



# TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK 2

Editörler

Doç. Dr. Şakir PARLAKYILDIZ

DOÇ. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ



# **TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK 2**

**Editörler:**

**Doç. Dr. Şakir PARLAKYILDIZ**

**Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ**



## **TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK 2**

**Editörler: Doç. Dr. Şakir PARLAKYILDIZ, DOÇ. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ**

**Genel Yayın Yönetmeni:** Berkan Balpetek

**Kapak Tasarımı:** Duvar Design

**Yayın Tarihi:** Aralık 2024

**Yayıncı Sertifika No:** 49837

**ISBN:978-625-5530-54-7**

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

[www.duvar yayinlari.com](http://www.duvar yayinlari.com)

[duvarkitabevi@gmail.com](mailto:duvarkitabevi@gmail.com)

*\*Yayınevi ve editörler, yazarların belirtmiş olduğu görüş ve düşünceler ile doğabilecek etik ihlallerinin sorumluluğunu kabul etmekle yükümlü olmayıp kitapta yer alan yazıların sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.*

## İÇİNDEKİLLER

### 1. Bölüm.....6

#### BİYOTEKNOLOJİK AÇIDAN BİTKİSEL SEKONDER METABOLİTLERİN ÜRETİMİ

*ABAYHAN BURAN*

### 2. Bölüm.....29

#### YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ SANTRALLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME TABANLI GİZLİ ISI TERMAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI

*Ahmet ÇAĞLAR*

### 3. Bölüm.....39

#### GPS TABANLI AKILLI TELEFON UYGULAMASININ VERİLERİ VE CBS KULLANILARAK AİZANOİ ANTİK KENTİ'NDE TURİST HAREKETLİLİĞİNİN ANALİZİ

*Ahmet USLU*

### 4. Bölüm.....55

#### PORTAKAL KABUĞUNUN KURUTULMASINDA ULTRASON DESTEKLİ OZMOTİK KURUTMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

*Şevki HOKKAÖMEROĞLU, Burçin YILMAZ*

**5. Bölüm.....73**

**MOBİL ROBOTLARDA SLAM VE DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN  
HARİTA GÜNCELLEMESİ**

*Oğuzhan BOZOĞLU, Can COŞKUN, Zuhal OKTAY*

**6. Bölüm.....96**

**POLİMERLERİN KULLANILDIĞI EKLEMELİ İMALAT  
YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

*Merve Sena SUR , Devrim Demiray SOYASLAN*

**7. Bölüm.....110**

**İSTANBUL'DA BİR BİNA İÇİN ISI YALITIMININ ÖNEMİ VE  
MALZEME SEÇİMİNİN ETKİLERİNİN TS 825'E GÖRE ANALİZİ**

*Fadel AL HAMADO AL CHEHABI, Mustafa TAHİR AKKOYUNLU*

*Ali KAHRAMAN*

**8. Bölüm.....135**

**SICAK PRESLEME VE NANOTEKNOLOJİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN  
ÇEVRE DOSTU AMBALAJ MATERYALLERİNİN ÜRETİMİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

*İdris KAYNAK*

**9. Bölüm.....156**

**YARA ÖRTÜCÜ UYGULAMALARA YÖNELİK BİTKİLERİN  
ÖNEMİ, BİTKİ ETKEN MADDE AYRIŞTIRMA, NANOTEKNOLOJİK  
ELEKTROEĞİRME VE GELECEK PERSPEKTİFİ**

*İdris KAYNAK*

**10. Bölüm.....174**

**GÖRÜNTÜ STEGANOĞRAFİSİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER**

*Songül KARAKUŞ , Fırat ARTUĞER*

**11. Bölüm.....190**

**DOKU MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARI İÇİN  
ELEKTROEĞİRME TEKNOLOJİSİ**

*Ziyyan Buse YARALI ÇEVİK*

## 1. Bölüm

# BİYOTEKNOLOJİK AÇIDAN BİTKİSEL SEKONDER METABOLİTLERİN ÜRETİMİ

Abayhan BURAN<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Arş. Gör.

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü

Orcid: 0000-0003-4204-8638

## **Giriş**

Bitkisel sekonder metabolitler, ilaç, gıda ve kozmetik endüstrileri gibi pek çok alanda hayati öneme sahip biyoaktif bileşiklerdir. Biyoteknolojik üretim yöntemleri, bu değerli bileşiklerin üretiminde geleneksel tarımsal yöntemlere göre daha sürdürülebilir, verimli ve kontrollü bir çözüm sunmaktadır. Bu bağlamda, hücre kültürü, genetik mühendislik ve biyoreaktör teknolojileri gibi modern yaklaşımlar, sekonder metabolitlerin büyük ölçekli üretimini mümkün kılmakta ve ürün kalitesini artırmaktadır. Biyoreaktörlerde kullanılan bitki hücre kültürleri, sekonder metabolitlerin sürdürülebilir üretimi için büyük bir potansiyele sahiptir. Geleneksel yöntemlere kıyasla, biyoreaktörler kontrollü ortamlar sağlayarak metabolitlerin verimliliğini ve saflığını artırır. Bu bileşiklerin ekonomik değeri çok yönlüdür; örneğin, alkaloidler, flavonoidler ve terpenoidler gibi sekonder metabolitler farmasötik, gıda ve kozmetik ürünlerinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ürüne olan talep arttıkça, biyoteknolojik üretim yöntemlerinin geliştirilmesi de hız kazanmaktadır. Metabolik mühendislik teknikleri, belirli sekonder metabolitlerin üretimini hedefleyerek daha verimli ve sürdürülebilir üretim süreçleri geliştirmeyi mümkün kılar. Üretim yollarının endüstriyel koşullarda optimize edilmesi zordur ve bu nedenle temel araştırmalar ile biyoteknolojik yeniliklerin geliştirilmesi gereklidir. Özellikle bitkilerde bulunan aktif bileşiklerin biyoteknolojik süreçlerle üretimi, çevre dostu, yüksek saflıkta ve daha düşük maliyetli çözümler sunmaktadır. Bitki hücre ve doku kültürleri, genetik mühendisliği, endofitik mikroorganizmalar ve nanoteknoloji gibi yenilikçi teknolojiler bu alanda yeni fırsatlar yaratmaktadır. Bu yaklaşımlar yalnızca sekonder metabolitlerin sürdürülebilir üretimini desteklemekle kalmaz, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına, yeni terapötik ajanların keşfine ve geliştirilmesine de katkı sağlar. Bitkisel sekonder metabolitlerin biyoteknolojik üretimi, hem bilimsel hem de ticari açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Bu alanda kaydedilen ilerlemeler, endüstriyel üretim süreçlerini dönüştürme, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkıda bulunma ve farklı sektörlerdeki uygulama potansiyelini genişletme potansiyeli taşır.

## **Sekonder Metabolitler Nedir?**

Sekonder metabolitler, bitkiler, mantarlar ve mikroorganizmalar tarafından üretilen, genellikle bitkinin büyümesi ve gelişmesi için doğrudan gerekli olmayan, ancak çevresel streslere karşı koruma sağlayan ve çeşitli biyolojik aktiviteleri olan organik bileşiklerdir. Bu metabolitler, bitkilerin savunma mekanizmalarında, ekosistem dinamiklerinde ve insan sağlığına yönelik faydalı etkilerde önemli bir rol oynamaktadır (Wang vd., 2018). Sekonder metabolitler,



genellikle fenolik bileşikler, alkaloidler, terpenler ve flavonoidler gibi çeşitli kimyasal gruplar altında sınıflandırılabilir (Wang vd., 2018; Alhassan vd., 2014).

Sekonder metabolitlerin üretim yolları, genellikle karmaşık biyokimyasal süreçler içerir. Örneğin, terpenoidlerin biosentezi, izoprenoid birimlerinin bir araya gelmesiyle gerçekleşir ve bu süreçte çeşitli enzimler rol oynar (Sun vd., 2023). Flavonoidlerin biosentezi ise, fenilpropanoid yoluyla başlar ve bu yolda önemli enzimler arasında chalcone synthase (CHS) yer alır (Jie, 2023). Ayrıca, birçok sekonder metabolit, bitkilerin stres koşullarına yanıt olarak sentezlenir; örneğin, monotrpenler, bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı savunma mekanizmalarını güçlendirebilir (Su vd., 2023).

Sekonder metabolitlerin biyolojik işlevleri oldukça çeşitlidir. Örneğin, flavonoidler ve fenolik asitler, antioksidan özellikleri ile bilinirken, alkaloidler genellikle toksik etkileri ve farmakolojik özellikleri ile dikkat çeker (Çiğnitaş, 2023). Terpenler, bitkilerin savunma mekanizmalarında önemli bir rol oynar ve birçok endüstriyel uygulamada kullanılır (Kang vd., 2021). Ayrıca, sekonder metabolitler, bitkilerin patojenlere karşı direnç geliştirmesine yardımcı olur ve bu nedenle tarımsal üretimde önemli bir yere sahiptir (Özkale, 2017).

Sekonder metabolitler, bitkilerin çevresel streslere karşı savunma mekanizmalarının yanı sıra, insan sağlığı üzerinde de önemli etkilere sahip olan karmaşık bileşiklerdir. Bu metabolitlerin üretim yolları ve biyolojik işlevleri, bitkilerin ekosistem içindeki rolünü ve tarımsal üretimdeki önemini anlamak için kritik öneme sahiptir (Wang vd., 2018; Alhassan vd., 2014).

### **Sekonder Metabolit Kaynakları Nelerdir?**

Sekonder metabolitler, bitkilerin biyolojik süreçlerinde önemli bir rol oynayan ve genellikle bitkilerin büyüme ve gelişiminde doğrudan etkili olmayan, ancak çevresel streslere karşı savunma mekanizmaları olarak işlev gören bileşiklerdir. Bu metabolitler, bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı adaptasyonlarını artırarak, bitkilerin hayatta kalma şansını yükseltirler. Sekonder metabolitlerin başlıca kaynakları arasında bitkiler, mikroorganizmalar ve bazı mantar türleri bulunmaktadır. Bitkiler, çeşitli iklim ve toprak koşullarında farklı sekonder metabolit türleri üretebilirler, bu da onların çevresel değişikliklere yanıt verme yeteneklerini artırır (Turker, 2023; Demirci vd., 2015).

Bitkilerde bulunan sekonder metabolitler, genellikle fenolik bileşikler, alkaloidler, terpenoidler ve glikozitler gibi gruplara ayrılabilir. Fenolik bileşikler, bitkilerin UV ışınlarına karşı korunmasında ve patojenlere karşı savunma mekanizmalarında önemli rol oynar (Onat vd., 2021). Örneğin, kafeik

asit ve p-kumarik asit gibi bileşikler, bitkilerin abiyotik stres koşullarına karşı dayanıklılığını artırmak için sentezlenir (Onat vd., 2021). Ayrıca, alkaloidler, bitkilerin savunma mekanizmalarında önemli bir yere sahiptir ve birçok bitki türünde bulunur. Bu bileşikler, hem insanlar hem de hayvanlar için toksik olabilen özelliklere sahip olabilir (Ok ve Şanlı, 2022).

Mikroorganizmalar da sekonder metabolit üretiminde önemli bir rol oynar. Özellikle bazı bakteriler ve mantarlar, antibiyotikler gibi biyolojik olarak aktif bileşikler üreterek, bitkilerin ve diğer organizmaların hastalıklara karşı korunmasına yardımcı olurlar. Bu mikroorganizmaların sekonder metabolitleri, tarımda bitki koruma ürünleri olarak kullanılabilir (Demirci vd., 2015). Bunun yanı sıra, bitki doku kültürü teknikleri kullanılarak, belirli sekonder metabolitlerin üretimi artırılabilir. Bu yöntemler, bitkilerin genetik yapısını değiştirerek veya çevresel koşulları manipüle ederek sekonder metabolit üretimini optimize etmeyi hedefler (Vuran ve Türker, 2021; Güven ve Gürsul, 2014).

Sekonder metabolit kaynakları, bitkiler, mikroorganizmalar ve mantarlar gibi çeşitli organizmalardan oluşmaktadır. Bu metabolitler, bitkilerin çevresel streslere karşı dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda sağlık alanında önemli faydalar sunmaktadır. Bitki doku kültürü ve biyoreaktör teknolojileri gibi modern yöntemler, sekonder metabolit üretimini artırmak için kullanılabilir ve bu alandaki araştırmalar, gelecekte daha fazla keşif ve uygulama potansiyeli sunmaktadır (Demirci vd., 2015; Vuran ve Türker, 2021; Ülger ve Ayhan, 2020; Güven ve Gürsul, 2014).

### **Mikrobiyal Sekonder Metabolitler**

Mikrobiyal sekonder metabolitler, mikroorganizmalar tarafından üretilen ve organizmanın büyümesi için doğrudan gerekli olmayan, ancak ekolojik ve biyolojik işlevleri bakımından önemli olan organik bileşiklerdir. Bu metabolitler, genellikle bitkilerin ve mikroorganizmaların çevresel streslere karşı savunma mekanizmalarının bir parçası olarak ortaya çıkarlar. Örneğin, bitkiler herbivor saldırılarına karşı toksik veya itici bileşikler üretirken, mikroorganizmalar da benzer şekilde patojenlere karşı koruyucu metabolitler sentezler (Çalışkan vd., 2019; Ülger ve Ayhan, 2020). Sekonder metabolitlerin çeşitliliği oldukça fazladır; dünya genelinde 50.000'den fazla farklı sekonder metabolit tanımlanmıştır (Çalışkan vd., 2019).

Sekonder metabolitlerin üretimi, genellikle biyosentez yoluyla primer metabolitlerden türetilir. Bu süreç, bitkilerde ve mikroorganizmalar arasında farklılıklar gösterebilir. Örneğin, flavonoidler ve alkaloidler gibi bazı sekonder metabolitler, bitkilerin stres koşullarına yanıt olarak birikirken,

mikroorganizmalar da çevresel koşullara bağlı olarak çeşitli metabolitler üretirler (Turker, 2023; Onat vd., 2021). Bitkilerde sekonder metabolitlerin üretimi, genetik faktörlerin yanı sıra çevresel etmenlerden de etkilenmektedir; sıcaklık, ışık ve su gibi faktörler, metabolitlerin sentezini etkileyen önemli unsurlardır (Katar vd., 2021).

Mikrobiyal sekonder metabolitlerin üretimi, biyoteknolojik yöntemlerle de artırılabilir. Örneğin, doku kültürü teknikleri kullanılarak bitkilerden daha yüksek verim ve kalitede sekonder metabolitler elde edilebilir (Demirci vd., 2015; İşkil vd., 2017). Bu yöntemler, özellikle tıbbi ve aromatik bitkilerin korunması ve sürdürülebilir üretimi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, mikroorganizmaların metabolik mühendislik uygulamaları sayesinde, belirli sekonder metabolitlerin daha düşük maliyetle ve yüksek verimle üretilmesi mümkün hale gelmektedir (Gül ve Çelik, 2022).

Mikrobiyal sekonder metabolitler, hem ekosistem dengesi hem de insan sağlığı açısından kritik öneme sahip bileşiklerdir. Bu metabolitlerin üretimi, hem doğal kaynakların korunması hem de biyoteknolojik uygulamalarla artırılması gereken bir alandır. Gelecekte, bu metabolitlerin daha etkin bir şekilde üretimi için yeni tekniklerin geliştirilmesi ve mevcut yöntemlerin optimize edilmesi gerekmektedir (Ülger ve Ayhan, 2020; Vuran ve Türker, 2021).

### **Bitkisel Sekonder Metabolitler**

Bitkisel sekonder metabolitler, bitkilerin çevresel stres faktörlerine karşı savunma mekanizmaları olarak işlev gören, bitki gelişimi ve adaptasyonu için kritik öneme sahip bileşenlerdir. Bu metabolitler, bitkilerin biyotik ve abiyotik stres koşullarına yanıt olarak sentezledikleri kimyasal bileşenlerdir ve genellikle fenolik bileşikler, alkaloidler, terpenoidler ve uçucu yağlar gibi gruplarda sınıflandırılır (Kalkan vd., 2023; , Güler vd., 2021). Bitkisel sekonder metabolitlerin sağlık üzerindeki olumlu etkileri, özellikle antimikrobiyal, antioksidan, antikanser ve anti-inflamatuar özellikleri ile dikkat çekmektedir (Sonbahar vd., 2023; , Demirel ve Süntar, 2017).

Sekonder metabolitlerin tıbbi uygulamaları, bitkisel tedavi yöntemlerinin tarihsel gelişimi ile paralellik göstermektedir. Modern tıbbın ilerlemesiyle birlikte, bitkilerden izole edilen aktif bileşenlerin sayısı artmış ve bu bileşenlerin biyolojik aktiviteleri üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır (Yılmaz vd., 2020; , Güler vd., 2021). Örneğin, *Zingiber officinale* (zencefil) gibi bitkiler, kanser tedavisinde kullanılan önemli sekonder metabolitler içermektedir ve bu bitkilerin içerdiği bileşenlerin kanser hücreleri üzerindeki etkileri araştırılmaktadır (Sonbahar vd., 2023). Ayrıca, fenolik bileşikler, bitkilerin ultraviyole ışıklardan ve patojenlerden korunmasında önemli rol oynamaktadır

ve bu bileşiklerin sağlık üzerindeki etkileri, antioksidan özellikleri ile ilişkilidir (Demir vd., 2017).

Bitkisel sekonder metabolitlerin tarımda ve gıda sektöründe de önemli uygulamaları bulunmaktadır. Bu metabolitler, bitkilerin zararlılara karşı savunma mekanizmalarını güçlendirirken, aynı zamanda besin değerini artırma potansiyeline sahiptir (Özyazıcı, 2023; Korcan vd., 2021). Örneğin, bazı bitkisel ekstraktlar, zararlılar üzerinde inseksit etkisi göstererek tarımsal mücadelede alternatif bir yöntem sunmaktadır (Kasap ve Kök, 2019). Ayrıca, bitkisel kaynaklı sekonder metabolitler, gıda ve kozmetik endüstrilerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz vd., 2021).

Bitkisel sekonder metabolitler, hem sağlık alanında hem de tarım ve gıda sektöründe önemli bir yere sahiptir. Bu metabolitlerin biyolojik aktiviteleri ve potansiyel faydaları, gelecekte daha fazla araştırma ve uygulama alanı bulacaktır. Bitkisel sekonder metabolitlerin keşfi ve kullanımı, hem geleneksel hem de modern tıpta önemli bir kaynak oluşturmaktadır ve bu alandaki çalışmalar, insan sağlığı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahiptir (Kalkan vd., 2023; Güler vd., 2021; Demirel ve Süntar, 2017).

### **Başlıca Bitkisel Sekonder Metabolitler**

Sekonder metabolitlerin sağlık üzerindeki etkileri de oldukça önemlidir. Bu bileşikler, birçok hastalığın tedavisinde kullanılan doğal ilaçların temel bileşenlerini oluşturur. Örneğin, bazı fenolik bileşikler, antioksidan özellikleri sayesinde hücresel hasarı azaltabilir ve kanser gibi hastalıkların önlenmesine yardımcı olabilir (Ülger ve Ayhan, 2020). Ayrıca, bitkisel kaynaklı sekonder metabolitler, besin takviyeleri ve doğal ilaçlar olarak da kullanılmaktadır. Bu nedenle, sekonder metabolitlerin keşfi ve üretimi, hem tarım hem de sağlık alanında büyük bir potansiyele sahiptir (Turker, 2023; Ülger ve Ayhan, 2020).

### **Alkaloidler**

Alkaloidler, önemli farmakolojik özelliklere sahip olduğu gösterilen azot içeren bileşiklerdir. Biyotik streslere karşı bir savunma mekanizması olarak üretilirler ve bitkilerde tahminen 12.000 farklı alkaloid tespit edilmiştir (Kumar vd., 2021). Alkaloidlerin varlığı, antimikrobiyal ve anti-enflamatuar etkiler de dahil olmak üzere bir dizi biyolojik aktivite sergileyebildikleri için birçok bitkinin tıbbi değerine katkıda bulunur (Erb ve Kliebenstein, 2020).

### **Flavonoidler**

Sekonder metabolitlerin bir başka sınıfı olan flavonoidler, bitki savunması ve sinyalizasyonunda önemli roller oynayan öncelikle karbon bazlı bileşiklerdir. Antioksidan özellikleri ve canlı renkleriyle tozlayıcıları çekme yetenekleriyle bilinirler (Haggag, 2022). Karbon besin dengesi hipotezinin önerdiği gibi, azot bazlı ve karbon bazlı sekonder metabolitler arasındaki denge, bitkilerin çevresel koşullara yanıt olarak bu bileşiklerin üretimini düzenlediğini göstermektedir (Han vd., 2022).

### **Terpenoidler**

Uçucu yağlar gibi çok çeşitli bileşikler içeren terpenoidler de önemli sekonder metabolitlerdir. Bitki savunma mekanizmalarında yer alırlar ve herbivorları caydırabilir veya faydalı böcekleri çekebilirler (Maag vd., 2014). Terpenoidlerin biyosentezi genellikle primer metabolitleri öncül olarak kullanan karmaşık yolları içerir ve bu da primer ve sekonder metabolizmanın birbirine bağlı olduğunu gösterir (Erb ve Kliebenstein, 2020).

