega_1}{2}, \beta_2 = \frac{180-\omega_2}{2} \quad (39)$$

elde edilir.



Şekil 13. Kameranın açıları [16].

$O_1$  ve  $O_2$  açıları, nesnenin her iki kameradaki ( $P_1$  ve  $P_2$ ) konumu ile iki kameradaki ( $Ap_1$  ve  $Ap_2$ ) her piksele karşılık gelen açılarla çarpılarak elde edilebilir:

$$O_1 = P_1 \cdot Ap_1, \quad O_2 = P_2 \cdot Ap_2. \quad (40)$$

Bu nedenle  $Ap_1$  ve  $Ap_2$  açılarının hesaplanması gerekir. Birinci kamera için  $\omega_1$  açısı  $H_1$  piksele karşılık gelir ve  $\omega_2$  açısı ikinci kamera için  $H_2$  piksele karşılık gelir. Yani  $Ap_1$  ve  $Ap_2$  şu şekilde tanımlanır:

$$Ap_1 = \frac{\omega_1}{H_1}, \quad Ap_2 = \frac{\omega_2}{H_2}. \quad (41)$$

Denklem (38), (40) ve (41)'e göre:

$$\varphi = P_1 \cdot \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1, \quad \theta = P_2 \cdot \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \quad (42)$$

olarak elde edilir. Denklem (37) kullanılarak:

$$\alpha = 180 - (\varphi + \theta) = 180 - \left( \left( P_1 \cdot \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1 \right) + \left( P_2 \cdot \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \right) \right) \quad (43)$$

şeklinde hesaplanır. Son olarak denklem (36), (42) ve (43)'a göre:

$$h = \frac{\left( A \sin \left( P_2 \cdot \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \right) \sin \left( P_1 \cdot \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1 \right) \right)}{\sin \left( 180 - \left( \left( P_1 \cdot \frac{\omega_1}{H_1} + \beta_1 \right) + \left( P_2 \cdot \frac{\omega_2}{H_2} + \beta_2 \right) \right) \right)} \quad (44)$$

denklemini elde edilir. Objenin mesafesi, her iki kameranın görüş açılarını, kameralar arasındaki mesafeyi ve her iki kameradaki obje pozisyonlarını dikkate alarak kolayca hesaplanabilir [16].

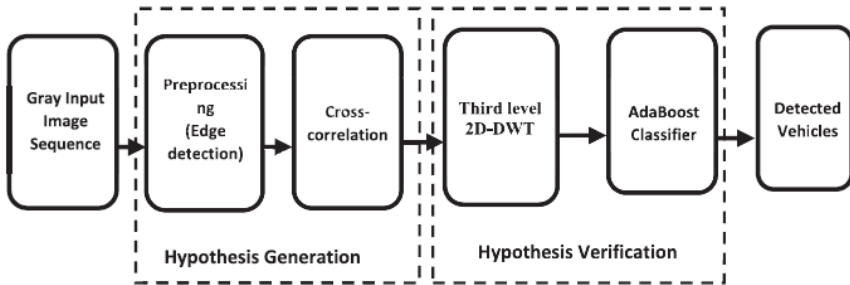
## 5.2. Nesne Algılama

Araç tespit algoritmasının performansının mesafe ölçüm performansı ile orantılı olarak hareket ettiği mesafe ölçüm sistemlerinde nesnelerin tespiti önemli bir görevdir. Bu nedenle araç mesafesini ölçmeden önce verimli bir araç tespit algoritması uygulanır. Bu algoritma iki adımdan oluşur: hipotez oluşturma adımı ve hipotez doğrulama adımı. Hipotez oluşturma adımı, araçların potansiyel konumları (hipotezler) oluşturulur, bu oluşturma, kenar tespiti kullanılarak bir ön işlem gerçekleştirildikten sonra çapraz korelasyon kullanılarak araç şablonlarının görüntülerle eşleştirilmesine dayanır. Hipotez doğrulamasında, ilk adımda oluşturulan hipotezler iki işlem gerçekleştirilerek doğrulanır: özellik çıkarma ve sınıflandırma. İki boyutlu