### **Fenolik Bileşikler**

Sekonder metabolitlerin bir diğer önemli grubu olan fenolik bileşikler, şikimik asit yolu ile sentezlenir ve UV radyasyonuna ve patojen saldırısına karşı koruyucu rolleri ile bilinir (Tomás-Barberán ve Espín, 2001). Bu bileşikler çok çeşitli biyolojik aktiviteler sergiler ve antioksidan özellikleri nedeniyle gıda, ilaç ve kozmetik endüstrilerinde sıklıkla kullanılırlar (Saifullah vd., 2021).

### **Kinonlar**

Kinonlar, genellikle iki veya daha fazla elektron redüksiyonuna uğrayabilen reaktif bileşiklerdir. Bitkilerde, kinonlar genellikle antioksidan özellikleri ile bilinir ve bitkilerin patojenlere karşı savunmasında önemli bir rol oynar (Abdullah vd., 2013). Örneğin, bazı kinonlar, bitkilerin ultraviyole ışınlarına karşı korunmasına yardımcı olurken, diğerleri bitkilerin böcekler ve diğer herbivorlar karşısında savunma mekanizmalarını güçlendirir. Kinonlar, ayrıca bazı bitkisel ürünlerde ve propolis gibi arı ürünlerinde de bulunur ve bu ürünlerin biyolojik aktivitelerine katkıda bulunur (Sağdıç vd., 2020). Bununla birlikte, kinonlar bazı insanlarda kontakt dermatit gibi alerjik reaksiyonlara neden olabilmektedir (Abdullah vd., 2013).

### **Steroidler**

Steroidler, bitkilerde bulunan ve genellikle hormon olarak işlev gören bir grup bileşiktir. Bitkilerdeki steroidler, büyüme ve gelişim süreçlerini düzenleyen önemli hormonlar olan gibberellinler ve auksinler gibi bileşenlerin öncüleridir

(Turp vd., 2018). Steroidler, bitkilerin stres koşullarına yanıt verme yeteneklerini artırarak, çevresel faktörlere karşı dayanıklılıklarını artırır. Ayrıca, steroidler, insan sağlığı üzerinde de önemli etkilere sahiptir; bazı steroid bileşikleri, anti-inflamatuar ve immünomodülatör özelliklere sahip olup, tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır (Aydoğan ve Köseoğlu, 2022).

### **Biyoteknolojik Açıdan Sekonder Metabolitlerin Başlıca Üretim Yolları**

Biyoteknolojik süreçler yoluyla bitki bazlı sekonder metabolitlerin üretimi, ilaç, tarım ve gıda endüstrilerindeki çeşitli uygulamaları nedeniyle büyük ilgi görmüştür. Alkaloidler, flavonoidler, terpenoidler ve fenolikleri içeren sekonder metabolitler, bitki büyümesi için gerekli olmamakla birlikte savunma mekanizmalarında ve ekolojik etkileşimlerde kritik roller oynamaktadır.

Sekonder metabolitlerin üretimi için öne çıkan yöntemlerden biri bitki hücre ve doku kültürlerinin kullanılmasıdır. Bu in vitro sistemler, metabolit üretimini artırmak için belirli büyüme koşullarının optimize edilebildiği kontrollü ortamlara izin verir. Örneğin, jasmonik asit gibi elisitörlerin uygulanmasının *Catharanthus roseus* hücre kültürlerinde terpenoid indol alkaloidlerin üretimini teşvik ettiği gösterilmiştir (Saiman vd., 2018). Ayrıca, genetik olarak dönüştürülmüş kökler olan tüylü kök kültürlerinin kullanımının, hızlı büyümeleri ve genetik kararlılıkları nedeniyle yüksek verimlerde sekonder metabolitlerin üretilmesinde etkili olduğu kanıtlanmıştır (Mehrotra vd., 2015).

Genetik mühendisliği de sekonder metabolitlerin biyoteknolojik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmacılar, metabolik yollarda yer alan belirli genleri manipüle ederek, istenen bileşiklerin biyosentezini artırabilirler. Örneğin, *Synechocystis* sp. genetik modifikasyonunun, fenilpropanoid biyosentezi için çok önemli olan bitki hidroksilazlarını ifade ederek fenolik bir bileşik olan p-kumarik asidin sürdürülebilir üretimini sağladığı bildirilmiştir (Xue vd., 2014). Bu yaklaşım sadece sekonder metabolitlerin verimini artırmakla kalmaz, aynı zamanda doğal kaynakların aşırı tüketilmesine yol açabilecek geleneksel tarım uygulamalarına olan bağımlılığı da azaltır (Mohaddab vd., 2022).

Endofitik mantarlar ve bakteriler, sekonder metabolit üretimi için umut verici bir başka yoldur. Bitki dokularında zarar vermeden yaşayan bu mikroorganizmalar çeşitli biyoaktif bileşikler üretebilir. Üretilen metabolitlerin türü ve miktarı, konukçu bitkiye, çevresel koşullara ve endofitlerin genetik geçmişine bağlı olarak değişebilir (Nwachukwu vd., 2018). Örneğin, çalışmalar *Lantana camara*'dan izole edilen endofitik mantarların tanen ve kardiyak glikozitler üretebildiğini göstererek biyoaktif metabolit kaynakları olarak potansiyellerini vurgulamıştır (Desire vd., 2014). Metabolit üretimi için

endofitlerin kullanılması, konakçı bitkilerin kapsamlı bir şekilde hasat edilmesine gerek kalmadan yetiştirilebildikleri için sürdürülebilir uygulamalara yol açabilir (Kumala vd., 2017).

Ayrıca, kök salgılarının rizosfer mikrobiyotasını şekillendirmedeki rolü, sekonder metabolit üretimini etkileyen önemli bir faktör olarak kabul edilmiştir. Bitkiler, topraktaki mikrobiyal topluluğu değiştirebilen biyoaktif moleküller salgılamakta ve böylece sonraki bitki nesillerinin büyüme ve savunma mekanizmalarını etkilemektedir (Hu vd., 2018). Bu etkileşim, sekonder metabolit üretimini artırmada bitki-mikrop ilişkilerini anlamının önemini vurgulamaktadır.

Bu yöntemlere ek olarak, nanoteknolojideki gelişmeler sekonder metabolit üretimini teşvik etmek için yeni yaklaşımlar ortaya koymuştur. Nanopartiküller, bitkilerde stres tepkilerini arttırmak için elisitörler olarak araştırılmış ve potansiyel olarak değerli metabolitlerin veriminin artmasına yol açmıştır (Zaka ve Abbasi, 2016). Nanoteknolojinin geleneksel biyoteknolojik yöntemlerle entegrasyonu daha verimli üretim sistemlerinin önünü açabilir.

### **Bitki Hücre ve Doku Kültürü Yoluyla Sekonder Metabolit Üretimi**

Bitki hücre ve doku kültürü yoluyla sekonder metabolitlerin üretimi, bu değerli bileşikler elde etmek için sürdürülebilir ve kontrollü bir yol sağlama potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Alkaloidler, flavonoidler, terpenoidler ve fenolikler içeren sekonder metabolitler, bitki savunmasında önemli rol oynar ve ilaç, kozmetik ve gıda endüstrilerinde çok sayıda uygulamaya sahiptir. İn vitro kültür tekniklerinin kullanımı, metabolit üretimini optimize etmek için çevresel koşulların manipüle edilmesine olanak tanır ve böylece geleneksel yetiştirme yöntemleriyle ilişkili sınırlamaların üstesinden gelir.

Bitki hücre ve doku kültürünün başlıca avantajlarından biri, sekonder metabolit üretimini önemli ölçüde etkileyebilen büyüme ortamını kontrol etme yeteneğidir. Örneğin, bitki büyüme düzenleyicileri ve karbon kaynakları gibi kültür ortamı bileşenlerinin manipülasyonu, belirli metabolitlerin birikimini artırabilir. Çalışmalar, oksinlerin ve diğer büyüme faktörlerinin konsantrasyonunun sekonder metabolitlerin biyosentez yollarını doğrudan etkileyebileceğini ve hücre süspansiyon kültürlerinde verimin artmasına yol açabileceğini göstermiştir (Ionkova vd., 2022; Nasim vd., 2010). Ayrıca, ağır metaller ve UV ışığı gibi abiyotik elisitörlerin, bu bileşiklerle ilişkili metabolik yolları geliştirebilen stres tepkilerini indükleyerek kültürlenmiş hücrelerde sekonder metabolitlerin üretimini uyardığı bildirilmiştir (Ch vd., 2011; Naik ve Al-Khayri, 2016).

Avantajlarına rağmen, sekonder metabolit üretimi için bitki hücre kültürünün ticari olarak uygulanabilirliği bir zorluk olmaya devam etmektedir. Mevcut üretim sistemleri, in vitro olarak başarıyla üretilen paklitaksel ve artemisinin gibi birkaç bileşikle sınırlıdır (Wawrosch ve Zotchev, 2021; Yue vd., 2014; Wilson ve Roberts, 2011). Üretimin ölçeklendirilmesinin ekonomik fizibilitesi ve biyoteknolojik ürünlerle ilgili düzenleyici engeller, ele alınması gereken kritik faktörlerdir. Belirli metabolitlere yönelik piyasa talebi dalgalanabilir ve bu da in vitro üretim sistemlerinin kârlılığını etkileyebilir (Wawrosch ve Zotchev, 2021; Eibl vd., 2018). Ayrıca, genetik ve çevresel faktörler nedeniyle metabolit üretimindeki doğal değişkenlik, standardizasyon ve verimde tutarlılık için ek zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Nomura vd., 2021; Abbaspour vd., 2019).

Metabolik mühendislik ve sentetik biyolojideki son gelişmeler, bitki hücre kültürlerinde sekonder metabolit üretimini artırmak için yeni yollar açmıştır. Öncül besleme, hücre hattı seçimi ve biyoreaktör optimizasyonu gibi teknikler, istenen bileşiklerin verimini artırma konusunda umut vaat etmektedir (Mohaddab vd., 2022; Shakya vd., 2017; Gupta ve Jain, 2022). Ayrıca, elisasyon stratejilerinin bitki doku kültürü ile entegrasyonu, biyosentetik yolları geliştiren stres tepkilerini tetikleyerek metabolit üretimini artırmak için güçlü bir yaklaşım olarak vurgulanmıştır (Naik ve Al-Khayri, 2016; Hussain vd., 2012).

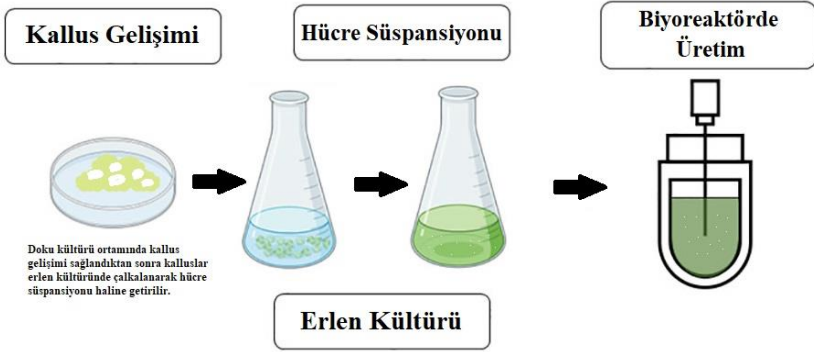
### **Bitkisel Sekonder Metabolit Üretiminde Biyoreaktörlerin Kullanımı**

Doku kültürü çalışmalarıyla elde edilen bitki kalluslarının süspanse hale getirilmesiyle sekonder metabolit üretimi amaçlanarak biyoreaktörlerde biyoteknolojik üretimler sağlanabilmektedir (Şekil 1). Biyoreaktörleri kullanmanın başlıca avantajlarından biri, sekonder metabolit üretimini en üst düzeye çıkarmak için kritik olan havalandırma ve çalkalama gibi büyüme koşullarını optimize etme yeteneğidir. Örneğin, çalışmalar havalandırma hacminin biyoreaktör kültürlerinde hem hücre büyümesini hem de metabolit birikimini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Ahmed ve arkadaşları, artan havalandırma oksijen transferini artırabilirken, aşırı havalandırmanın *Morinda citrifolia* kültürlerinde metabolit birikimini olumsuz etkileyebileceğini bulmuştur (Ahmed vd., 2008). Benzer şekilde, çalkalamanın neden olduğu hidrodinamik stres, metabolit üretimi için gerekli olan hücre morfolojisini ve biyosentetik yolları etkileyebilir (Vazquez-Marquez vd., 2019). Bu durum, optimum sonuçlar elde etmek için bu parametrelerin dikkatlice dengelenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca, biyoreaktörlerin tasarımı, metabolit üretiminin verimliliğinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Karıştırmalı tank, perfüzyon ve dalga karışım



sistemler de dahil olmak üzere çeşitli biyoreaktör tipleri, bitki hücre kültürlerinin özel ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmiştir. Örneğin, Eibl ve Eibl, biyoreaktörlerin, geleneksel yetiştirme yöntemlerinde genellikle bir zorluk olan ürün verimi ve kalitesindeki varyasyonları en aza indiren kontrollü bir ortam sağladığını vurgulamıştır (Eibl ve Eibl, 2007). Ayrıca, immobilize hücre sistemlerinin kullanımının kültürlerin stabilitesini ve uzun ömürlülüğünü artırdığı ve böylece genel verimliliği artırdığı gösterilmiştir (Mamun vd., 2015).



**Şekil 1.** Bitki doku ve hücre kültürü yöntemiyle elde edilen kallusların hücre süspansiyonu haline getirildikten sonra biyoreaktörlerde sekonder metabolit üretimi (Şeklin bir kısmı Verdú-Navarro vd., 2023'ten alınmış ve üzerinde değişiklikler yapılmıştır).

Shake-flask kültürlerinden biyoreaktörlere geçiş bazen hücre fizyolojisindeki değişiklikler nedeniyle metabolit üretiminin azalmasına yol açabilir. Kochan ve arkadaşları, ginseng süspansiyon kültürlerinin çalkalamalı şişelerden karıştırmalı tank biyoreaktörlerine aktarılmasının daha düşük ginsenosit içeriğiyle sonuçlandığını bildirerek, yetiştirme ortamının sekonder metabolit biyosentezini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Kochan vd., 2018). Bu durum, üretimi ölçeklendirirken kültür koşullarının kapsamlı bir şekilde optimize edilmesi gerekliliğinin altını çizmektedir.

Ayrıca, biyoreaktör sistemlerinde elisitasyon tekniklerinin uygulanması, sekonder metabolit üretimini artırmak için bir strateji olarak araştırılmıştır. Elisitörler bitki savunma mekanizmalarını uyararak istenen bileşiklerin biyosentezinin artmasına yol açabilir. Örneğin, Klvana ve arkadaşları *Eschscholzia californica* kültürlerinde alkaloid üretimini iyileştirmek için in situ ekstraksiyon stratejilerinin nasıl optimize edilebileceğini tartışarak, elisitasyonu biyoproses teknikleriyle birleştirme potansiyelini göstermiştir (Klvana vd., 2005).

Biyoreaktör teknolojisinin bitki hücre kültürü sistemlerine entegrasyonu, sekonder metabolitlerin sürdürülebilir üretimi için umut verici bir yol sunmaktadır. Büyüme koşullarını optimize ederek, uygun biyoreaktör tasarımlarını seçerek ve ortaya çıkarma stratejilerini kullanarak, araştırmacılar bu değerli bileşiklerin verimini ve kalitesini önemli ölçüde artırabilirler. Biyoproses optimizasyonu ve genetik manipülasyonda devam eden ilerlemeler, sekonder metabolit kaynağı olarak bitki hücre kültürlerinin ticari uygulanabilirliğini daha da artıracaktır.

### **Sekonder Metabolitlerin Endüstriyel ve Ekonomik Önemi**

Sekonder metabolitler için birincil pazarlardan biri ilaç endüstrisidir. Birçok ilaç, bitki sekonder metabolitlerinden elde edilir; bunların en önemli örneği, tedavi edici özellikleriyle bilinen alkaloidlerdir. Örneğin, Madagaskar deniz salyangozundan elde edilen vinkristin ve vinblastin, kanser tedavisinde esastır (Atanasov vd., 2015). Tıpta doğal ürünlere yönelik artan talep, sentetik alternatiflere kıyasla genellikle daha az yan etki gösterdikleri için bitki kaynaklı bileşiklerin araştırılmasında bir canlanmaya yol açmıştır (Mickymaray, 2019). Dahası, bitki hücre kültürlerindeki gelişmeler bu metabolitlerin sürdürülebilir üretimini mümkün kılmış, böylece kullanılabilirliklerini artırmış ve yabancı hasada olan bağımlılığı azaltmıştır (Yue vd., 2014).

Tarım sektörü de özellikle biyopestisitlerin ve biyoherbisitlerin geliştirilmesinde sekonder metabolitlerden faydalanmaktadır. Flavonoidler ve terpenoidler gibi bileşiklerin antimikrobiyal ve antifungal özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir, bu da onları sürdürülebilir tarımda kullanım için uygun hale getirmektedir (Fu vd., 2021). Biyopestisit pazarının, organik tarım uygulamalarına yönelik artan talep ve kimyasal pestisit kullanımını azaltma ihtiyacı nedeniyle önemli ölçüde büyüyeceği öngörülmektedir (Nadir, 2022). Ayrıca, sekonder metabolitler bitkilerin biyotik ve abiyotik streslere karşı direncini artırarak mahsul verimini ve kalitesini iyileştirebilir (Luo, 2023).

Gıda endüstrisinde, sekonder metabolitler lezzet, renk ve besin değerine katkıda bulunur. Örneğin, bir flavonoid türü olan antosiyaninler, meyve ve sebzelerdeki kırmızı, mavi ve mor renklerden sorumludur ve antioksidan özellikler de dahil olmak üzere çok sayıda sağlık yararı ile ilişkilidir (Roy vd., 2022). Tüketiciler sentetik katkı maddeleri içermeyen ürünleri giderek daha fazla tercih ettiğinden, doğal gıda renklendiricileri ve koruyucularına olan talep artmaktadır (Hussain vd., 2012). Bu eğilim, yapay maddelere alternatif olarak sekonder metabolitler bakımından zengin bitki özlerinin araştırılmasına yol açmıştır.

Ayrıca, kozmetik endüstrisi sekonder metabolitlerin antioksidan, anti-enflamatuar ve antimikrobiyal özelliklerinin potansiyelinin farkına varmıştır. Bu bileşikler içeren bitki özleri, cilt sağlığını ve görünümünü iyileştirmek için cilt bakım ürünlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Twajj ve Hasan, 2022). Doğal kozmetik pazarı, hem etkili hem de çevre dostu ürünlere yönelik tüketici tercihleri nedeniyle hızla genişlemektedir (Alhady vd., 2020).

Sekonder metabolitlerin ekonomik etkileri, doğrudan uygulamalarının ötesine uzanmaktadır. Bu bileşikler için bitkilerin yetiştirilmesi ve işlenmesi, özellikle geleneksel tıbbi bitkilerin hasat edildiği bölgelerde iş fırsatları yaratabilir ve yerel ekonomileri canlandırabilir (Bansal ve Bharati, 2015). Ayrıca, genetik mühendisliği ve metabolik mühendislik gibi biyoteknolojik yaklaşımların entegrasyonu, sekonder metabolit üretiminin verimini ve etkinliğini artırarak ekonomik uygulanabilirliklerini daha da artırma konusunda umut vaat etmektedir (Marchev vd., 2020).

## **Sonuç**

Bitkisel sekonder metabolitler, tıbbi, gıda ve kozmetik endüstrileri gibi pek çok sektörde büyük öneme sahiptir. Bu metabolitlerin biyoteknolojik üretimi, geleneksel yöntemlere göre daha sürdürülebilir ve verimli bir alternatif sunmaktadır. Özellikle hücre kültürü, genetik mühendislik ve biyoreaktör teknolojileri gibi modern biyoteknolojik yaklaşımlar, sekonder metabolitlerin üretim verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır.

Biyoreaktörlerde bitki hücre kültürleri yoluyla sekonder metabolitlerin üretimi, değerli bileşiklerin sürdürülebilir ve büyük ölçekli üretim potansiyeli nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bitki bazlı sekonder metabolitlerin ekonomik değeri çok yönlüdür ve farmasötik, tarım, gıda ve kozmetik alanlarındaki rollerini kapsar. Doğal ve sürdürülebilir ürünlere olan talep artmaya devam ettikçe, bu bileşiklerin araştırılması ve ticarileştirilmesi muhtemelen genişleyecek, yenilik ve ekonomik büyüme için önemli fırsatlar sunacaktır. Alkaloidler, flavonoidler ve terpenoidler gibi çok çeşitli biyoaktif bileşikler içeren sekonder metabolitler, ilaç, kozmetik ve gıda endüstrilerindeki çeşitli uygulamalar için çok önemlidir. Bitki hücre kültürleri için biyoreaktörlerin kullanılması, geleneksel yetiştirme yöntemlerine kıyasla bu metabolitlerin verimini ve kalitesini artıracak kontrollü bir ortam sunar. Günümüzde, bitkisel kaynaklardan elde edilen sekonder metabolitlerin üretimi, çevresel ve ekonomik nedenlerle daha fazla biyoteknolojik yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, metabolik mühendislik tekniklerinin, hedeflenen metabolitlerin üretiminde etkin bir araç olarak kullanılabileceği ve

böylece daha verimli ve sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilebileceği öngörülmektedir.

Özellikle, bitkilerde bulunan aktif bileşiklerin biyoteknolojik üretim süreçleri, daha düşük maliyetli, daha yüksek saflıkta ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Ancak, bu alandaki başarıların önündeki en büyük engel, metabolitlerin biyosentez yollarının karmaşıklığı ve bu yolların endüstriyel koşullarda optimize edilmesinin zorluklarıdır. Bu sorunların aşılabilmesi için daha fazla temel araştırma ve biyoteknolojik yenilikler gerekmektedir.

Bitki hücre ve doku kültürü sekonder metabolitlerin sürdürülebilir üretimi için umut verici bir alternatif sunarken, bazı zorluklar devam etmektedir. Bitkisel sekonder metabolitlerin biyoteknolojik üretimi, hem bilimsel hem de ticari açıdan büyük bir potansiyele sahiptir. Bu alandaki ilerlemeler, yalnızca endüstriyel üretim süreçlerini dönüştürmekle kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınma hedeflerine de önemli katkılarda bulunabilir. Gelecekte, biyoteknolojik üretim süreçlerinin daha da optimum hale gelmesi, daha geniş bir metabolit yelpazesinde verimli üretimi mümkün kılacaktır. Bu nedenle, biyoteknolojik üretim alanındaki araştırmaların hızla ilerlemesi ve çeşitli sektörlerdeki uygulama potansiyelinin keşfedilmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, bitki bazlı sekonder metabolitlerin üretimine yönelik biyoteknolojik süreçler çeşitlilik arz etmekte ve sürekli olarak gelişmektedir. Bitki hücre ve doku kültürleri, genetik mühendisliği, endofitik mikroorganizmalar ve nanoteknoloji gibi yenilikçi teknolojilerin uygulanması yoluyla araştırmacılar bu değerli bileşiklerin potansiyelini ortaya çıkarmaktadır. Bu yaklaşımlar sadece sekonder metabolitlerin sürdürülebilir üretimini desteklemekle kalmıyor, aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına ve yeni terapötik ajanların geliştirilmesine de katkıda bulunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abbaspour, J., Ehsanpour, A., Aghaei, M., ve Ghanadian, M. (2019). Sesquiterpene lactones from shoot culture of *artemisia aucheri* with cytotoxicity against prostate and breast cancer cells. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 14(4), 329. <https://doi.org/10.4103/1735-5362.263557>
- Abdullah, I., Erdoğan, M., Güder, H., Karaboga, T., ve Tayfur, İ. (2013). Contact dermatitis due to *machaerium scleroxylon*: case series. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, 13(3), 148-151. <https://doi.org/10.5505/1304.7361.2013.26928>
- Ahmed, S., Hahn, E., ve Paek, K. (2008). Aeration volume and photosynthetic photon flux affect cell growth and secondary metabolite contents in bioreactor cultures of *morinda citrifolia*. *Journal of Plant Biology*, 51(3), 209-212. <https://doi.org/10.1007/bf03030700>
- Alhady, M., El-Fadl, R., Hegazi, G., ve Desoukey, S. (2020). In vitro production of some secondary metabolites from *cupressus sempervirens*. *Journal of Advanced Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 0(0), 0-0. <https://doi.org/10.21608/jabps.2020.24700.1074>
- Alhassan, A., Abdullahi, M., Uba, A., ve Umar, A. (2014). Prenylation of aromatic secondary metabolites: a new frontier for development of novel drugs. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 13(2), 307. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v13i2.22>
- Atanasov, A., Waltenberger, B., Pferschy-Wenzig, E., Linder, T., Wawrosch, C., Uhrin, P., ... ve Stuppner, H. (2015). Discovery and resupply of pharmacologically active plant-derived natural products: a review. *Biotechnology Advances*, 33(8), 1582-1614. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.08.001>
- Aydoğan, M. and Köseoğlu, S. (2022). Use of propolis as a functional support in insulin resistance treatment. *Haliç Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 5(2), 41-47. <https://doi.org/10.48124/husagbilder.921851>
- Bansal, Y. and Bharati, A. (2015). Selective protocols for in vitro propagation and secondary metabolite production., 429-447. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19288-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19288-8_18)
- Ch, B., Rao, K., Gandhi, S., ve Giri, A. (2011). Abiotic elicitation of gymnemic acid in the suspension cultures of *gymnema sylvestre*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(2), 741-747. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0870-8>

- Çalışkan, T., Hatipoğlu, R., ve Kirici, S. (2019). Sekonder bitki metabolitlerinin in vitro koşullarda üretimi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(7), 971-980. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i7.971-980.2447>
- Çiğnitaş, E. (2023). Pyrrolizidine alkaloidleri içeren yabancı otlar ve etkileri. *International Conference on Scientific and Innovative Studies*, 1(1), 99-105. <https://doi.org/10.59287/icsis.585>
- Demir, F., Aliyazıcıoğlu, Y., ve Demir, S. (2017). Asidifikasyon işleminin laurocerasus officinalis ekstraktlarının antioksidan özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 365-373. <https://doi.org/10.31202/ecjse.307478>
- Demirci, T., Özdamar, P., ve Baydar, N. (2015). Tıbbi ve aromatik bitkiler ile sebzelere kök kaynaklı sekonder metabolitlerin üretiminin artırılmasına yönelik in vitro uygulamalar. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 3(5), 261. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v3i5.261-270.254>
- Demirel, M. and Süntar, I. (2017). The role of secondary metabolites on gynecologic cancer therapy: some pathways and mechanisms. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 14(3), 324-334. <https://doi.org/10.4274/tjps.49368>
- Desire, M., Bernard, F., Forsah, M., Assang, C., ve Denis, O. (2014). Enzymes and qualitative phytochemical screening of endophytic fungi isolated from *lantana camara* linn. leaves. *Journal of Applied Biology ve Biotechnology*. <https://doi.org/10.7324/jabb.2014.2601>
- Eibl, R. and Eibl, D. (2007). Design of bioreactors suitable for plant cell and tissue cultures. *Phytochemistry Reviews*, 7(3), 593-598. <https://doi.org/10.1007/s11101-007-9083-z>
- Eibl, R., Meier, P., Stutz, I., Schildberger, D., Hühn, T., ve Eibl, D. (2018). Plant cell culture technology in the cosmetics and food industries: current state and future trends. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(20), 8661-8675. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9279-8>
- Erb, M. and Kliebenstein, D. (2020). Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: the blurred functional trichotomy. *Plant Physiology*, 184(1), 39-52. <https://doi.org/10.1104/pp.20.00433>
- Fu, X., Zhang, F., Ma, Y., Hassani, D., Peng, B., Pan, Q., ... ve Tang, K. (2021). High-level patchoulol biosynthesis in *artemisia annua* l. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.621127>

- Gupta, R. and Jain, D. (2022). Transforming plant secondary metabolite production through the application of ptc and elicitor technology. *Journal of Advanced Scientific Research*, 13(01), 75-86. <https://doi.org/10.55218/jasr.202213107>
- Gül, E. and Çelik, V. (2022). Biyofarmasötik keşif, geliştirme ve üretimin güncel paradigması olarak mikroorganizmaların metabolik mühendisliği: sentetik biyolojinin katkıları. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 427-458. <https://doi.org/10.55007/dufed.1187305>
- Güler, B., Bayraktar, M., ve Gürel, A. (2021). Covid-19 ile mücadelede bitkilerin rolü. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.912506>
- Güven, A. and Gürsul, I. (2014). Secondary metabolite synthesis in plant tissue cultures. *Gıda / the Journal of Food*, 1-8. <https://doi.org/10.15237/gida.gd13060>
- Haggag, M. (2022). Phytochemical profile for *Cestrum nocturnum* leaves ethanolic extract and isolation of a rare flavonoid using different chromatographic and spectroscopic techniques. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 10(2), 143-150. <https://doi.org/10.22271/plants.2022.v10.i2b.1403>
- Han, D., Wang, K., Long, F., Zhang, W., Xiang, Y., ve Chen, S. (2022). Effects of endophytic fungi on the secondary metabolites of *Hordeum bogdanii* under alkaline stress. *Amb Express*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-022-01414-w>
- Hu, L., Robert, C., Cadot, S., Zhang, X., Ye, M., Li, B., ... ve Erb, M. (2018). Root exudate metabolites drive plant-soil feedbacks on growth and defense by shaping the rhizosphere microbiota. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05122-7>
- Hussain, M., Fareed, S., Ansari, S., Rahman, A., Ahmad, I., ve Saeed, M. (2012). Current approaches toward production of secondary plant metabolites. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.92725>
- Ionkova, I., Shkondrov, A., Zarev, Y., Kozuharova, E., ve Krasteva, I. (2022). Anticancer secondary metabolites: from ethnopharmacology and identification in native complexes to biotechnological studies in species of genus *Astragalus* L. and *gloriosa* L. *Current Issues in Molecular Biology*, 44(9), 3884-3904. <https://doi.org/10.3390/cimb44090267>
- İşkil, R., Bürün, B., ve Acar, Y. (2017). Biotechnological studies in saffron (*Crocus sativus* L.) plant. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(2), 343-352. <https://doi.org/10.21597/jist.2017.155>

- Jie, H. (2023). Molecular mechanisms regulating phenylpropanoid metabolism in exogenously-sprayed ethylene forage ramie based on transcriptomic and metabolomic analyses. *Plants*, 12(22), 3899. <https://doi.org/10.3390/plants12223899>
- Kalkan, M., Aygan, A., Çömlekciöglü, N., ve Comlekcioglu, U. (2023). *Olea europaea* yapraklarının bazı biyoaktif özelliklerinin araştırılması, antimikrobiyal ve enzim inhibisyon etkinliğinin incelenmesi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 11(3), 496-504. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v11i3.496-504.5828>
- Kang, D., Shoaie, S., Jacquiod, S., Sørensen, S., ve Ledesma-Amaro, R. (2021). Comparative genomics analysis of keratin-degrading chryseobacterium species reveals their keratinolytic potential for secondary metabolite production. *Microorganisms*, 9(5), 1042. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051042>
- Kasap, İ. and Kök, Ş. (2019). Bazı bitki ekstraktlarının iki noktalı kırmızıörümcek, *tetranychus urticae* koch üzerine insektisit etkisinin belirlenmesi. *Çömü Ziraat Fakültesi Dergisi*, 7(1), 137-144. <https://doi.org/10.33202/comuagri.547474>
- Katar, N., Katar, D., ve Yildiz, E. (2021). Farklı kurutma sürelerinin zufa/çördük otu (*hyssopus officinalis* L.) bitkisinin verim ve uçucu yağ oranı üzerine etkisinin belirlenmesi. *Biological Diversity and Conservation*, 14(1), 28-34. <https://doi.org/10.46309/biodicon.2021.743654>
- Klvana, M., Legros, R., ve Jolicoeur, M. (2005). In situ extraction strategy affects benzophenanthridine alkaloid production fluxes in suspension cultures of *ofeschscholtzia californica*. *Biotechnology and Bioengineering*, 89(3), 280-289. <https://doi.org/10.1002/bit.20306>
- Kochan, E., Caban, S., Szymańska, G., Szymczyk, P., Lipert, A., Kwiatkowski, P., ... ve Sienkiewicz, M. (2018). Ginsenoside content in suspension cultures of *panax quinquefolium* L. cultivated in shake flasks and stirred-tank bioreactor. *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska Sectio C – Biologia*, 72(1), 15. <https://doi.org/10.17951/c.2017.72.1.15-26>
- Korcan, S., Kayhan, R., Ünal, A., ve Jahan, I. (2021). İç batı anadoludan toplanan üç ahlut türlerinin antimikrobiyal etkilerinin belirlenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.761813>
- Kumala, S., Aprilia, N., ve Simanjuntak, P. (2017). Identification and characterization of potent antimicrobial secondary metabolite generated from endophytic fungi isolated from jamblang plant (*eugenia*



- cumini l). *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 10(4), 283. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2017.v10i4.16725>
- Kumar, A., Malik, A., ve Singh, B. (2021). Recent advances in the analysis of plant alkaloids by capillary electrophoresis and micellar electrokinetic chromatography. *Separation Science Plus*, 4(11-12), 401-412. <https://doi.org/10.1002/sscp.202100040>
- Luo, C. (2023). Jasmonates coordinate secondary with primary metabolism. *Metabolites*, 13(9), 1008. <https://doi.org/10.3390/metabo13091008>
- Maag, D., Erb, M., Köllner, T., ve Gershenzon, J. (2014). Defensive weapons and defense signals in plants: some metabolites serve both roles. *Bioessays*, 37(2), 167-174. <https://doi.org/10.1002/bies.201400124>
- Mamun, N., Egertsdotter, U., ve Aidun, C. (2015). Bioreactor technology for clonal propagation of plants and metabolite production. *Frontiers in Biology*, 10(2), 177-193. <https://doi.org/10.1007/s11515-015-1355-1>
- Marchev, A., Yordanova, Z., ve Georgiev, M. (2020). Green (cell) factories for advanced production of plant secondary metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(4), 443-458. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1731414>
- Mehrotra, S., Srivastava, V., Rahman, L., ve Kukreja, A. (2015). Hairy root biotechnology—indicative timeline to understand missing links and future outlook. *Protoplasma*, 252(5), 1189-1201. <https://doi.org/10.1007/s00709-015-0761-1>
- Mickymaray, S. (2019). Efficacy and mechanism of traditional medicinal plants and bioactive compounds against clinically important pathogens. *Antibiotics*, 8(4), 257. <https://doi.org/10.3390/antibiotics8040257>
- Mohaddab, M., Goumi, Y., Gallo, M., Montesano, D., Zengin, G., Bouyahya, A., ... ve Fakiri, M. (2022). Biotechnology and in vitro culture as an alternative system for secondary metabolite production. *Molecules*, 27(22), 8093. <https://doi.org/10.3390/molecules27228093>
- Nadir, D. (2022). *Aspergillus niger* biotic elicitors of secondary pharmaceutical metabolites in medicinal plants (in vitro): a review. *Plant Archives*, 308-319. <https://doi.org/10.51470/plantarchives.2022.v22.no1.049>
- Naik, P. and Al-Khayri, J. (2016). Abiotic and biotic elicitors—role in secondary metabolites production through in vitro culture of medicinal plants.. <https://doi.org/10.5772/61442>
- Nasim, S., Aslam, J., Kapoor, R., ve Khan, S. (2010). Secondary metabolites production through biotechnological intervention: a review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 22(3), 147. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v22i3.4886>

- Nomura, T., Yoneda, A., Ogita, S., ve Kato, Y. (2021). Activation of cryptic secondary metabolite biosynthesis in bamboo suspension cells by a histone deacetylase inhibitor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193(11), 3496-3511. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03629-2>
- Nwachukwu, C., Ngwoke, K., Eze, P., Eboka, C., ve Okoye, F. (2018). Secondary metabolites from *curvularia* sp, an endophytic fungus isolated from the leaves of *picralima nitida* durand and hook (apocynaceae). *TJNPR*, 2(5), 209-213. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v2i5.2>
- Ok, F. and Şanlı, A. (2022). Patates glykoalkaloidleri: özellikleri ve biyolojik aktiviteleri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 53(1), 88-96. <https://doi.org/10.17097/ataunizfd.972400>
- Onat, K., Sezer, M., ve Çöl, B. (2021). Fenolik bileşiklerden sinnamik asit, kafeik asit ve p-kumarik asit'in bazı biyolojik aktiviteleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(4), 2587-2598. <https://doi.org/10.21597/jist.885898>
- Özkale, E. (2017). Tarımsal üretimde yararlanılan trichoderma ürünleri ve metabolitleri. *International Journal of Secondary Metabolite*, 133-133. <https://doi.org/10.21448/ijsm.265981>
- Özyazıcı, M. (2023). Effects of secondary metabolites on pollination in legume forage crops. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 60(3), 539-552. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.1338227>
- Roy, A., Khan, A., Ahmad, I., Alghamdi, S., Rajab, B., Babalghith, A., ... ve Islam, M. (2022). Flavonoids a bioactive compound from medicinal plants and its therapeutic applications. *Biomed Research International*, 2022, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2022/5445291>
- Sağdıç, O., Karasu, S., ve Göktaş, H. (2020). Piyasada satılan ticari propolis örneklerinin biyoaktif bileşenlerinin belirlenmesi. *European Journal of Science and Technology*, 19-31. <https://doi.org/10.31590/ejosat.734204>
- Saifullah, M., McCullum, R., McCluskey, A., ve Vuong, Q. (2021). Effect of drying techniques and operating conditions on the retention of color, phenolics, and antioxidant properties in dried lemon scented tea tree (*leptospermum petersonii*) leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15257>
- Saiman, M., Miettinen, K., Mustafa, N., Choi, Y., Verpoorte, R., ve Schulte, A. (2018). Metabolic alteration of *catharanthus roseus* cell suspension cultures overexpressing geraniol synthase in the plastids or cytosol. *Plant Cell Tissue and Organ Culture (Pctoc)*, 134(1), 41-53. <https://doi.org/10.1007/s11240-018-1398-5>

- Shakya, P., Marslin, G., Karthik, S., Beerhues, L., ve Franklin, G. (2017). Elicitation as a tool to improve the profiles of high-value secondary metabolites and pharmacological properties of hypericum perforatum. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 71(1), 70-82. <https://doi.org/10.1111/jphp.12743>
- Sonbahar, Y., Özüpek, B., ve Orhan, D. (2023). Zingiber officinale roscoe and cancer. *Acad. J. Homeopat. ve Integ. Med.*, 1(1), 20-27. <https://doi.org/10.56054/ajohoim.2022-91043>
- Su, J., Wang, Y., Bai, M., Peng, T., Li, H., Xu, H., ... ve Wu, H. (2023). Soil conditions and the plant microbiome boost the accumulation of monoterpenes in the fruit of citrus reticulata ‘chachi’. *Microbiome*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01504-2>
- Sun, L., Wang, J., Cui, Y., Cui, R., Kang, R., Zhang, Y., ... ve Ye, W. (2023). Changes in terpene biosynthesis and submergence tolerance in cotton. *BMC Plant Biology*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04334-4>
- Tomás-Barberán, F. and Espín, J. (2001). Phenolic compounds and related enzymes as determinants of quality in fruits and vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 853-876. <https://doi.org/10.1002/jsfa.885>
- Turker, A. (2023). A comparison of essential oil components of plants and calli grown in vivo and in vitro conditions of bible hyssop (*origanum syriacum* l. var. *bevanii* (holmes) ietswaart). *Turkish Journal of Forestry*, 45-55. <https://doi.org/10.18182/tjf.1281648>
- Turp, G., Kalyoncu, S., ve Sengun, I. (2018). Köfte üretiminde kullanılan bitkisel katkıların üründe oksidasyon gelişimi, mikrobiyolojik ve duyuşsal özellikler ile heterosiklik amin (hca) oluşumu üzerine etkileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 28(4), 507-517. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.465506>
- Twajj, B. and Hasan, N. (2022). Bioactive secondary metabolites from plant sources: types, synthesis, and their therapeutic uses. *International Journal of Plant Biology*, 13(1), 4-14. <https://doi.org/10.3390/ijpb13010003>
- Ülger, T. and Ayhan, N. (2020). Bitki sekonder metabolitlerinin sağlık üzerine fonksiyonel etkileri. *Acibadem Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 3, 384-390. <https://doi.org/10.31067/0.2020.288>
- Vazquez-Marquez, A., Zepeda-Gómez, C., Burrola-Aguilar, C., Bernabé-Antonio, A., Nieto-Trujillo, A., Cruz-Sosa, F., ... ve Estrada-Zúñiga, M. (2019). Effect of stirring speed on the production of phenolic secondary metabolites and growth of buddleja cordata cells cultured in mechanically

- agitated bioreactor. *Plant Cell Tissue and Organ Culture (Pctoc)*, 139(1), 155-166. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01673-9>
- Verdú-Navarro F, Moreno-Cid JA, Weiss J ve Egea-Cortines M (2023.) The advent of plant cells in bioreactors. *Front. Plant Sci.* 14:1310405. doi: 10.3389/fpls.2023.1310405
- Vuran, N. and Türker, M. (2021). Applications for improving secondary metabolite production in plant tissue cultures. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(3), 487-498. <https://doi.org/10.7240/jeps.900129>
- Wang, W., Li, Y., Dang, P., Zhao, S., Lai, D., ve Zhou, L. (2018). Rice secondary metabolites: structures, roles, biosynthesis, and metabolic regulation. *Molecules*, 23(12), 3098. <https://doi.org/10.3390/molecules23123098>
- Wawrosch, C. and Zotchev, S. (2021). Production of bioactive plant secondary metabolites through in vitro technologies—status and outlook. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(18), 6649-6668. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11539-w>
- Wilson, S. and Roberts, S. (2011). Recent advances towards development and commercialization of plant cell culture processes for the synthesis of biomolecules. *Plant Biotechnology Journal*, 10(3), 249-268. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2011.00664.x>
- Xue, Y., Yan, Z., Cheng, D., Daddy, S., ve He, Q. (2014). Genetically engineering *synechocystis* sp. pasteur culture collection 6803 for the sustainable production of the plant secondary metabolite p-coumaric acid. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(26), 9449-9454. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323725111>
- Yilmaz, A., Yilmaz, H., Arslan, Y., Çiftçi, V., ve Baloch, F. (2021). Ülkemizde alternatif yağ bitkilerinin durumu. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.843220>
- Yilmaz, G., Simsek, D., Ekşi, G., Altanlar, N., Çiçek, M., ve Yaprak, A. (2020). Antimicrobial activity of some centaurium hill taxa growing in turkey. *Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 44(3), 415-423. <https://doi.org/10.33483/jfpau.756312>
- Yue, W., Ming, Q., Lin, B., Rahman, K., Zheng, C., Han, T., ... ve Qin, L. (2014). Medicinal plant cell suspension cultures: pharmaceutical applications and high-yielding strategies for the desired secondary metabolites. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(2), 215-232. <https://doi.org/10.3109/07388551.2014.923986>