ayrık dalgacık dönüşümünün üçüncü seviyesi, oluşturulan hipotezlerden özellikler çıkarmak ve bunları AdaBoost (Adaptive Boosting) sınıflandırıcısını kullanarak hipotezleri araç veya araç olmayan olarak sınıflandırmak için kullanmak için gerçekleştirilir. Stereo görüş sisteminde mesafe ölçümü için her iki kameranın yakaladığı görüntülere zaman harcayan nesne tespit yöntemleri uygulanır. Bununla birlikte, önerilen yöntemde, nesne tespit yöntemi yalnızca bir kamera tarafından yakalanan görüntülere uygulanır, ardından açıkça işleme süresini azaltan stereo eşleştirme yöntemi uygulanır. Şekil 14, bu prosesin genel akış diyagramını göstermektedir [17].

### 5.3. Stereo Eşleştirme

Bu tür sistemlerde karşılaşılabileceğimiz sorun, birden fazla nesne varken sol kamerada seçilen nesnenin sağ kameradakiyle aynı olduğunu nasıl bileceğidir. Bu nedenle nesnelerin mesafelerini ölçmeden önce, aynı nesnenin iki görüntüdeki konumunu tanımlamamız gerekir. Bu tür sistemlerde her iki kameranın yakaladığı görüntülere nesne tespit yöntemleri uygulanır. Daha sonra her iki kamerada da tespit edilen nesnelere eşleştirmek için bazı stereo eşleştirme algoritmaları uyguluyorlar ve bu da zaman alıyor. Ancak yöntemdeki amaç, tek kamera ile çekilen görüntülere araç tespit yöntemini uygulayarak araçlar konumlarını belirlemek ve daha sonra bunları diğer kameranın çektiği görüntülerdeki aynı araçlarla eşleştirmektir. Bu eşleştirme, ilk kamera tarafından alınan görüntülerde tespit edilen araçlar ile ikinci kamera tarafından alınan görüntülerde aynı yatay konumda gerçekleştirilen çapraz-korelasyon tekniği ile yapılmaktadır.



Şekil 12. Araç algılama sürecinin genel akış diyagramı [16].

İlk kamera tarafından alınan görüntülerde tespit edilen araç ile ikinci kamera tarafından alınan görüntülerde aynı yatay konumda gerçekleştirilen

çapraz-korelasyon tekniği ile eşleştirme yapılmaktadır. Temelde, çapraz-korelasyon fonksiyonu +1 ve -1 arasında değişir, en iyi korelasyon durumu, çapraz-korelasyon fonksiyonunun +1'e yakın değerler aldığıında belirlenir. Bu nedenle, çapraz-korelasyon tekniği sonucunun önceden belirlenmiş bir eşik değerinden büyük bir maksimum değer aldığıında en iyi eşleşme tespit edilir. Ancak sonuç belirli bir eşik değerinden daha küçük bir değer aldığıında hiçbir eşleşme tespit edilemez. Başka bir deyişle, araç sadece her iki kameranın örtüşen görüş alanının dışında tespit edilebilir [16].