Zaka, M. and Abbasi, B. (2016). Effects of bimetallic nanoparticles on seed germination frequency and biochemical characterisation of *Feruca sativa*. *Iet Nanobiotechnology*, 11(3), 255-260. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0004>

## 2. Bölüm

# YOĞUNLAŞTIRILMIŞ GÜNEŞ SANTRALLERİNDE FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME TABANLI GİZLİ ISI TERMAL ENERJİ DEPOLAMA TEKNOLOJİSİNİN KULLANIMI

Ahmet ÇAĞLAR<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Doç.Dr , Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 07070 Antalya  
E-mail adresi: [acaglar@akdeniz.edu.tr](mailto:acaglar@akdeniz.edu.tr)  
ORCID: 0000-0003-2788-2659

## Giriş

Küresel ısınma, insanlığın şu anda karşılaştığı en büyük problemlerden biridir. Sorunun büyüklüğü göz önüne alındığında akademisyen, sanayici ve politika yapıcıların büyük bir kısmı bu sorunu çözmek için koordineli bir şekilde çabalamaktadır. Küresel etkilere sahip ortak çalışmalardan biri 2016 Paris Anlaşması'dır. Anlaşmanın 2. Maddesi iklim değişikliği tehdidine yönelik küresel mücadeleyi güçlendirecek şu hedefleri içerir:

*(a) İklim değişikliği risk ve etkilerini önemli ölçüde azaltacağı bilinciyle, küresel ortalama sıcaklıktaki artışı sanayileşme öncesindeki seviyeye göre 2 °C'nin altında tutmak ve mümkünse 1,5 °C ile sınırlandırmak için çaba göstermek;*

*(b) Gıda üretimini tehdit etmeyecek şekilde, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine uyum sağlayabilme kabiliyetini artırmak, iklim değişikliğine direnç geliştirmek ve düşük emisyonlu kalkınmayı teşvik etmek;*

*(c) Finans akışlarını, düşük sera gazı emisyonları ve iklim değişikliğine dirençli kalkınmaya yönelik eğilimle tutarlı hale getirmek.*

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayınlanan "Dünya Enerji Görünümü 2014" raporuna göre, küresel enerji talebi 2011'den 2035'e kadar üçte bir oranında artacak ve fosil yakıtlar olağan şekilde kullanılırsa enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonu %20 artarak 37,2 Gigaton'a ulaşacaktır. İlgili çevre sorunlarını hafifletmek için, daha maliyet etkin yenilenebilir enerji teknolojileri geliştirilerek fosil yakıt kullanımını azaltmak, giderek daha fazla zorunlu hale gelmektedir. Yenilenebilir enerji kullanımının artırılması, iklim değişikliği hedeflerine ulaşmanın açık bir yolu olarak kabul edilmiştir. Bu amaçla, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) ve diğer enerji komisyonları yenilenebilir enerji hedeflerini uygulamak ve maliyet etkin enerji üretimini iyileştirmek için bazı temel etkinleştirme teknolojilerini belirlemiştir. Yenilenebilir enerji teknolojileri arasında güneş enerjisi teknolojisi, Fotovoltaik (PV:Photovoltaic) güç üretimi ve Yoğunlaştırılmış Güneş Termal Gücü (CSP:Concentrated Solar Power) yoluyla en umut verici yenilenebilir enerji hasadı teknolojisi olarak değerlendirilmektedir. Güneş PV sistemi, güneş hücrelerini kullanarak güneş enerjisini doğrudan elektrığe dönüştürür. CSP sistemi, güneş ışığını parabolik oluklar veya doğrusal Fresnel reflektörleri kullanarak bir çizgide veya noktada yoğunlaştırarak bir ısı transfer akışkanına aktarır ve bu akışkan tarafından taşınan yoğun ısıyı termal güç santraline (veya güç bloğu olarak adlandırılır) göndererek elektrik üretimini gerçekleştirir. Her iki güneş teknolojisi de, 1970'lerde güneş enerjisi yenilenebilir enerji sektörünün bir parçası olduğundan beri farklı şekilde gelişmiştir. PV sistemler, daha fazla enerji-ve maliyet-etkin güneş hücrelerinin gelişmesi ve daha kısa kurulum süreleri

yardımıyla maliyeti düşürmenin yollarını bulmuştur. Bu sayede özellikle son on yılda Asya ve Avrupa'da hızlı bir büyüme elde etmiştir. Diğer yandan CSP pazarı son yıllarda, çoğunlukla İspanya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde hızla büyümektedir. PV güç tesisleri, CSP tesislerine göre daha maliyet etkin olsa da, elektrik enerjisi depolama zorluğu nedeniyle PV tesis ile güç dağıtımını talebe binaen düzenlemek oldukça zordur. CSP tesisleri ise hem daha verimlidir, hem daha büyük enerji üretim kapasitesine sahiptir, hem de termal enerji depolama entegre CSP sistemlerinde depolanan ısı kullanılarak güneş enerjisinin olmadığı zamanlarda ek enerji sağlanabilir ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonları ile talebe binaen güç dağıtımını gerçekleştirilebilir.

Yapılan çalışmalar, CSP'nin sıfır karbonlu bir güç sisteminde önemli bir rol oynayacağını ön görmektedir: Örneğin, IEA'nın '2050'ye Kadar Net-Sıfır' raporu, küresel CSP kurulu gücünün 2030, 2040 ve 2050 yıllarında sırasıyla 73, 281 ve 426 GW'a ulaşması gerektiğini belirtmektedir. IEA, 2050 yılına kadar şirketlerin, enerji kuruluşlarının ve akademik kurumların finansal ve teknik desteğiyle CSP'nin toplam elektriğin %11,3'ünü sağlayacağını öngörmektedir. Benzer şekilde, IRENA CSP'nin 2030 yılına kadar 52 GW ile 83 GW arasında bir kapasiteye ulaşacağını öngörmektedir. Isı esaslı güneş enerjisi formu olarak CSP, CO<sub>2</sub> uzaklaştırmada ve dünyanın atmosferik kimyasını yeniden dengelemede önemli bir rol oynayabilir. Ancak CSP'nin enerji dağıtımını doğru şekilde değerlendiren tarifelerin olmaması nedeniyle, CSP geliştiricilerinin özellikle PV teknolojisi ile rekabet edebilmesi için CSP tesis maliyetlerini düşürmesi gerekmektedir.

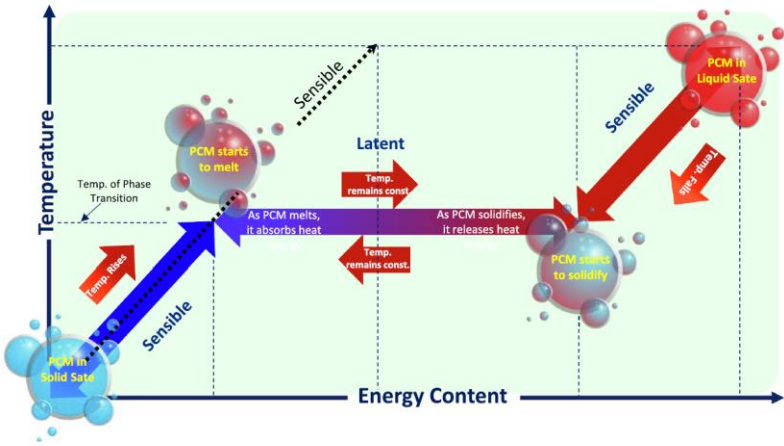
Diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine kıyasla, CSP teknolojilerinin ana avantajlarından biri, büyük ölçekli termal depolama tesisleri veya hibrit alt sistemlerle kolayca entegre edilebilmesi sayesinde güneş ışınımındaki dalgalanmaların etkisini azaltabilmesi ve şebekeye büyük ölçekli sabit güç çıkışı sunabilmesidir. Bir termal enerji depolama (TES:Thermal Energy Storage) sistemi olmadan CSP de tıpkı PV gibi ışınım olmadan talebe uygun enerji sağlama yeteneğine sahip değildir. TES teknolojisi, düşük talep zamanlarında belirli malzemelerin fazla güneş enerjisini ısı olarak depolayabilme yeteneğini kullanır. Depolanan enerji daha sonra güneş enerjisinin yetersiz kaldığı durumlarda talep miktarına uygun şekilde elektrik enerjisine dönüştürülerek günün herhangi bir saatinde kesintisiz bir tedarik sağlar. Diğer taraftan düşük karbon ekonomisine geçişin, yakın gelecekte enerji depolama talebini önemli ölçüde artıracığı yaygın bir görüştür. CSP teknolojisi diğer güneş teknolojilerine göre enerji depolamaya daha uygundur ve enerji termal enerji formunda nispeten yüksek verimlilikle depolanabilir. TES sistemine sahip bir CSP, büyük ölçekli (>100 MW) elektrik tedariki sağlamak için ilk tercih edilen yenilenebilir kaynaklı



güç üretim sistemidir. TES, tesis kapasite faktörlerini artırır ve sevk edilebilirliği iyileştirir. TES teknolojilerinin sermaye maliyetini düşürmek, enerji maliyetini düşürecek ve nihayetinde ticari güneş enerjisi santralleri için bir katalizör görevi görecektir. CSP teknolojisinin gelişimini belirleyen anahtar faktörlerden biri, verimli ve maliyet etkin bir TES sisteminin entegrasyonudur. CSP santrallerinin elektrik üretimi maliyetini etkili bir şekilde düşürebilen TES sistemi, enerji arzı ve talebi arasındaki boşluğu kapatmada ve enerji tasarrufuna katkıda bulunmada önemli bir rol oynar. Ayrıca TES sistemi ile bir CSP tesisinin güvenilirliği, esnekliği ve böylece sağladığı hizmetin kalitesi artar.

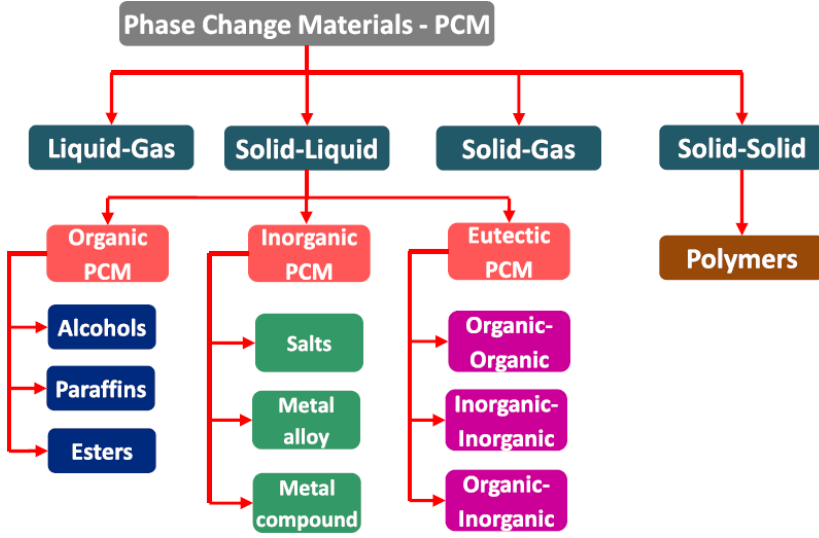
CSP tesisine entegre edilebilecek TES sistemi şu üç tipten biri olabilir: (a) duyulur ısı depolama, (b) gizli ısı depolama ve (c) termo-kimyasal depolama. Mevcut termal enerji depolama sistemlerinin çoğu duyulur ısı depolamaya dayanmaktadır. Potansiyel TES teknolojileri arasında, *duyulur* ısı TES sistemi ticari CSP santrallerinde gerçekten en yaygın kullanılan teknolojidir, ancak depolama malzemesinin yüksek özgül ısısı, büyük boyut ve ısı transfer sıvısı ile depolama malzemesi arasındaki büyük sıcaklık farkı gereksinimi nedeniyle, duyulur enerji depolama sistemlerinin düşük enerji yoğunluğu ve deşarj sırasında sıcaklık düşüşü gibi handikapları vardır. Diğer yandan mevcut CSP endüstrisinde, termo-kimyasal enerji depolama diğer ikisine göre daha fazla enerji depolama kapasitesine sahip olmasına rağmen henüz teknik ve ekonomik zorluklar nedeniyle pek kullanılmamaktadır. Bu bağlamda, son on yılda, özellikle CSP uygulaması için faz değiştiren malzeme (PCM:Phase change material) kullanan *gizli* ısı TES sistemine olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Termal enerjinin, PCM'nin erime gizli ısısı şeklinde depolanması, depolama sisteminin enerji yoğunluğunu önemli ölçüde artırır ve birim termal enerji başına depolama sermaye maliyetini düşürür. Sisteme ısı uygulandığında (şarj), PCM ısıtıldıkça enerji depolar. PCM faz değişim sıcaklığına yaklaştıkça, bu enerjiyi neredeyse sabit bir sıcaklıkta depolamaya devam eder. Isı bu malzemedan çıkarıldığında (deşarj), malzemede depolanmış enerji açığa çıkar. PCM kullanan gizli ısı TES sistemi, aynı sıcaklık aralığında duyulur ısı TES sistemine kıyasla önemli ölçüde büyük depolama kapasitesi sağlayabilen neredeyse izotermal bir sürece sahiptir (Şekil 1). Bu, duyulur ısı depolamasına göre çok daha büyük bir enerji yoğunluğu sağlar. Bir gizli ısı TES sisteminin depolama kapasitesi PCM'nin faz değişim gizli ısısına bağlı olmak kaydıyla duyulur ısı TES'inkinden 5-10 kat daha büyüktür, bu da ısı depolama sistemini daha küçük ve daha düşük maliyetli bir sistem haline getirebilir. İzotermal depolama önemli bir özelliktir, çünkü güç çevriminde kaynak sıcaklığındaki değişim istenmeyen bir durumdur. Ayrıca PCM'lerin çalışma sıcaklık aralıkları daha esnektir, duyulur ısı TES sistemlerinin çıkabileceği 600 °C'nin üzerine rahatlıkla çıkabilir. Bununla birlikte, PCM'nin

düşük termal iletkenliğinin neden olduğu yüksek termal direnç, PCM'nin gizli termal enerjisinin kullanımını sınırlayan önemli bir teknolojik bariyerdir. Düşük termal iletkenlik, ısı transfer sıvısından PCM'ye ısı transferini sınırlar, bu da uzun şarj ve deşarj sürelerine yol açar. Bu durum, verimli güç üretimi için istenmeyen başka bir durumdur. PCM'lerin termal direncini azaltmak için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bunlar, PCM'yi yüksek termal iletkenliğe sahip bir matris içinde paketleme, PCM'ye yüksek termal iletkenliğe sahip parçacıklar ekleme, geniş yüzeylerin kullanılması, PCM'nin kapsüllenmesi ve birden fazla PCM'ler kullanma gibi yöntemleri içermektedir. CSP sistemlerinde enerji depolama için kullanılabilir PCM türleri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 1. PCM'lerin ısı depolama mekanizması (Khan vd., 2023)

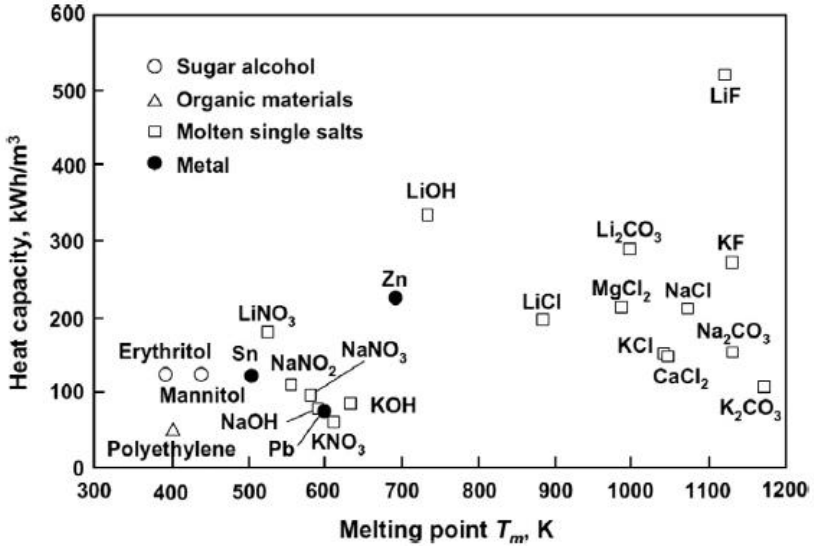
Farklı türdeki PCM'lerin gizli ısı TES sistemlerinde kullanımını üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Termal depolama uygulamaları için yaygın olarak bilinen PCM'ler, Şekil 2'de de görülen organik bileşikler, inorganik tuzlar ve bunların ötektikleri olarak gruplandırılır. PCM olarak kullanılan organik bileşikler arasında parafin mumları, esterler, asitler ve alkoller bulunurken; inorganik malzemeler arasında tuz hidratları, inorganik tuzların ötektikleri, metaller ve bunların ötektikleri yer alır. Organik bileşiklerden elde edilen PCM'ler genellikle düşük erime noktalarına sahiptir ve yalnızca oda ısıtma amaçlı ısı depolama uygulamalarında kullanılabilirler. Yüksek sıcaklıkta termal depolama için eriyik tuzları araştırmacılar tarafından yaygın olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, erimiş metaller ve alaşımlar nükleer enerji santrallerinde ısı taşıyıcı akışkan (HTF:Heat Transfer Fluid) olarak kabul edildiğinden, bunların CSP sistemlerinde termal enerji depolamada hem HTF hem de PCM olarak kullanımı mümkündür.



Şekil 2. PCM'lerin sınıflandırılması (Khan vd., 2023)

CSP'de termal depolama için uygun olan PCM'ler çalışma sıcaklıkları bakımından; erime noktası 220 °C'nin altında olanlar 'düşük' sıcaklıklı malzemeler, erime sıcaklıkları 420 °C'ye kadar olanlar 'orta' sıcaklıklı malzemeler ve 420 °C'nin üzerindeki erime noktalarına sahip olanlar ise 'yüksek' sıcaklıklı malzemeler olarak sınıflandırılmıştır. Çeşitli PCM'lerin 300 K ile 1200 K erime sıcaklık aralığındaki gizli ısı depolama kapasiteleri Şekil 3'te verilmiştir.

Enerji yoğunluğu ve erime sıcaklığının yanı sıra, kimyasal kararlılık, kaplara veya kapsül kabuklarına karşı korozyon etkisi ve maliyet bir tuzun CSP pratik uygulamaları için potansiyelini belirleyen diğer önemli kriterlerdir. İnorganik PCM'lerin daha yüksek gizli ısıya sahip olduğu, ancak daha kötü korozyon direnci ve daha zayıf termal kararlılık sergilediği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Organik PCM'ler ise çok düşük korozyon etkisine ve çok daha iyi termal/kimyasal kararlılığa sahiptir, ancak çok daha düşük gizli ısı ve termal iletkenlik karakteri göstermektedir. Tablo 1, termal depolama malzemesi olarak PCM'lerden beklenen özellikleri özetlemektedir.



Şekil 3. Çeşitli PCM'lerin gizli ısı depolama kapasiteleri (Xu vd., 2015)

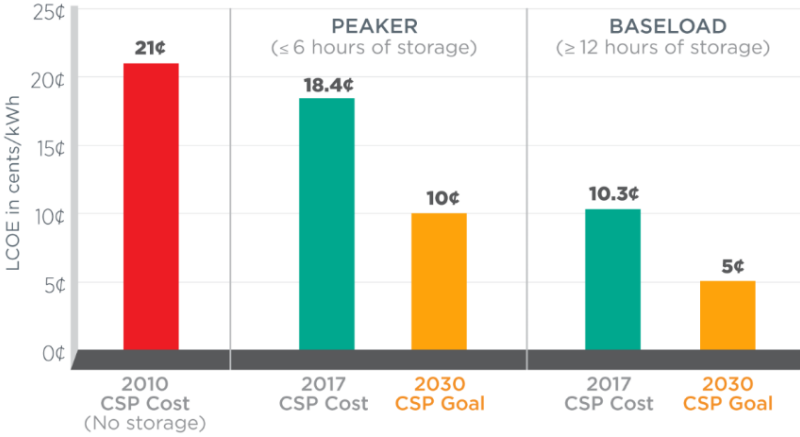
**Tablo 1.** Enerji depolama malzemesi olarak PCM'lerden beklenen gereksinimler (Xu vd., 2015)

Isıl özellikler	1. Uygulamaya uygun faz değişim sıcaklığı
	2. Yüksek entalpi değişimi (erime noktası kullanım sıcaklığına yakındır)
	3. Sıvı ve katı fazlarda yüksek termal iletkenlik
Fiziksel özellikler	1. Düşük yoğunluk değişimi
	2. Yüksek yoğunluk
	3. Küçük aşırı soğuma ya da aşırı soğuma olmaması
Kimyasal özellikler	1. Kararlılık
	2. Faz ayrışması olmaması
	3. Konteyner (taşıyıcı) malzemeleriyle uyumluluk
	4. Toksik olmayan, yanıcı olmayan, çevreyi kirletmeyen
Ekonomik özellikler	1. Ucuz ve bol bulunabilir

Elbette TES destekli CSP sistemlerinin sadece teknik ve ısıl özelliklerinin değil, maliyetlerinin ve ekonomikliğinin de tartışılması gerekir. Seviyelendirilmiş (dengelenmiş) enerji maliyet analizi (LCOE:Levelized Cost of Energy), her ne kadar elektriğin zamanla değişen maliyetlerini hesaba katmasa da, CSP yatırımının maliyet etkin olup olmadığını belirlemede kullanılan etkili yöntemlerden biridir. Şekil 4'te ABD Eneji Bakanlığı'nın Sun Shot 2030 Hedefleri çerçevesinde ısı depolamasız ve ısı depolamalı CSP sistemlerinin

gerçekleşen ve 2030 yılı için hedeflediği ve altında kalmasını tavsiye ettiği birim enerji üretimi başına maliyet değerleri dolar cent (1/100 \$) cinsinden verilmektedir.

### SunShot CSP Progress and Goals



Şekil 4. Isı depolamalı CSP sistemlerinin seviyelendirilmiş maliyet hedefleri (SunShot CSP 2030)

### Sonuç

Tüm dünyada hükümet kurumları ve sanayi tarafından sağlanan sürdürülebilir, uzun vadeli destek ve yatırımlar sayesinde yapılan yoğun araştırma ve yayınlardan açıkça görülüyor ki, CSP sistemlerinin geliştirilmesi çalışmaları sistemin termal performansı, güvenilirliği ve maliyeti üzerine odaklanmıştır. TES teknolojisi CSP sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. CSP'ye TES sistemi eklemek başlangıçta yatırım maliyetlerini artırma endişesini beraberinde getirse de, artan enerji üretim kapasitesi nedeniyle ilk kurulum kapasitesini ve dolayısıyla maliyetlerini azaltma eğilimindedir. CSP endüstrisinde duyulur ısı, gizli ısı veya her ikisinin kombinasyonu şeklinde termal enerji depolama teknikleri kullanılmaktadır. Gizli ısı depolama ve duyulur ısı depolama sistemlerini karşılaştırmak amacıyla yapılan çalışmalar, PCM'ler kullanan gizli ısı depolama tankı hacminde önemli bir azalma sağlanabileceğini göstermiştir.

TES'in enerji ve maliyet etkinliğini artırmak için önerilen çözümler malzeme düzeyinde çalışma sıcaklığı aralıklarını artırmaya, gelişmiş termal özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirmeye ve bu malzemelerin dayanıklılığını ve ömrünü artırmaya odaklanırken; sistemsel düzeyde daha uygun maliyetli güvenilir bir sistem hedefleyen yeni sistem konfigürasyonu ve optimize edilmiş

operasyonel stratejilere odaklanmaktadır. Gizli ısı TES teknolojilerinin güncel durumu incelendiğinde, özellikle PCM kapsülleme ve doldurulmuş PCM kapsüllerinin ısı transferinin iyileştirmesinde önemli katkılar sağladığı görülmüştür. Kapsüllenmiş PCM'lerin ticari hale gelmesiyle birlikte sistem maliyetleri daha da düşecektir. PCM erime sıcaklığı ile kesme sıcaklığı (güç santrali tarafından kabul edilebilir en düşük HTF sıcaklığı) arasındaki ilişki ele alınırsa, literatürden elde edilen sonuçlar, eğer kesme sıcaklığı PCM'in erime sıcaklığı ile aynı tutulabilirse, böyle bir faz değişim malzemesinin daha küçük bir depolama tankı hacmi sağlayabileceğini ve bunun da malzeme ve kurulum maliyetinde önemli bir azalmaya yol açacağını göstermektedir. Dağıtılabilirliğin maliyetini azaltmak için, etkili ve uygun maliyetli bir TES sisteminin geliştirilmesi, CSP teknolojilerinin geleceği için kritik önem taşımaktadır. Erimiş tuz, önümüzdeki 5 ila 7 yıl boyunca CSP santralleri için ana TES ortamı olmaya devam edecek gibi görünmektedir. Ancak güneş-elektrik verimliliğini artıracak yüksek enerji yoğunluğuna ve stabil çıktı sıcaklığına sahip PCM esaslı bir TES sistemi, gelecek nesil CSP santralleri için çok umut verici bir seçenek olacaktır.

Son on yılda, CSP santrallerindeki TES sistemlerinin kurulu kapasitesinde önemli bir büyüme gözlenmiştir. CSP tarafından üretilen elektriğin dağıtılabilirliği, onu doğalgazla çalışan enerji santralleriyle daha rekabetçi hale getirmekte ve diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinden çok daha ayrıcalıklı bir seçenek durumuna getirmektedir. Daha verimli CSP santralleri ve TES sistemleri geliştirilip uygulamaya konarak, güneşin ücretsiz ve temiz enerjisi tüm dünyada evlere, işletmelere ve topluluklara güç sağlamak için kullanılabilir. Bu da karbon kirliliğini azaltmaya ve çevremizi gelecek nesiller için temiz tutmaya yardımcı olacaktır.

## KAYNAKLAR

1. ABD Enerji Bakanlığı SunShot CSP 2030 Raporu (17 Ocak 2019): *The Potential Role of Concentrating Solar Power within the Context of DOE's 2030 Solar Cost Targets*.
2. A. Palacios, C. Barreneche, M. E. Navarro, Y. Ding, 'Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective', *Renewable Energy*, 156 (2020) 1244–1265. Doi: 10.1016/j.renene.2019.10.127
3. B. Xu, P. Li, C. Chan, 'Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: A review to recent developments', *Applied Energy*, 160 (2015) 286–307. Doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.016
4. C. Prieto, L. F. Cabeza, 'Thermal energy storage with phase change materials in solar power plants. Economic analysis', *Journal of Energy Storage*, 43 (2021), 103184. Doi: 10.1016/j.est.2021.103184
5. I. Khamlich, K. Zeng, G. Flamant, J. Baeyens, C. Zou, J. Li, X. Yang, X. He, Q. Liu, H. Yang, Q. Yang, H. Chen, 'Technical and economic assessment of thermal energy storage in concentrated solar power plants within a spot electricity market', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139 (2021) 110583. Doi: 10.1016/j.rser.2020.110583
6. K. Nithyanandam, R. Pitchumani, Cost and performance analysis of concentrating solar power systems with integrated latent thermal energy storage, *Energy*, 64 (2014) 793–810. Doi: 10.1016/j.energy.2013.10.095
7. M. Liu, R. Jacob, M. Belusko, S. Riahi, F. Bruno, 'Techno-economic analysis on the design of sensible and latent heat thermal energy storage systems for concentrated solar power plants', *Renewable Energy*, 178 (2021) 443–455. Doi: 10.1016/j.renene.2021.06.069
8. M. I. Khan, F. Asfand, S. G. Al-Ghamdi, 'Progress in research and development of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar power', *Applied Thermal Engineering*, 219 (2023) 119546. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119546
9. S. Thaker, A. O. Oni, A. Kumar, 'Techno-economic evaluation of solar-based thermal energy storage systems', *Energy Conversion and Management*, 153 (2017), 423–434. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.004

**GPS TABANLI AKILLI TELEFON UYGULAMASININ  
VERİLERİ VE CBS KULLANILARAK AİZANOİ  
ANTİK KENTİ'NDE TURİST HAREKETLİLİĞİNİN ANALİZİ**

**Ahmet USLU<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Tavşanlı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Türkiye [ahmet.uslu1@dpu.edu.tr](mailto:ahmet.uslu1@dpu.edu.tr)  
ORCID: 0000-0001-8745-423X



## ÖZET

Hareketlilik turizm araştırmalarında ve özellikle sürdürülebilir turizm araştırmalarında önemli bir unsurdur. Günümüzde gelişmiş sensörler ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinin (GPS/GNSS) modülleri ile donatılan akıllı telefonlar, çeşitli mobil uygulamalar aracılığıyla anlık ve sürekli veri akışı sağlayarak veri madenciliği araştırmaları için eşsiz fırsatlar sunmaktadır. Turistler tarafından kullanılan birçok akıllı telefon uygulaması, konuma dayalı hizmetleri sağlamak için mekân ve zamandaki hareketleri otomatik olarak izler ve kaydeder. Bu çalışmada, GPS teknolojisi ile donatılmış Komoot uygulamasının verilerine dayanarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Aizanoi Antik Kenti'ni ziyaret eden bir turistin zaman ve mekandaki davranış modelleri analiz edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir turizm planlaması yoluyla Aizanoi Antik Kenti'ndeki kültürel miras destinasyonlarını yöneten yerel idareler ve karar vericiler için turist akışlarını yeniden dağıtmak, miras alanlarını korumak ve muhafaza etmek ve sürdürülebilir turizm kavramının daha iyi bir şekilde uyarlanması için ve turist deneyimini geliştirmek için önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Turist hareketi, GPS, Komoot, CBS, Aizanoi Antik Kenti

## 1. GİRİŞ

Kültürel ve miras turizmi, dünya genelindeki toplam turizmin %39'unu temsil eden, turizm sektörünün en temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Richards, 2018). Kültürel mirasa ve kültürel turizme olan ilgi arttıkça, kültürel miras varlıklarını korumak, geliştirmek ve tanıtmak için "sürdürülebilir turizm" kavramı giderek daha da önemli hale gelmiştir (Landorf, 2009).

Politika yapıcılar ve turizm geliştiricileri, sürdürülebilir kültürel turizm destinasyonları kurmak için ziyaretçilerin hareketlilik davranışlarına, mekân ve turizm kaynaklarını nasıl değerlendirdikleri bilgisine ihtiyaç duymaktadırlar (Aranburu ve ark., 2016). Bu bilgiler, yüksek ziyaretçi etkisine sahip turistik cazibe merkezlerini belirlemeye, alan koruma ve yönetimi üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaya yönelik stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlar (Mason, 2005).

Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinin (GPS/GNSS) teknolojisinin tanıtılması, ziyaretçilerin hareketlilik davranışlarına ilişkin verilerin toplanmasında önemli bir devrimi başlatmıştır. GPS/GNSS teknolojisi sayesinde izlenen verilerin kaydedilmesiyle birlikte, cihazların konumlarına ilişkin çok miktarda ayrıntılı bilgi ve bunlara karşılık gelen zaman damgaları kullanılabilir hale gelmiştir. Ziyaretçi anketleri, doğrudan gözlem ve yerinde sayaçlar gibi geleneksel veri toplama yöntemleriyle kapsanmayan bazı boşlukları doldurmak için GPS/GNSS teknolojisi muazzam bir potansiyel sunmuştur (Gillis ve ark., 2023). Bu teknoloji, bireylerin konumlarına ilişkin yüksek çözünürlüklü mekânsal-zamansal verileri kaydetme avantajına sahiptir (Edwards ve Griffin, 2013)

Günümüzde gelişmiş sensörler ve GPS/GNSS modülleri ile donatılan akıllı telefonlar, anlık ve sürekli veri akışı sağlayarak veri madenciliği uygulamaları için eşsiz fırsatlar sunmaktadır. Turistler tarafından kullanılan birçok akıllı telefon uygulaması, konuma dayalı hizmetleri sağlamak için mekân ve zamandaki hareketleri otomatik olarak izler ve kaydeder (Martin ve ark., 2017). Dahası, GPS/GNSS yörünge verileri, turistlerin bir cazibe merkezini nasıl keşfettikleri, belirli bir alanda ne kadar süre geçirdikleri ve daha sonra nereye gidecekleri açısından turist hareket davranışını mikroskobik ölçekte belirlemede etkili bir yol sağlar (Liu ve ark., 2022). Bu soruları ele almak için çalışmada, GPS teknolojisi ile donatılmış bir akıllı telefon uygulaması verilerine dayanarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile Aizanoi Antik Kenti'ni ziyaret eden bir turistin zaman ve mekandaki davranış modelleri analiz edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, sürdürülebilir turizm planlaması yoluyla Aizanoi Antik Kenti'ndeki kültürel miras destinasyonlarını yöneten yerel otoriteler için turist

akışlarını dağıtmak, kültürel miras alanlarını korumak ve turist deneyimini geliştirmek için çok değerli çıkarımlar sağlamaktadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Hareket veya hareketlilik turizm araştırmalarında ve özellikle sürdürülebilir turizm araştırmalarında önemli bir unsurdur (Zolfani ve ark., 2015). Turist hareketi araştırması, turistlerin nerede, nasıl, hangi hız ve zamanda ve bir cazibe merkezinden diğere nasıl hareket ettiklerini anlamayı amaçlar (Liu ve ark., 2022). Turizm araştırmalarında turistlerin hareketlerini izlemek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler: doğrudan gözlem, seyahat günlükleri kullanma veya haritalara çizim yapma, anket tabanlı yöntemler, mobil akıllı telefon uygulamaları kullanarak GPS izleme yoluyla gerçekleştirilen dijital izleme yöntemleri, Wi-Fi veya Bluetooth üzerinden izleme, coğrafi konumlu sosyal medya verileri aracılığıyla izleme olarak sıralanabilir (Shoval ve ark., 2024).

GPS izleme yoluyla gerçekleştirilen dijital izleme yöntemleri, turizm araştırmalarında ziyaretçilerin zaman ve mekândaki hareketlerinin hassas bir şekilde izlenmesine imkân sağladığı ve veri yapısının CBS gibi gelişmiş teknolojilere uyumlu olduğu için çeşitli şekillerde ve farklı başarı dereceleriyle birçok araştırmada kullanılmıştır (Hardy ve ark., 2017; Julio Guerrero ve Dias, 2024).

Literatürde akıllı telefon tabanlı GPS/GNSS izleme teknolojilerini kullanan son çalışmalar, kentsel destinasyonlarındaki (Yun ve ark., 2018; Kovács ve ark., 2021; Martins ve ark., 2022), kültürel miras destinasyonlarındaki (Md Khairi ve ark., 2022; Martins ve ark., 2023) rekreasyonel alanlardaki ve milli parklardaki (Hardy ve Aryal, 2020; Jurišić ve ark., 2023; Uslu, 2023; Costa ve ark., 2024) ziyaretçi hareketliliğinin zamansal-mekânsal modellerinin analizine, ziyaretçi deneyimlerine ve akışlarına odaklanmaktadır.

Yun ve ark., (2018) araştırmalarında, Güney Kore'nin Seul kentindeki Bukchon Hanok Köyü'nde, GPS tabanlı bir akıllı telefon uygulaması aracılığıyla 233 adet yürüyen turistin mevsime göre mekânsal-zamansal dağılımlarını analiz etmek için CBS teknolojisini ve istatistiksel yöntemleri kullanmışlardır. Kovács ve ark., (2021) araştırmalarında, Macaristan'ın ikincil bir kentsel merkezi olan Szeged'deki uluslararası turist akışlarının analizi için sosyal medya ve mobil konumlandırma verilerini birleştirmişlerdir. Martins ve ark., (2022) araştırmalarında, Portekiz'in Porto kentsel destinasyonunu ziyaret eden sırt çantalı gezginlerin hareketlerini izlemek için bir GPS uygulamasıyla birleştirilmiş bir anket anketi kullanarak sırt çantalı gezginlerin mekansal-zamansal davranışlarını belirlemişlerdir. Md Khairi ve ark., (2022)

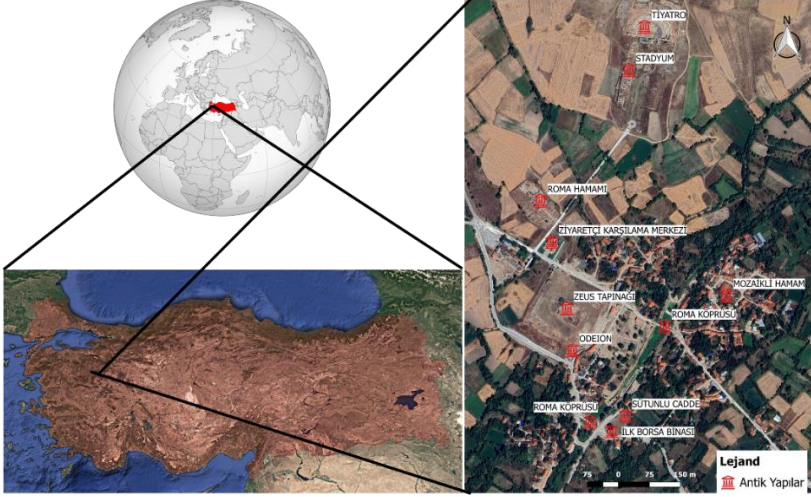
araştırmalarında, 2008’de UNESCO tarafından Dünya Mirası Alanı olarak ilan edilen Malezya’nın Melaka eyaletinde kültürel mirası alanı yönetimini iyileştirmek için 384 bağımsız turistin katılımcı olarak yer aldığı bir GPS izleme uygulamasını kullanarak turistlerin mekânsal davranışına ilişkin kapsamlı bilgiler elde etmişlerdir. Martins ve ark., (2023) araştırmalarında, Dünya Mirası olarak sınıflandırılan Portekiz’in Porto kentsel destinasyonundaki sırt antallı turistlerin mekânsal-zamansal davranışlarını analiz etmek için 292 adet turist ile anket çalışması yapmışlar ve 82 adet turisti bir ziyaret günü boyunca izlemek için GPS Uygulaması kullanmışlardır. Hardy ve Aryal (2020) araştırmalarında, Avustralya’nın Freycinet Milli Parkı’ndaki turisti hareketliliğini modellemek için sentezlenmiş demografik anket ve GNSS teknolojisi ile donatılmış bir uygulama kullanmışlardır. Uslu (2023) araştırmasında, GNSS tabanlı gönüllü coğrafi bilgiler ve CBS teknolojisi aracılığıyla Dilek Yarımadası’nda gerçekleştirilen doğa temelli rekreasyonel aktivitelerin zamansal-mekânsal dağılımını haritalamıştır. Costa ve ark., (2024) araştırmalarında, Portekiz’in kuzeyinde yer alan Alv o Doğal Parkı’ndaki fiziksel manzaralarda ziyaretçilerin zamansal-mekânsal davranışlarını analiz etmek için Wikiloc uygulamasından elde edilen GNSS tabanlı verileri kullanmışlardır.

GPS/GNSS teknolojileri ile donatılmış mobil uygulamalar önemli potansiyeline rağmen, turistleri uzun bir süre ve belirli ortamlarda izlemek söz konusu olduğunda önemli zorlukları bulunmaktadır. Bu cihazların sınırlı pil ömrü, iç mekanlarda, yoğun ormanlık alanlarda veya yüksek binaların olduğu oldukça kentleşmiş ortamlarda sinyallerin kesintiye uğraması bir sınırlılık olarak görülebilir (Pettersson ve Zillinger, 2011). Ancak yine de Küresel Navigasyon Teknolojisinin genişlemesi, dijital mekânsal verilerin toplanmasının artan kolaylığı ve büyük miktarda veriyi yönetmek için bilgi işlem kapasitesindeki büyümeler, turisti hareketinin hem mekânsal hem de zamansal davranışına ilişkin gelecekteki araştırmalar için yeni ve farklı uygulamaların gerçekleştirilmesine katkı sağlayacaktır (Shoval ve ark., 2024).

### **3. MATERYAL VE METOT**

#### **3.1. Çalışma Alanı**

Bu araştırmada Kütahya İli, avdarhisar İlçesi’nde yer alan Aizanoi Antik Kenti alışma alanı olarak belirlenmiştir. Tarihi M  3000’li yıllara dayanan Aizanoi Antik Kenti, UNESCO’nun Dünya Mirası Geçici Listesi’nde yer almakta ve “İkinci Efes” olarak bilinmektedir. Zeus Tapınağı, Stadyum - Tiyatro Kompleksi, Macellumu, Mozaklı Hamam ve Köprüler ile Roma Döneminin en önemli kentlerinden biridir. Aizanoi Antik Kenti’ni 2023 yılında 44 bin 842 kişi ziyaret etmiştir. Şekil 1’ de çalışma alanının coğrafi konumu gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının coğrafi konumu

### 3.2. Çalışmanın Materyalleri

Bu çalışmada gezi boyunca başlangıç ve varış noktaları arasında izlenen rotanın takibi ve kaydı için Komoot Uygulaması kullanılmıştır. Komoot, açık hava etkinlikleri ile ilgili rota planlamak ve sosyal ağ kurmak için kullanılan bir uygulamadır. Uygulama, Apple App Store ve Google Play'den indirilebilir. (Komoot, 2024). Komoot, kullanıcının izlediği rotanın parametrelerine ilişkin olarak; bulunduğu yerin coğrafi konumunu (enlem, boylam), yüksekliğini, zamanını, başlangıç-ara-bitiş noktaları arasındaki hızı ve mesafeyi sağlar. Uygulamaya kaydedilen dijital izler, gpx dosyası olarak indirilebilir.

Aizanoi Antik Kenti'ni ziyaret eden bir turistin zaman ve mekandaki davranış modellerini Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında analiz etmek için açık kaynak kodlu QGIS 3.40 yazılımı kullanılmıştır.