## 6. Sonuç

Bu çalışmada otonom araçlarda kullanılan sensör yapılarının temel veri toplama ve işleme yapıları anlatılmıştır. Bu araçlar otonom sürüşü desteklemek için farklı amaçlara hizmet eden çeşitli sensörlerle donatılmıştır. Çevresel değişimleri ve oluşumları kavramak için kullanılan bu sensörler farklı yapılarda (optik, manyetik vb.) tasarlanarak kullanılabilir. Otonom araçlarda kritik öneme sahip dört sensör çeşidi bulunmaktadır. Bunlar RADAR, LiDAR, Ultrasonik ve kamera sensörleridir. Radar sensörü, radyo dalgalarını kullanarak çevresel öğeleri algılar ve aracın güvenli şekilde ilerlemesine olanak sağlar. LiDAR ise RADAR ile aynı görevi yapmakla beraber lazer ışınları kullandıkları için hava şartlarından fazlaca etkilenmektedir. Ultrasonik sensörler yakın mesafe algılama için oldukça verimlidir fakat uzun mesafelerde verimleri düşer. Kameralar, cisimlerden yayılan ışığı toplar ve elde edilen veriler ile görüntüler oluşturur fakat bu süreçlerde işlenmesi gereken büyük veri paketleri ortaya çıkar. Tüm bu sistemler farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu sebeple otonom araçlarda, sensörlerin avantajlarından faydalanılan hibrit bir sistem oluşturulmaktadır.

**KAYNAKLAR**

- [1] Yeong, D. J., Velasco-Hernandez, G., Barry, J., & Walsh, J. (2021). Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, 21(6), 2140.
- [2] Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D., & Ali, M. (2017). Automotive radars: A review of signal processing techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 22-35.
- [3] Ortiz, F. M., Sammarco, M., Costa, L. H. M., & Detyniecki, M. (2022). Applications and services using vehicular exteroceptive sensors: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(1), 949-969.
- [4] Wong, P. K., Tam, L. M., & Ke, L. (2012). Automotive engine power performance tuning under numerical and nominal data. *Control Engineering Practice*, 20(3), 300-314.
- [5] Kim, J., Park, S., & Lee, U. (2020). Dashcam witness: Video sharing motives and privacy concerns across different nations. *IEEE Access*, 8, 110425-110437.
- [6] Wahlström, J., Skog, I., & Händel, P. (2017). Smartphone-based vehicle telematics: A ten-year anniversary. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(10), 2802-2825.
- [7] Seneviratne, S., Hu, Y., Nguyen, T., Lan, G., Khalifa, S., Thilakarathna, K., ... & Seneviratne, A. (2017). A survey of wearable devices and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2573-2620.
- [8] Ortiz, F. M., Sammarco, M., Costa, L. H. M., & Detyniecki, M. (2020). Vehicle telematics via exteroceptive sensors: A survey. *arXiv preprint arXiv:2008.12632*.
- [9] Chaki, J., Dey, N., Shi, F., & Sherratt, R. S. (2019). Pattern mining approaches used in sensor-based biometric recognition: a review. *IEEE Sensors Journal*, 19(10), 3569-3580.
- [10] Shung, J. L. W., Piazzoni, A., Vijay, R., Kin, L. A. H., & de Boer, N. (2023). White paper on Selected Environmental Parameters affecting Autonomous Vehicle (AV) Sensors. *arXiv preprint arXiv:2309.02673*.

- [11] Liang, Q., Wang, Z., Yin, Y., Xiong, W., Zhang, J., & Yang, Z. (2023). Autonomous aerial obstacle avoidance using LiDAR sensor fusion. *Plos one*, 18(6), e0287177.
- [12] Wang, X., & Zhu, J. (2024). Vehicle-mounted imaging LiDAR with nonuniform distribution of instantaneous field of view. *Optics & Laser Technology*, 169, 110063.
- [13] Vargas, J., Alsweiss, S., Toker, O., Razdan, R., & Santos, J. (2021). An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions. *Sensors*, 21(16), 5397.
- [14] Xu, W., Yan, C., Jia, W., Ji, X., & Liu, J. (2018). Analyzing and enhancing the security of ultrasonic sensors for autonomous vehicles. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 5015-5029.
- [15] Carullo, A., & Parvis, M. (2001). An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. *IEEE Sensors journal*, 1(2), 143.
- [16] Zaarane, A., Slimani, I., Al Okaishi, W., Atouf, I., & Hamdoun, A. (2020). Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera. *Array*, 5, 100016.
- [17] Wei, S. D., & Lai, S. H. (2008). Fast template matching based on normalized cross correlation with adaptive multilevel winner update. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(11), 2227-2235.