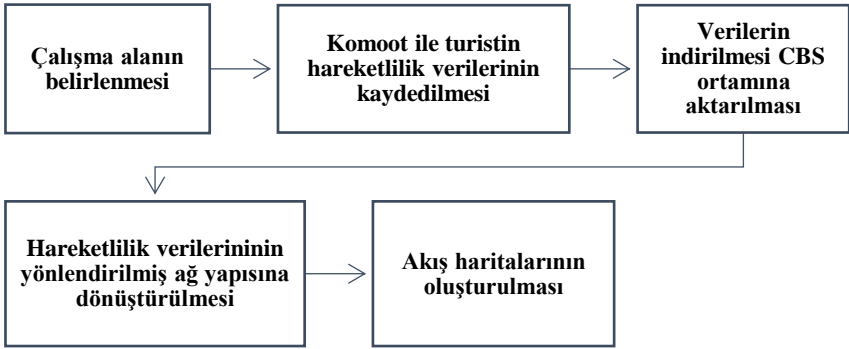
### 3.3. Çalışmanın Yöntemi

Aizanoi Antik Kenti'ni ziyaret eden turistin, gezi boyunca mekânsal-zamansal hareketini toplamak için GPS tabanlı bir akıllı telefon uygulaması Komoot kullanılmıştır. Bu uygulama, kullanıcıların mekânsal-zamansal verilerini toplar ve bireysel hareket mesafelerini, kalma sürelerini, hareket hızlarını, izleme kayıtlarını vb. bilgileri sunar. Bu bilgiler, gönüllü coğrafi bilgiler (VGI) olarak birçok internet kullanıcısıyla paylaşılabilir. Gezi sonunda ziyaretçinin mekânsal-zamansal hareket verileri web sitesine yüklenmiştir. Daha sonra gezi aktivitesi gerçekleştiren ziyaretçinin izlediği rotalar, “.GPX” formatı dosyasında indirilmiştir.

Turistin, Aizanoi Antik Kenti'nde zaman ve mekandaki davranış modellerinin analizi için QGIS 3.40 yazılımında yürüyüş rotası, GPX veri formatından

Shapefile'a dönüştürülerek, öznelik bilgilerini içeren bir veritabanı oluşturulmuştur. Veritabanı; turistin uygulamada kayıtlı olduğu kullanıcı adı, bulunduğu yerin coğrafi konumu, yüksekliği, zamanı, hızı, ara noktaların ve rotanın uzunluğu bilgilerinden oluşmaktadır.

Daha sonra QGIS yazılımında turistin hareketine ilişkin GPS yörüngesi genelleştirilerek, başlangıç - varış noktaları belirlenmiş ve (başlangıç – varış) OD matrisi oluşturulmuştur. OD matrisinden de yönlendirilmiş ziyaretçi akışı simülasyon modeli oluşturularak zaman ve mekandaki davranış modelleri analiz edilmiştir. Şekil 2'de çalışmada uygulanan iş akışı gösterilmektedir.

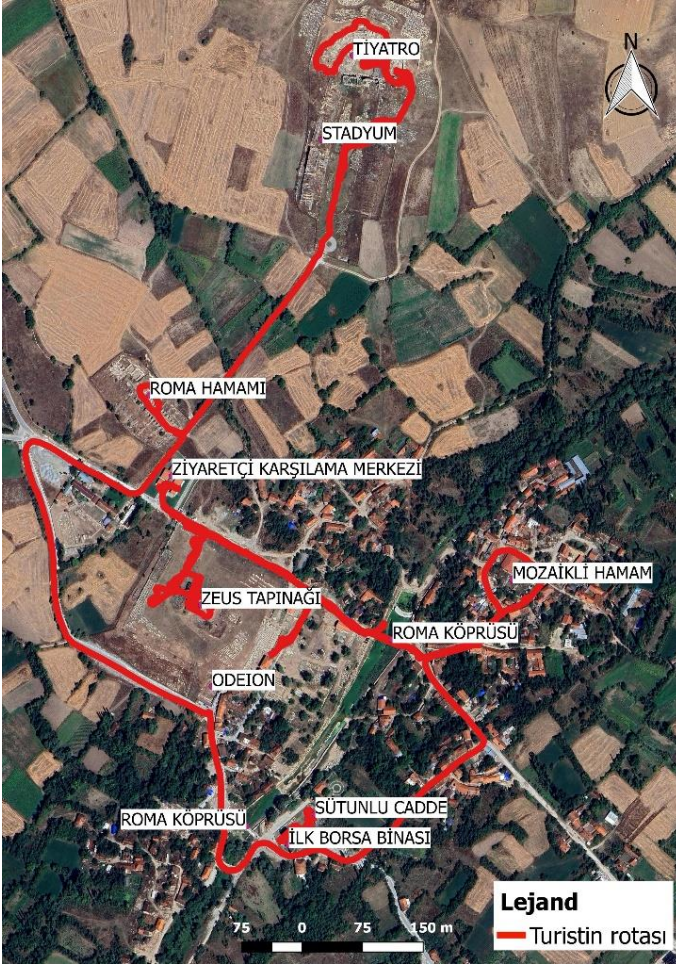


Şekil 2. Çalışmada uygulanan iş akışı

## 4. BULGULAR

### 4.1. Verilerin Toplanması

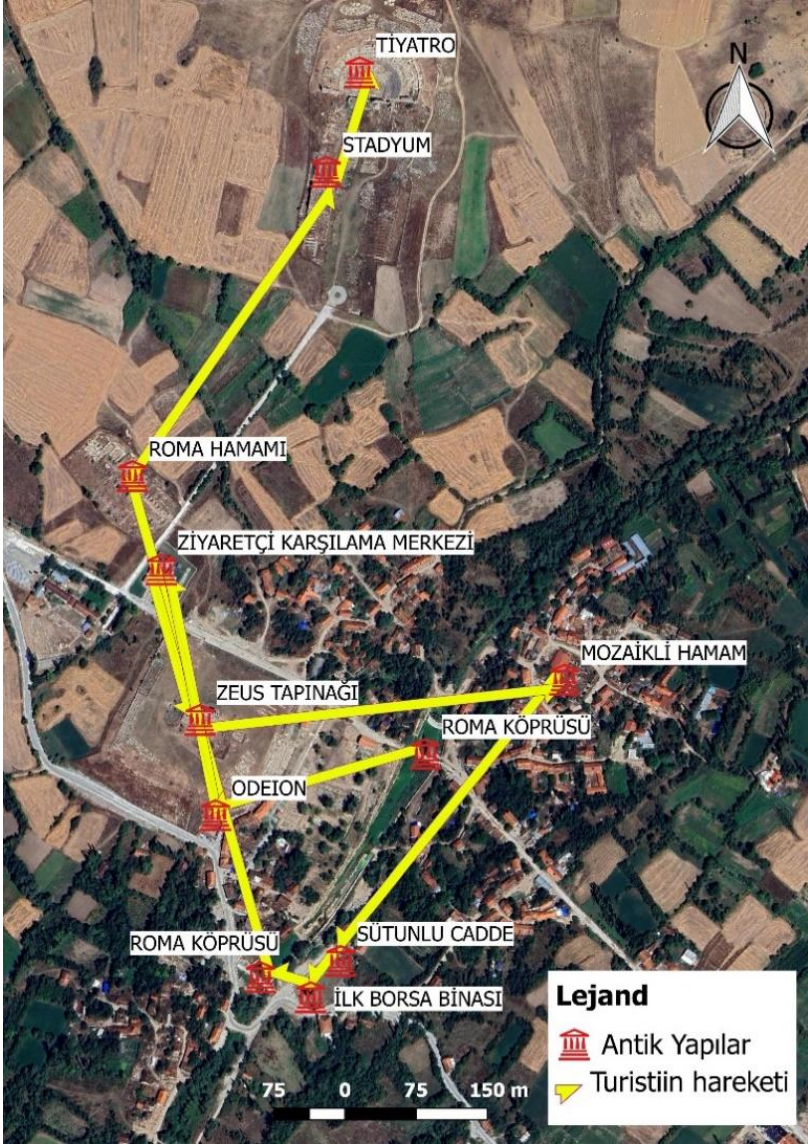
Turist akıllı telefonundan Komoot uygulamasını açarak, gezisine ilişkin rota kaydı oluşturmuştur. Turistim gezisi, 2 saat 27 dakika sürmüş ve turist toplamda 5,92 km yol katetmiştir. Daha sonra Komoot uygulamasından turistin dijital ayak izleri GPX veri formatında indirilerek, QGIS yazılımına aktarılmıştır. Şekil 3'te turistin rotasına ilişkin dijital ayak izleri gösterilmektedir.



Şekil 3. Turistin Aizanoi Antik Kenti'nde izlediği rotanın dijital izleri

#### 4.2. Turist Hareketliliğinin Analizi

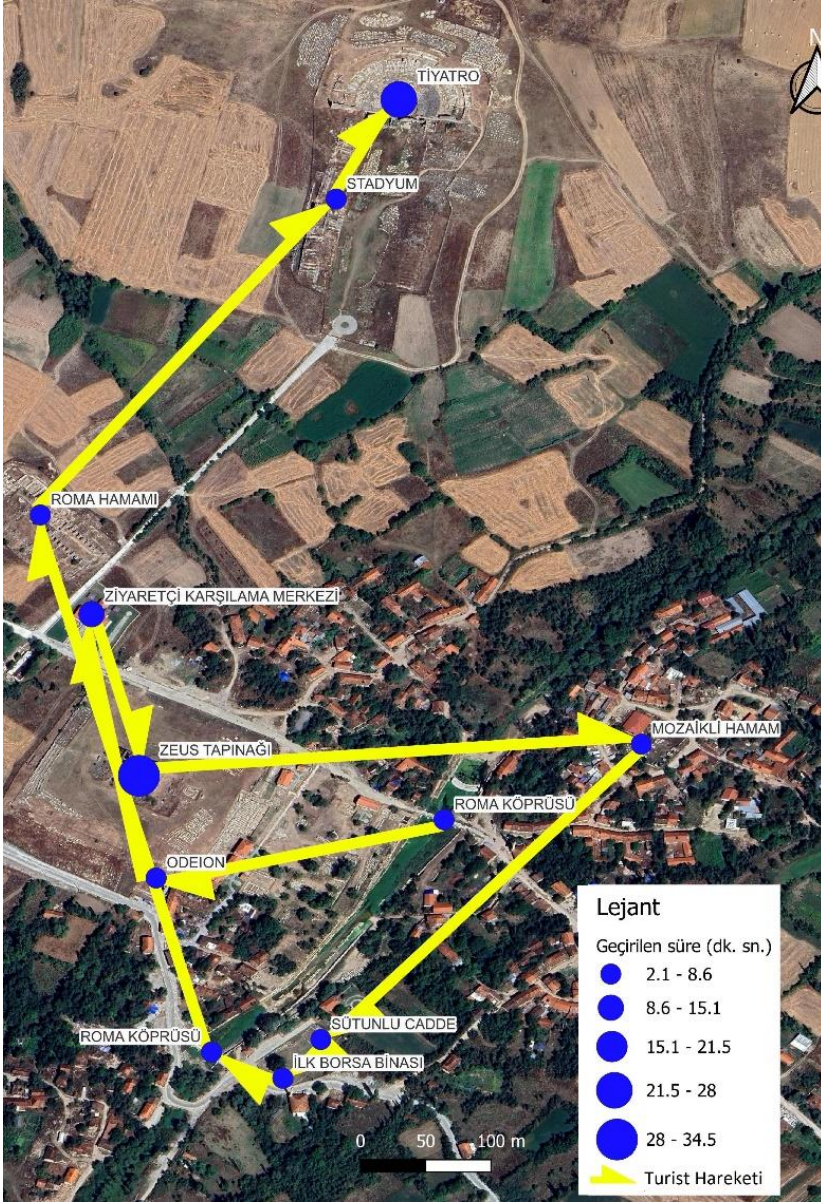
Turist gezisine öncelikle, otopark alanına yakın olduğu için Çavdarhisar – Emet karayolu üzerinde bulunan kuzeydeki Birinci Roma Köprüsü'nden başlamış ve sırasıyla Odeion – Ziyaretçi Karşılama Merkezi – Zeus Tapınağı – Mozaikli Hamam – Sütunlu Cadde – İlk Borsa Binası – İkinci Roma Köprüsü – Roma Hamamı – Stadyum – Tiyatro yapılarını ziyaret etmiştir. QGIS yazılımında turist hareketine ilişkin GPS yörüngesi genelleştirilerek, başlangıç - varış noktaları belirlenmiş ve (başlangıç – varış) OD matrisi oluşturulmuş ve OD matrisinden de, yönlendirilmiş ağ yapısı ile ziyaretçi akışı simülasyon modeli oluşturularak zaman ve mekandaki davranış modelleri analiz edilmiştir. Şekil 4'te turist hareket akışı gösterilmektedir.



Şekil 4. Turistin hareketine ilişkin akış haritası

Turist, Birinci Roma Köprüsü'nde 5 dk. 34 sn., Odeion'da 2 dk. 12 sn., Ziyaretçi Karşılama Merkezi'nde 10 dk. 53 sn., Zeus Tapınağı'nda 34 dk. 42 sn., Mozaikli Hamam'da 3 dk. 7 sn., Sütunlu Cadde'de 2 dk. 47 sn., İlk Borsa Binası'nda 3 dk. 22 sn., İkinci Roma Köprüsü'nde 2 dk. 49 sn., Roma Hamamı'nda 3 dk. 47 sn., Stadyum'da 6 dk. 28 sn., ve Tiyatro'da 22 dk., 53 sn. zaman geçirmiştir. Şekil 5'te turistin Aizanoi Antik Kenti'ndeki tarihi alanlarda geçirdiği süreler gösterilmektedir. Turist, en fazla süreyi Zeus Tapınağı'nda ve Antik Tiyatro'da geçirmiştir.





Şekil 5. Turistin tarihi alanlarda geçirdiği süreler

Antik kente günümüze kadar ulaşan ve anıtsal yapıların en sağlam örneklerinden biri olan Zeus Tapınağı, altı basamaklı podyum üzerine inşa edilen Zeus Tapınağı, tonozlu ana mekânı (Cella) ile Anadolu’da Roma Dönemine ait yapılar arasında özgün plan şemasına sahiptir. Zeus Tapınağı, giriş mekânı (pronoas), orta mekân (naos), arka oda (opisthodomos) ve zemin altındaki tonozlu odası (cella) ile oldukça dikkat çekicidir. Oktastylös (sekiz sütunlu ön

cephesinde bulunan kolonlar kompozit, diğer kolonlar ise İon düzeninde inşa edilmiştir (Özer ve Korkmaz, 2014; Anonim, 2024). Çavdarhisar yerleşiminin hemen kenarında tüm ihtişamı ile ziyaretçileri karşılayan ve anıtsallığıyla hayranlık uyandıran tapınak Aizanoi'nin sembolü haline gelen yapılarından biridir. Zeus Tapınağı'nın en ilgi çekici parçalarından biri de, kadın figürlü akroterdir. Bu akroter, antik kente gelen ziyaretçilerin de ilk fotoğrafı çekmek istediği eserlerdendir. Tapınağın altındaki bölüm bir müze şeklinde düzenlenmiştir. Bu alanda mezar stelleri, sunaklar, İon başlıkları, Frigya kapı tipi mezar taşları, gladyatör mezar taşları bulunmaktadır. Bununla birlikte, tapınağın bulunduğu alan bugün açık hava müzesi niteliğinde olup, çeşitli dönemlere ait mezar stelleri de burada sergilenmektedir (Anonim, 2023) Turistin dijital ayak izleri incelendiğinde, bu ilgi çekici alanların tamamını ziyaret ettiği görülmektedir.

Aizanoi'deki Tiyatro yapısı, oturma basamakları sahne binasının kuzeyine, mevcut kireçtaşı kayaların üzerine yaslanır şekilde inşa edilmiştir. Yapılan araştırma kazıları ile yapının farklı dönemlerde yenileme işlemi geçirdiği ve bu yenileme işlemleri esnasında da genişletildiği tespit edilmiştir. Tiyatro yapısının sahne bölümü zengin mermer bezemelerle kaplanmıştır. Bu mermer bezemeler, farklı zamanlarda meydana gelen çeşitli depremlerden etkilenerek zarar görmüş, oturma basamaklarının ortasına yıkılmış ve sadece ilk katın kireçtaşı duvarları günümüze kadar ayakta kalabilmiştir. Sahne binasını süsleyen ve büyük özenle yapılmış mermer mimarideki bezemeler üzerine yapılan bilimsel araştırmalar neticesinde, yapının önce tek kat olarak inşa edildiği tespit edilmiştir. Daha sonra stadyum genişletilirken buraya da ikinci bir kat eklendiği tespit edilmiştir. Mermer parçaları üzerinde av sahnesi betimli kaliteli friz blokları özellikle ilgi çekmektedir (Rohn, 2008; Anonim 2024). Aynı aks üzerine, birbirine bitişik olarak inşa edilen Tiyatro-Stadyum Kompleksi bu özelliğiyle antik çağ dünyasının bilinen tek örneği olarak dikkat çekmektedir. Turistin tiyatro yapısındaki dijital ayak izleri incelendiğinde, bu ilgi çekici yapının çevresini, sahnesini, oturma basamaklarını ve mermer bezemeleri ziyaret ettiği görülmektedir.

## **5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada, Aizanoi Antik Kenti'ni ziyaret eden bir turistin zaman ve mekandaki hareket modelleri, gömülü bir GPS cihazına dayalı bir akıllı telefon uygulamasından elde edilen verilere dayanarak CBS ortamında analiz edilmiştir.

Öncelikle turistin dijital ayak izleri, GPS teknolojisi ile donatılmış bir akıllı telefon uygulaması olan Komoot kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra turistin dijital ayak izleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) formatına dönüştürülerek Aizanoi Antik Kenti'ni keşfederken nerede, nasıl, hangi zamanda bir cazibe merkezinden diğerine hareket ettiği analiz edilmiştir. Turist ziyaretinde, en fazla süreyi Zeus Tapınağı'nda ve Antik Tiyatro'da en az süreleri ise Roma Köprülerinde, Odeion'da Mozaikli Hamam'da Sütunlu Cadde'de İlk Borsa Binası'nda Roma Hamamı'nda ve Stadyum'da geçirmiştir. Ulaşılması kolay ve diğer mekanlarla kolayca etkileşime giren mekanlar ziyaretçiler için daha çekicidir (Zhang ve ark., 2020). Bu bağlamda, çevresindeki tarihi alanlarla kolayca etkileşime giren mekanlar oldukları için turistin, Zeus Tapınağı ve Antik Tiyatro'yu daha ilgi çekici bulduğu söylenebilir. Yoğun ziyaret edilen alanlarda, ziyaretçilerin aşırı kalabalıklaşmasını önlemek ve kültürel kalıntıları ve anıtları korumak için, tabelalar ziyaretçileri daha az ziyaret edilen alanlara yönlendirecek şekilde uygun şekilde yerleştirilebilir. Aynı zamanda, daha az ziyaret edilen alanlardaki sergi içerikleri ziyaretçileri çekmek için mümkün olduğunca zenginleştirilmelidir. Daha az popüler ve düşük görünürlüğe sahip mekanlar için, ziyaretçileri olabildiğince çekmek için önemli noktalara dikkat çekici navigasyon işaretleri yerleştirme yöntemi benimsenebilir veya daha az popüler mekanların görüntüleme içeriği zenginleştirilerek popüler mekanlara yönelen ziyaretçilerin baskısını paylaşmak için benimsenebilir. Turist, Antik Kentte yer alan Meter Steunene Kutsal Alanı ile Antik Baraj yapısını ziyaret etmemiştir. Bu tarihi alanlar, Aizanoi'nin merkezinden oldukça uzaktadırlar. Genel olarak, bir alanın yürüme erişilebilirliği ziyaretçi sayısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Li ve ark., 2017). Bu bağlamda, Meter Steunene Kutsal Alanı ile Antik Baraj yapısının uzakta olması ve yürüme erişilebilirliğinin kısıtlı olması dolayısıyla turist tarafından ziyaret edilmediği düşünülmektedir.

Çalışmanın sonuçları, Aizanoi Antik Kenti'ndeki kültürel miras destinasyonlarını yöneten yerel otoriteler için turist akışlarını yeniden dağıtmak, miras alanlarını korumak ve muhafaza etmek ve sürdürülebilir turizm kavramının daha iyi bir şekilde uyarlanması için ve turist deneyimini geliştirmek için bir rehber olarak kullanılabilir.

Bu çalışmanın sınırlılıklarından biri, çalışma alanında sadece bir turistin, zaman ve mekandaki hareket modelleri analiz edilmiştir. Çalışmanın diğer bir sınırlılığı ise, kullanılan verilerin, ziyaretçilerin sosyodemografik özelliklerini içermemesidir. Gelecek araştırmalar, GPS/GNSS teknolojilerini ve anketleri entegre ederek, çok sayıda turistin bir şehirde veya bir turistik cazibe merkezinin çevresinde hareket modellerini analiz edebilir. Bu sayede, dijital ayak izleri ile anket verileri birlikte değerlendirilerek analiz sonuçlarının doğruluğu önemli

ölçüde artırılabilir. Ağ bilgisi ve GPS/GNSS teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, internette paylaşılan seyahat yörünge bilgisi ve fotoğraflarının içeriği sürekli olarak daha çok ve kapsamlı hale gelmektedir. Mevcut veri miktarı artmaya devam edecek ve turistlerden toplanan bilgiler giderek daha da doğru olacaktır (Zhao ve ark., 2022). Pratik planlama uygulamaları için bu çalışmada uygulanan yöntemle elde edilen yürüyüş turu özellikleri ve turistlerin mekânsal tercihleri, turizmle ilgili planlama için etkili erken rehberlik sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- Anonim. (2023). <http://www.aizanoi.com/>, Erişim Tarihi: 02.07.2023.
- Anonim. (2024). <https://aizanoi.dpu.edu.tr/>, Erişim Tarihi: 12.10.2024.
- Aranburu, I., Plaza, B., & Esteban, M. (2016). Sustainable cultural tourism in urban destinations: Does space matter?. *Sustainability*, 8(8), 699.
- Claster, W., Pardo, P., Cooper, M., & Tajeddini, K. (2013). Tourism, travel and tweets: algorithmic text analysis methodologies in tourism. *Middle East Journal of Management*, 1(1), 81-99.
- Costa, J., Gomes, A., Stokes, M., & Saraiva, M. (2024). Recreational use of protected areas: spatiotemporal insights from the Wikiloc mobile app. *Current Issues in Tourism*, 1-21.
- Edwards, D., & Griffin, T. (2013). Understanding tourists' spatial behaviour: GPS tracking as an aid to sustainable destination management. *Journal of Sustainable Tourism*, 21(4), 580-595.
- Gillis, D., Lopez, A. J., & Gautama, S. (2023). An Evaluation of Smartphone Tracking for Travel Behavior Studies. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(8), 335.
- Hardy, A., Hyslop, S., Booth, K., Robards, B., Aryal, J., Gretzel, U., & Eccleston, R. (2017). Tracking tourists' travel with smartphone-based GPS technology: a methodological discussion. *Information Technology & Tourism*, 17, 255-274.
- Hardy, A., & Aryal, J. (2020). Using innovations to understand tourist mobility in national parks. *Journal of Sustainable Tourism*, 28(2), 263-283.
- Julio Guerrero, Y. I., & Dias, F. T. P. (2024). Tourist Tracking Techniques and Their Role in Destination Management: A Bibliometric Study, 2007–2023. *Sustainability*, 16(9), 3708.
- Jurišić, M., Plaščak, I., Rendulić, Ž., & Radočaj, D. (2023). GIS-based visitor count prediction and environmental susceptibility zoning in protected areas: a case study in Plitvice Lakes National Park, Croatia. *Sustainability*, 15(2), 1625.
- Komoot, (2024). Macera Rotaları, <https://www.komoot.com/>, Erişim Tarihi: 17.10.2024.
- Kovács, Z., Vida, G., Elekes, Á., & Kovalcsik, T. (2021). Combining social media and mobile positioning data in the analysis of tourist flows: A case study from Szeged, Hungary. *Sustainability*, 13(5), 2926.
- Landorf, C. (2009). Managing for sustainable tourism: a review of six cultural World Heritage Sites. *Journal of Sustainable tourism*, 17(1), 53-70.
- Li, X., Lv, Z., Zheng, Z., Zhong, C., Hijazi, I. H., ve Cheng, S. (2017). Assessment of lively street network based on geographic information

- system and space syntax. *Multimedia Tools and Applications*, 76, 17801-17819.
- Liu, W., Wang, B., Yang, Y., Mou, N., Zheng, Y., Zhang, L., & Yang, T. (2022). Cluster analysis of microscopic spatio-temporal patterns of tourists' movement behaviors in mountainous scenic areas using open GPS-trajectory data. *Tourism Management*, 93, 104614.
- Martin, B. D., Addona, V., Wolfson, J., Adomavicius, G., & Fan, Y. (2017). Methods for real-time prediction of the mode of travel using smartphone-based GPS and accelerometer data. *Sensors*, 17(9), 2058.
- Martins, M. R., da Costa, R. A., & Moreira, A. C. (2022). Backpackers' space-time behavior in an urban destination: The impact of travel information sources. *International journal of tourism research*, 24(3), 456-471.
- Martins, M. R., da Costa, R. A., & Chim-Miki, A. F. (2023). Backpackers' Space-time Behaviour in a World Heritage City—Porto. In *International Conference on Tourism, Technology and Systems* (pp. 303-316). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Mason, P. (2005). Visitor management in protected areas: From 'hard'to 'soft' approaches?. *Current issues in tourism*, 8(2-3), 181-194.
- Md Khairi, N. D., Ismail, H. N., & Syed Jaafar, S. M. R. (2022). Knowledge of tourist spatial behaviour to improve Melaka world heritage site management. *International Journal of Tourism Cities*, 8(1), 88-106.
- Özer, E., ve Korkmaz, H. (2014). Tarihsel Süreçte Aizanoi Kentindeki Dört Yapıda Tahirip ve Koruma. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (18), 11-20.
- Pettersson, R., & Zillinger, M. (2011). Time and space in event behaviour: Tracking visitors by GPS. *Tourism Geographies*, 13(1), 1-20.
- Richards, G. (2018). Cultural tourism: A review of recent research and trends. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 36, 12-21.
- Rohn, C. (2008). Der Theater-Stadium-Komplex von Aizanoi. Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation. *Yayınlanmamış Doktora Tezi*. Brandenburgischen Technischen Universität, Almanya.
- Shoval, N., Isaacson, M., & Chhetri, P. (2024). GPS, smartphones, and the future of tourism research. *The Wiley Blackwell companion to tourism*, 145-159.
- Uslu, A. (2023). Gönüllü coğrafi bilgi kullanılarak Dilek Yarımadası'ndaki doğa temelli rekreasyonel aktivitelerin haritalanması. *Tourism and Recreation*, 5(2), 66-78.

- Yun, H. J., Kang, D. J., & Lee, M. J. (2018). Spatiotemporal distribution of urban walking tourists by season using GPS-based smartphone application. *Asia Pacific Journal of Tourism Research*, 23(11), 1047-1061.
- Zhang, T., Lian, Z., ve Xu, Y. (2020). Combining GPS and space syntax analysis to improve understanding of visitor temporal–spatial behaviour: a case study of the Lion Grove in China. *Landscape Research*, 45(4), 534-546.
- Zhao, M., Zhang, Q., Shi, H., Liu, M., ve Liang, J. (2022). Exploring the Spatial Characteristics of Stay Areas in Walking Tours through the Lens of Volunteered GPS Trajectories: A Case Study of the Zhuhai–Macao Metropolitan Area. *Forests*, 13(11).
- Zolfani, S. H., Sedaghat, M., Maknoon, R., & Zavadskas, E. K. (2015). Sustainable tourism: a comprehensive literature review on frameworks and applications. *Economic research-Ekonomska istraživanja*, 28(1), 1-30.

## 4. Bölüm

# PORTAKAL KABUĞUNUN KURUTULMASINDA ULTRASON DESTEKLİ OZMOTİK KURUTMA İŞLEMİNİN ETKİSİ

Şevki HOKKAÖMEROĞLU<sup>1</sup>,  
Burçin YILMAZ<sup>2\*</sup>

---

<sup>1</sup> Öğrenci, Yozgat Bozok Üniversitesi, Boğazlıyan Meslek Yüksekokulu, Yozgat, Türkiye

<sup>2</sup> Öğr. Gör. Dr. Yozgat Bozok Üniversitesi, Boğazlıyan Meslek Yüksekokulu, Yozgat, Türkiye. ORCID ID: 0000-0003-0719-4090, burcin.yilmaz@bozok.edu.tr,



## Özet

Portakal genellikle meyve suyu üretiminde kullanılmak üzere yetiştirilen bir ürün olup, işlem sonrası yüksek miktarda kabuk açığa çıkmaktadır. Gıda işleme atıkları çeşitli sektörlerde değerlendirilebilir olsa da yüksek depolama kapasitesine ihtiyaç duyulması ve ürünlerin kısa sürede bozulabilir olması kurutma gibi uygulamaları gerekli kılmaktadır. Enerji yoğun bir yöntem olan konvektif kurutmada maliyetleri azaltmak açısından ultrason ya da ozmotik kurutma gibi ön işlemler uygulanabilmektedir. İki yöntemin de ürün üzerindeki etkisi farklı mekanizmalara dayanmakta ve bir arada kullanımı sayesinde ön işlem etkinliğinde artış elde edilebilmektedir. Çalışma kapsamında örneklerde ön işlem sırasında sıvı kaybı-katı kazanımı, kuruma kinetiğinin belirlenmesi, kurutulmuş ürünlerde rehidrasyon ve duyu analizi gerçekleştirilmiştir. Ozmotik çözelti olarak 30 ve 45 °Bx şeker çözeltileri kullanılmış olup örneklerde ön işlem sırasında katı kazanımı meydana gelmiştir. Ultrasonik ön işlem 0 ve 30 °Bx çözeltileri kullanıldığında kuruma hızında artış sağlamış ancak 45 Bx çözeltisi için aynı sonuç elde edilmemiştir. Rehidrasyon oranlarında önemli farklılıklar gözlenmezken, tat ve genel beğeni açısından ön işlemde 45 °Bx çözeltisinin kullanıldığı kurutulmuş portakal kabuğu ile hazırlanan ıhlamur çayının daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## 1. Giriş

Portakal, dünya çapında en çok tercih edilen meyvelerden birisidir. Toplam portakal mahsülünün yaklaşık olarak %20'si bütün meyve olarak satılmakta, geri kalan kısmı ise meyve suyu, ekstrakt ya da farklı ürün üretiminde kullanılmaktadır. Meyve suyu veriminin portakal ağırlığının %40-60 düzeyinde olduğu göz önüne alındığında her yıl büyük miktarda portakal kabuğu ortaya çıkmaktadır (Tamer vd., 2016). Gıda işleme atıkları gıda ya da yem olarak kullanılmasının yanı sıra farklı sektörlerde ya da daha değerli ürünlerin üretilmesinde kullanılabilir (Manjarres-Pinzon vd., 2013). Ancak işleme tesisleri çok miktarda yan ürün açığa çıkardığı için bu ürünlerin depolanması ve korunması konusunda bir takım zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu yan ürünlerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla bozulma başlamadan önce kurutulması gerekmektedir (Tamer vd., 2016). Bununla birlikte portakal kabuğunun duyuusal açıdan kabul edilebilirliğini arttırmak için şeker çözeltisi kullanılabilir (Manjarres-Pinzon vd., 2013). Literatürde Meksika zencefili (Garcia-Toledo vd., 2015), muz (Fernandes vd., 2006; Chavan vd., 2010), kivi (Bialik vd., 2020), elma (Moura vd., 2005) gibi farklı gıda örneklerinde ozmotik kurutma uygulamasının yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

Kurutma, katı ya da katı hale yakın özellikteki materyalden suyun buharlaştırılarak uzaklaştırılması işlemidir. Bu sayede üründe düşük su aktivitesine bağlı olarak mikrobiyel stabilite sağlanarak daha uzun bir raf ömrü elde edilebilmektedir (Aghbashlo vd., 2009). Ayrıca üründe meydana gelen hacimsel ve kütleli azalma, taşıma ve depolamayı daha ekonomik hale getirmesinin yanı sıra depolama için ihtiyaç duyulan soğutma sistemlerinin kullanımını da gereksiz kılmaktadır (Guiné, 2006). Uygulanan işlem şartlarına bağlı olarak son ürünün kalitesi üzerinde değişiklikler meydana getirmektedir. Dondurarak kurutma ya da vakum ortamında kurutma, yüksek kalitede ürün eldesi amacıyla kullanılabilir (Çağlayan ve Barutçu, 2018). Ancak gıda sanayinde genellikle konvektif kurutma uygulanmaktadır ve oldukça yoğun bir enerji tüketimi bulunmaktadır. Artan enerji maliyetleri günümüzde kurutma yöntemlerinin giderek pahalılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kurutma süresini azaltmak için ürünün başlangıç nemini değiştiren veya dokusunda değişiklikler yaratan yöntemler önerilmektedir. Ultrason, bu yöntemlerden biri olup, hem ön işlem olarak hem de kurutma sırasında kullanılabilir (Nowacka vd., 2012). Örneğin, muz (Azoubel vd., 2010), papaya (Fernandes vd., 2008a), kavun (Fernandes vd., 2008b) gibi gıda örneklerinde ultrason ön işlemi uygulanarak yapılan kurutmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Ultrason, insan kulağının duyabileceğinden daha yüksek frekanstaki ses dalgaları olup frekansa (20 kHz-10 MHz) bağlı olarak fiziksel/ kimyasal etkisi için ya da görüntüleme amacıyla kullanılabilir (Chin vd., 2013) 20 kHz-1MHz frekans aralığında çalışabilen yüksek şiddetli ultrason ile herhangi bir materyal üzerinde temizleyici ya da emülsifiye edici etkiler gerçekleştirilebilmektedir (Sun vd., 2005). Ultrason dalgaları, ürün üzerinde sıkışma ve genişleme şeklinde basınç değişimlerine yol açar. Bu etki, süngerin sıkılıp bırakılmasına benzetildiği için "sünger etkisi" olarak adlandırılmaktadır (Fernandes vd., 2009). Dalgaların oluşturduğu bu gerilim, ürün üzerinde mikro kanalların oluşmasını sağlar ve hücre içindeki suyun dışarı çıkmasını kolaylaştırmaktadır (Garcia-Pérez vd., 2007).

Ultrason uygulaması sıvı içerisinde yapıldığında sıvı veya ürün içerisinde bulunan gaz baloncukları sürekli olarak büyüyüp küçülmektedir. Baloncuk hacmi kritik bir noktaya ulaştığında sönmülenerek büyük bir enerji yayılmasına neden olmaktadır. Bu durum kavitasyon olarak adlandırılmakta ve ürün üzerinde fiziksel bir etki gözlenmektedir (Villamiel and Soria, 2010). Kavitasyon sonucunda bölgesel olmakla birlikte sıcaklıkta 5000 K'e, basınçta ise 1000 atm'ye varan bir artış meydana gelmektedir (Barbaso-Canovas vd., 2010). Ultrason dalgalarının oluşturduğu kavitasyon baloncukları, sıvı içindeki katı yüzeylere doğru asimetrik hareket eder ve bu yüzey doğrultusunda mikrojeterin oluşmasına neden olur. Ortamda meydana gelen mikro ölçekte karıştırma sonucunda katıdan sıvıya madde geçişine katkıda bulunmaktadır. Bu etkinin ozmotik kurutma sırasında kütle transferine katkı sağladığı düşünülmektedir (Carcel et al., 2007). Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde elma (Cichowska vd., 2019; Salehi vd., 2022), erik (Rahaman vd., 2019; Li vd., 2021), balkabağı (Çağlayan ve Mazı, 2018), çilek (Garcia-Noguera vd., 2010), kivi (Nowacka vd., 2017; Salehi vd., 2023), ananas (Ahmad ve Zaidi, 2023), papaya (Chandra vd., 2023), patates (Cheng vd., 2023) gibi farklı gıdalarda ultrason destekli ozmotik kurutma işleminin uygulandığı görülebilmektedir.

Bu çalışmada, portakal kabuğu, ultrason kullanılarak ya da kullanılmadan farklı konsantrasyonlardaki şeker çözeltiler ile işlem den geçirilmiş ve ardından 50°C'de kabin tipi kurutucu ile kurutulmuştur. Kuruma kinetiği için en uygun model belirlenmiş ve ön işlemlerin kuruma hızı ile örnek üzerine etkisi incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Yerel satış noktalarından belli aralıklarla taze portakal temin edilerek karanlık ortamda +4 °C'de 1 haftayı geçmeyecek şekilde saklanmıştır. Kullanılacak portakal çeşme suyunda yıkandıktan sonra manuel şekilde kabukları soyulmuş ve 10 mm x10 mm ölçülerinde kesilmiştir. Elde edilen kabukların nem tayini Tüfekçi ve Özkal (2020)'a göre yapılarak 105°C'de gerçekleştirilmiştir.

Yerel marketlerden temin edilen kristal toz şeker (sakkaroz) ile %30 ve %45 (a/h) oranında şeker içeren çözeltiler hazırlanmış ve ozmotik kurutma için kullanılmıştır.

### 2.2. Metot

#### 2.2.1. Ön işlemlerin Uygulanması

Ozmotik kurutma işlemi için ultrason banyosu (General Home AS-8772-50 W) ya da manyetik karıştırıcı (Scilogex MS-H-S) kullanılmış ve örnek çözelti oranı ¼ (a/h) olacak şekilde ayarlanmıştır (Çağlayan ve Mazı 2018). Ultrason oda sıcaklığında uygulanmış, manyetik karıştırıcı ise 110 rpmde (Moura vd., 2005) oda sıcaklığında kullanılmış ve her iki yöntem de 10 ya da 20 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Hipertonik çözeltinin etkinliğini belirlemek için aynı işlemler sadece saf su kullanılarak da uygulanmıştır.

#### 2.2.2. Sıvı Kaybı-Katı Kazanımı / Katı Kaybı-Sıvı Kazanımı

Katı ve sıvı materyallerin bir arada bulunduğu ortamlarda kütle transferinden bahsedilebilmektedir. Ozmotik çözeltilerin ya da saf suyun kullanıldığı ön işlemler sırasında üründe meydana gelen sıvı kaybı ve katı kazanımı değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır (Li vd., 2021).

$$\text{Sıvı kaybı (\%)} = \left( \frac{M_0 x_0 - M_t x_t}{M_0} \right) \times 100$$
$$\text{Katı kazanımı (\%)} = \left( \frac{M_t s_t - M_0 s_0}{M_0} \right) \times 100$$

Burada,  $M_0$  ozmotik kurutma öncesi örneğin ağırlığı (g),  $M_t$  ozmotik kurutma sonrası örneğin ağırlığı (g),  $x_0$  ve  $x_t$  başlangıç ve ön işlem sonrası örneklerin su içeriği (g/g yaş esas),  $s_0$  ve  $s_t$  ise başlangıç ve işlem sonrası kuru madde içeriğini (g/g yaş esas) göstermektedir.

### 2.2.3. Kurutma İşlemi

Ön işleminden geçirilen örnekler, saf su ile yıkanarak yüzeydeki çözeltileri uzaklaştırıldıktan sonra filtre kağıdı ile kurulanmış ve kurutma cihazının (Klarstein Arizona 500 W) tepsisine yerleştirilmiştir. Kurutma işlemi 50°C’de 0,8 m/s hava hızı ile örnekler sabit tartıma ulaşana dek sürdürülmüştür. Belli periyotlarda tartım yapılarak örneklerin kuruma eğrileri oluşturulmuş ve kurutmanın hangi kinetik model ile uyumlu olduğu MATLAB (MathWorks, Inc, USA) programı kullanılarak belirlenmiştir. Kurutulan örnekler oda sıcaklığına geldikten sonra buzdolabı poşetine konulmuş ve kapaklı cam kavanoz içerisinde serin bir ortamda saklanmıştır. Kuruma kinetiğinin model uyumunu incelemek amacıyla Lewis, Page, Midilli et al., Modified Midilli et al. ve Henderson and Pabis tarafından oluşturulan modeller değerlendirilmiştir (Yılmaz vd., 2019). Kuruma davranışını açıklayan en iyi modelin belirlenmesinde en yüksek R<sup>2</sup>, en düşük  $\chi^2$  ve RMSE değerleri dikkate alınmıştır (Küçük vd, 2014).

Model Adı	Denklem
Lewis	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Modified Midilli et al.	$MR = \exp(-kt^n) + bt$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$

### 2.2.4. Rehidrasyon Oranı

Örneklerin hangi oranda suyu geri kazanabildiklerini belirlemek amacıyla 1±0,1 gram örnek üzerine 50 ml oda sıcaklığında saf su eklenerek 2 saat bekletilmiş ve rehidrasyon oranı hesaplanmıştır (Yılmaz vd., 2019).

$$\text{Rehidrasyon oranı} = \frac{\text{Rehidrasyon sonrası ağırlık (g)}}{\text{Rehidrasyon öncesi ağırlık (g)}}$$

### 2.2.5. Duyusal Analiz

Çeşitli ön işlemler ile kurutulan örnekler, sıcak su ile hazırlanan ıhlamur çayı içerisine eklenerek 5 dakika bekletilmiştir. Yaklaşık olarak 4 gram öğütülmüş ıhlamur ve 3 gram kurutulmuş portakal kabuğu üzerine 400 mL sıcak su eklenerek çay karışımı hazırlanmıştır. İçeceklerin tat ve görünüş özellikleri sıralama testi kullanılarak öğrencilerden oluşan panelist grubu tarafından

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Duncan testi kullanılarak %95 güvenirlilik seviyesinde değerlendirilmiştir (İçier vd., 2015).

### **2.2.6. İstatistiksel Analiz**

Tüm analizler 3 paralel olarak gerçekleştirilmiş ve bulunan değerler istatistiksel açıdan SPSS (IBM, USA) paket programı kullanılarak %95 güvenirlilik seviyesinde Tukey testi ile incelenmiştir.

## **3. Bulgular ve Tartışma**

### **3.1 Sıvı Kaybı-Katı Kazanımı / Katı Kaybı-Sıvı Kazanımı ve Rehidrasyon Oranı**

Meyve ve sebze dokularından ozmotik çözeltiye nem transferinde itici güç hipertonic çözeltilinin daha yüksek ozmotik basınca sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Salehi vd., 2023). Farklı oranlarda (30 ve 45 Bx) şeker içeren çözeltilerin kullanıldığı durumda portakal kabuğundan çözeltiye sıvı geçişi olurken, çözeltiden kabuğa katı geçişi meydana gelmektedir. Saf suyun kullanıldığı durumda ise örnekten kabuğa sıvı geçişi nedeniyle sıvı kazanımı, kabuktan sıvıya katı geçişi sonucunda ise katı kaybı meydana gelmesi söz konusudur.

Portakal kabuğu örneklerinde uygulanan ön işlem sonucunda meydana gelen sıvı kaybı-katı kazanımı miktarları ile kurutulmuş kabuğun rehidrasyon oranı Tablo 3.1’de verilmiştir. Sıvı kaybı sonuçları incelendiğinde, saf su kullanılarak yapılan ön işlem ile en yüksek oranlarda su kazanımı meydana gelmiştir. Manyetik karıştırıcı kullanılarak uygulanan 20 dakikalık işlem sonucunda, diğer ön işlemlere göre en yüksek miktarda su kazanımı olduğu görülmüştür. Ön işlemde kullanılan çözeltilerde şeker oranındaki artışın, sıvı kazanımını azalttığı belirlenmiş ve en düşük sıvı kazanımı 45 °Bx çözeltisi ile 20 dakikalık manyetik karıştırma (45 Bx M20) ön işleminde elde edilmiştir.

Ozmotik çözelti kullanılarak yapılan kurutma işlemlerinde gözlemlendiği gibi, ön işlem sırasında hipertonic çözeltilinin yapıdaki suyun azaltılmasında değişen oranlarda etkili olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Karıştırma ya da ultrason gibi fiziksel etki gösteren yöntemlerin uygulama süresinde artış yapılması aynı Brix değerleri içerisinde 45 °Bx M10 kodlu örnek haricinde, yapıya daha çok sıvı alınmasına neden olmuştur. Katı kazanımı açısından incelendiğinde, şeker içeren çözeltilerle yapılan ön işlemler, yapıya katı geçişi sağlamıştır. Sıvı kaybında olduğu gibi artan işlem süresi katı kazanımını artırmıştır. Saf su ile yapılan işlemlerde ise örnek yapıya su aldığı gibi, aynı zamanda suda çözünen katı kaybına uğramıştır. Ön işlem sonuçları karşılaştırıldığında, artan şeker konsantrasyonunun ve uygulama süresinin, ozmotik kurutma etkinliği

gösterdiği tespit edilmiştir. Ultrason işleminin kavitasyon ve mikrojetler sayesinde kütle transferinde artış meydana getirmesi beklenmektedir (Selehi vd., 2023). Ancak elde edilen sonuçlar incelendiğinde 30 ve 45 °Bx şeker çözeltileri kullanılan durumlarda manyetik karıştırıcı ve ultrason farkı belirlenememiştir. En yüksek katı kazanımı durumunun 30 Bx U20 (30 °Brix çözeltisi ile 20 dakika ultrason) ön işlemleri ile elde edildiği ve bunun 45 Bx U20 ön işleminden yüksek olmasının, örneğin kendisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 45 °Bx şeker çözeltisi kullanılan ön işlemlerde, saf su kullanılan duruma göre sıvı kaybı ya da katı kazanımı açısından anlamlı ( $p<0,05$ ) bir farklılık meydana gelmiştir. Benzer sonuçlar 60 °Bx sükröz ya da früktoz çözeltileri kullanılarak ultrason destekli ozmotik kurutma ön işlemi uygulanan ananaslarda da elde edilmiştir (Ahmad ve Zaidi, 2023)

**Tablo 3.1** Sıvı kaybı-katı kazanımı ve rehidrasyon oranı

Örnek Kodu	Sıvı Kaybı	Katı Kazınımı	Rehidrasyon Oranı
Ön işlemsiz	-	-	3,5576 ± 0,3863 <sup>a,b,c</sup>
0 Bx M10	-32,6076 ± 0,7533 <sup>a</sup>	-1,6896 ± 0,2776 <sup>a,b</sup>	3,6868 ± 0,5250 <sup>a,b,c</sup>
0 Bx M20	-37,2910 ± 3,3982 <sup>a</sup>	-2,1342 ± 0,2142 <sup>a</sup>	4,3190 ± 0,4888 <sup>a,b,c</sup>
0 Bx U10	-29,8743 ± 0,2776 <sup>a</sup>	-2,3864 ± 0,7533 <sup>a,b,c</sup>	3,9168 ± 0,5249 <sup>c</sup>
0 Bx U20	-31,1936 ± 0,2142 <sup>a</sup>	-4,0825 ± 0,7844 <sup>a,b,c</sup>	3,0977 ± 0,2294 <sup>a</sup>
30 Bx M10	-9,5275 ± 2,7911 <sup>b,c,d</sup>	0,2193 ± 0,2360 <sup>b,c</sup>	3,1663 ± 0,1822 <sup>a</sup>
30 Bx M20	-12,187 ± 1,5353 <sup>b</sup>	7,0427 ± 0,5349 <sup>e</sup>	4,4181 ± 0,3786 <sup>a</sup>
30 Bx U10	-16,4965 ± 2,3694 <sup>b</sup>	3,5428 ± 1,5469 <sup>d</sup>	2,9668 ± 0,3414 <sup>a,b</sup>
30 Bx U20	-19,1419 ± 7,7841 <sup>b,c</sup>	8,4278 ± 0,1446 <sup>d,e</sup>	2,8925 ± 0,1419 <sup>a</sup>
45 Bx M10	-5,2985 ± 0,3894 <sup>b,c,d</sup>	6,6295 ± 0,9038 <sup>e</sup>	3,0524 ± 0,0377 <sup>a</sup>
45 Bx M20	-2,5149 ± 0,9254 <sup>d</sup>	6,7308 ± 0,0368 <sup>e</sup>	2,9101 ± 0,0107 <sup>a</sup>
45 Bx U10	-2,8525 ± 0,2328 <sup>c,d</sup>	6,2718 ± 0,8075 <sup>d,e</sup>	2,8559 ± 0,2473 <sup>a</sup>
45 Bx U20	-6,2765 ± 1,7388 <sup>c,d</sup>	8,0510 ± 0,0809 <sup>e</sup>	2,7856 ± 0,1138 <sup>a</sup>

<sup>ac</sup> Aynı sütunda farklı harfler istatistiksel farklılığı göstermektedir. ( $p<0,05$ )

Bx: Çözeltilerin Brix değeri, M10: 10 dk manyetik karıştırma, M20: 20 dk manyetik karıştırma, U10: 10 dk ultrason uygulaması, U20: 20 dk ultrason uygulaması

Rehidrasyon oranları incelendiğinde, sıvı ortamın şeker konsantrasyonu kurutulmuş örneklerin rehidrasyon oranında önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır ( $p>0,05$ ). Benzer şekilde ön işlem yönteminin de bu değer üzerinde bir değişikliğe neden olmadığı ( $p>0,05$ ) söylenebilmektedir. Salehi vd. (2023) ultrason destekli ozmotik kurutma ön işlemiyle kuruttukları kivi dilimlerinin rehidrasyon oranlarını incelediklerinde ürün yapısı ile ultrason yoğunluğu, şeker

konsantrasyonu ve işlem süresinin bu parametre üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir.

### 3.2. Kuruma Kinetiği

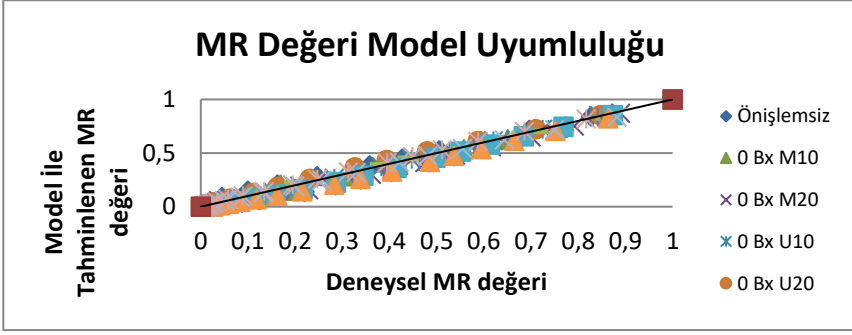
Ön işlem uygulanmış ya da uygulanmadan kurutulmuş örneklerin kuruma kinetikleri ile daha önce belirtilen modellerin uyumu MATLAB programı kullanılarak belirlenmiştir. Kuruma davranışını açıklayan modelin belirlenmesinde  $R^2$ ,  $\chi^2$  ve RMSE değerleri dikkate alınmıştır. İlgili değerler Tablo 3.3'te gösterilmiştir. En yüksek  $R^2$  ile en düşük  $\chi^2$  ve RMSE değerleri incelenerek model uyumluluğu araştırılmıştır. Bu parametreler doğrultusunda ön işlemlili ya da ön işlemsiz kurutma çalışmasını en iyi betimleyen modelin Modified Midilli et al. modeli olduğuna karar verilmiştir. Başka bir çalışmada herhangi bir ön işlem görmeden portakal kabuğunun 50 C'de 1 m/s hava hızı ile konvektif kurutulmasında kuruma kinetiğini açıklayan en iyi modelin Page olduğu belirtilmiştir (Phuon vd., 2021). Proses şartlarının kuruma davranışı üzerinde etkisi olduğu söylenebilmektedir. Farklı ön işlemler uygulanarak kurutulmuş portakal kabuğunun kuruma kinetiği ve model uyumu katsayıları Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Kuruma kinetiğini en iyi açıklayan modelin katsayıları

Modified Midilli et al.			
Ön işlem	k	n	b
Ön işlemsiz	0,01899	0,95177	-0,00010
0 Bx M10	0,01448	1,01747	-0,00001
0 Bx M20	0,01244	-0,00001	1,04100
0 Bx U10	0,01538	1,01407	-0,00003
0 Bx U20	0,01476	-0,00001	1,02800
30 Bx M10	0,02308	-0,00006	0,88113
30 Bx M20	0,01936	-0,00006	0,92143
30 Bx U10	0,02343	-0,00006	0,89823
30 Bx U20	0,02563	-0,00007	0,85927
45 Bx M10	0,02009	-0,00008	0,89037
45 Bx M20	0,02745	-0,00007	0,84117
45 Bx U10	0,02298	-0,00007	0,88593
45 Bx U20	0,02923	-0,00007	0,82907

Uyumlu olduğu düşünülen model ile hesaplanan MR değerleri ve deneysel MR değerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir. İlgili modelin deneysel verileri karşıladığı söylenebilmektedir.





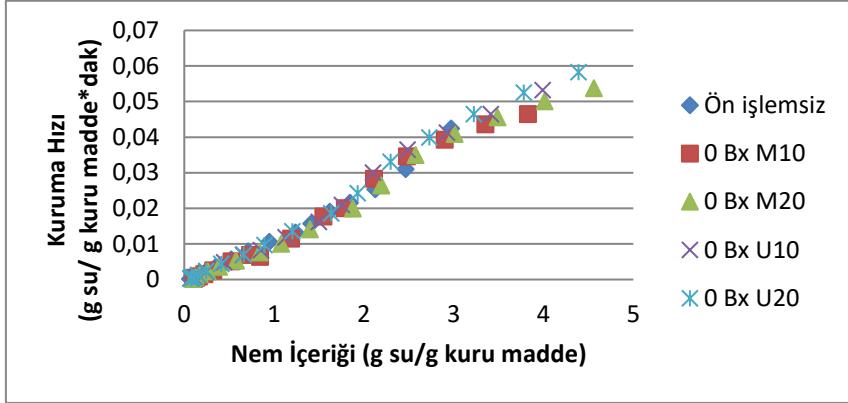
**Şekil 3.1.** Tüm örnekler için deneysel ve Modified Midilli et al. modelinden tahminlenen MR değerleri

**Tablo 3.3.** İncelenen kuruma kinetiği modellerine ait regresyon değerleri

Ön İşlem Türü	Lewis			Page			Midilli et al.			Modified Midilli et al.			Henderson and Pabis		
	$R^2$	$RMSE$	$\chi^2$	$R^2$	$RMSE$	$\chi^2$	$R^2$	$RMSE$	$\chi^2$	$R^2$	$RMSE$	$\chi^2$	$R^2$	$RMSE$	$\chi^2$
Ön işlemsiz	0,9970	0,017357	0,000279	0,9974	0,016330	0,000216	0,9981	0,014807	0,000318	0,9982	0,013866	0,000248	0,9970	0,017987	0,000221
0 Bx M10	0,9975	0,016510	0,000273	0,9986	0,012340	0,000166	0,9986	0,012905	0,000183	0,9986	0,012689	0,000175	0,9983	0,013656	0,000196
0 Bx M20	0,9990	0,010103	0,000107	0,9996	0,006998	0,000050	0,9997	0,006653	0,000045	0,9996	0,006608	0,000045	0,9994	0,008744	0,000079
0 Bx U10	0,9985	0,012770	0,000116	0,9988	0,011370	0,000113	0,9989	0,034687	0,000404	0,9989	0,010948	0,000119	0,9986	0,012667	0,000118
0 Bx U20	0,9994	0,007886	0,000068	0,9997	0,005689	0,000033	0,9998	0,005549	0,000032	0,9998	0,005438	0,000030	0,9995	0,007217	0,000056
30 Bx M10	0,9953	0,019110	0,000450	0,9992	0,009106	0,000086	0,9996	0,006479	0,000046	0,9996	0,006451	0,000046	0,9972	0,015918	0,000287
30 Bx M20	0,9977	0,015173	0,000239	0,9987	0,011850	0,000142	0,9992	0,009901	0,008974	0,9992	0,009636	0,007725	0,9982	0,014027	0,000201
30 Bx U10	0,9971	0,016329	0,000289	0,9989	0,010506	0,000116	0,9995	0,007925	0,000066	0,9995	0,007837	0,000064	0,9981	0,013936	0,000203
30 Bx U20	0,9947	0,021920	0,000510	0,9992	0,009315	0,000088	0,9996	0,006660	0,000250	0,9996	0,006573	0,000212	0,9967	0,018043	0,000338
45 Bx M10	0,9971	0,016298	0,000289	0,9992	0,009319	0,000089	0,9997	0,005328	0,000029	0,9997	0,005251	0,000029	0,9982	0,013475	0,000284
45 Bx M20	0,9942	0,023720	0,001692	0,9992	0,009289	0,001149	0,9998	0,005026	0,000352	0,9998	0,004877	0,000319	0,9966	0,018760	0,001490
45 Bx U10	0,9953	0,018669	0,000453	0,9987	0,011070	0,000135	0,9996	0,007680	0,000199	0,9995	0,007711	0,000176	0,9973	0,015620	0,000285
45 Bx U20	0,9932	0,025530	0,000693	0,9991	0,009569	0,000088	0,9998	0,004910	0,000301	0,9998	0,004768	0,002776	0,9961	0,019933	0,000423

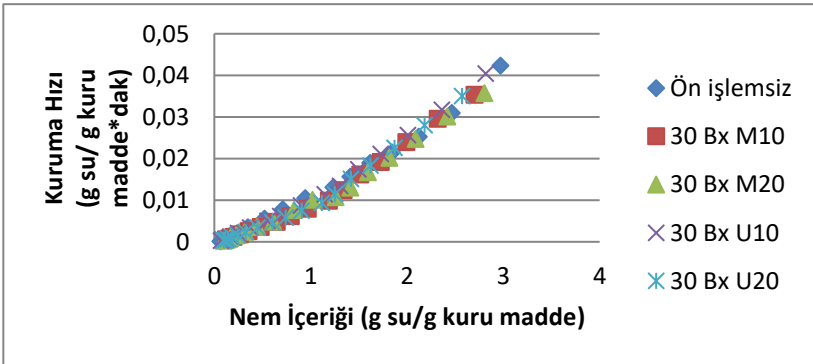
### 3.3. Kuruma Hızı

Kuruma hızına karşılık nem içeriği grafiği incelendiğinde 0 °Bx çözeltisi ile yapılan ön işlemler sonucunda ultrason banyosunun kullanıldığı durumlarda kuruma hızında diğerlerine göre artış olduğu gözlenmiştir.



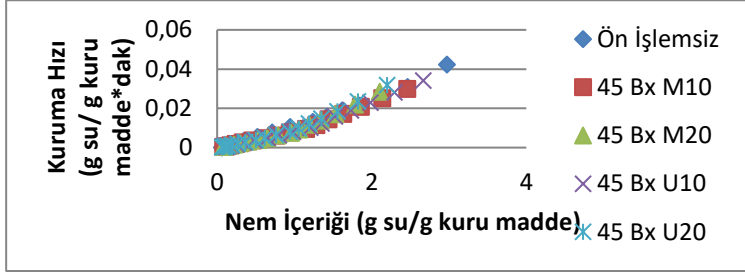
Şekil 3.2. 0 Bx çözeltisi ile elde edilen kuruma hızı eğrileri

30 °Bx çözeltisinin kullanılması ile kuruma hızında meydana gelen değişim grafiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Ultrasonik işlemin manyetik karıştırma ve ön işlemsiz kurutmaya göre kuruma hızında artış sağladığı sonucuna ulaşılmaktadır.



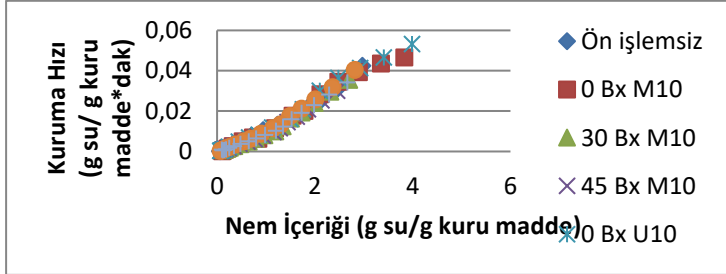
Şekil 3.3. 30 Bx çözeltisi ile elde edilen kuruma hızı eğrileri

45 °Bx çözeltisi ile yapılan işlemlerde ise manyetik karıştırma ya da ultrasonik ön işlemin, ön işlemsiz kurutmaya göre kuruma hızı üzerine olumlu etkisi görülmemiş ve 20 dakika uygulanmış işlemlere göre daha düşük bir kuruma hızı sergilemiştir. İlgili kuruma hızı eğrileri Şekil 3.4.'te sunulmuştur.



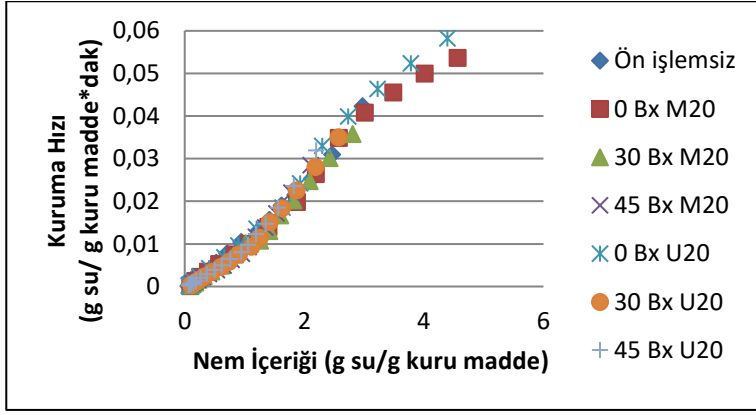
Şekil 3.4. 45 Bx çözeltisi ile elde edilen kuruma hızı eğrileri

Şekil 3.5. incelendiğinde 10 dakika ön işlem uygulanmış ve ön işlemsiz kurutmada, artan çözelti konsantrasyonunun kuruma hızında azalmaya neden olduğu, 0 °Bx çözeltisi kullanıldığı durumda ise ultrasonik ön işlemin kuruma hızında manyetik karıştırma yöntemine göre artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Kuruma süresi boyunca azalan nem içeriği ile birlikte kuruma hızındaki değişim daha düşük seviyede kalmıştır. Üründe bulunan nem içeriğinin sabit kalmaması nedeniyle, kuruma hızında azalma gözlenmesi, konvektif kurutmada karşılaşılan bir durumdur.



Şekil 3.5. 10 dakikalık ön işlem uygulanmış örneklerde kuruma hızı eğrileri

20 dakikalık ön işlemlerde ise kurumanın başlangıcında 0 Bx U20 uygulamasının kuruma hızında artış sağladığı ancak devam eden kuruma sürecinde nem içeriğinin düşmesine bağlı olarak kuruma hızının diğer işlemler ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ön işlem sırasında ürünün su içeriğindeki artış nedeniyle kuruma hızında artış yaşandığı düşünülmektedir. İlgili kuruma hızı eğrileri Şekil 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3.6. 20 dakikalık ön işlem uygulanmış örneklerde kuruma hızı eğrileri

### 3.4. Duyusal Analiz

Hazırlanan çay karışımları tek kullanımlık bardaklarda servis edilerek 17 eğitilmemiş panelist ile duyusal analiz yapılmıştır. Bu amaçla portakal kabuğu bulunmayan, ön işlemsiz kurutulmuş portakal kabuğu bulunan ve 30 ile 45 °Bx çözeltilerinde ultrason ile ön işleme (20 dk) tabi tutularak kurutulan portakal örneklerini içeren çaylar hazırlanmıştır. Renk, koku, tat ve genel beğeni kriterleri açısından sıralama testi ile 1 (en az beğendim) - 4 (en çok beğendim) arasında değerlendirilmiştir. Panelist sonuçları Duncan çoklu karşılaştırma testi ile analiz edilmiş ve toplam puanları Tablo 3.4'te belirtilmiştir. Koku kriteri açısından örnekler arasında anlamlı bir fark görülmemişken ( $p>0.05$ ), 35 ve 45 Bx U20 örnekleri renk açısından kontrol örneğinden farklı bulunmuştur ( $p>0.05$ ). Tat ve genel beğeni açısından bakılacak olduğunda kontrol örneğinin (portakal kabuğu içermeyen ıhlamur çayı) ve ön işlemsiz kurutulan portakal kabuğu içeren örneğin benzer puanı aldığı ve bu kriterler açısından tercih edilen en iyi örneğin ( $p>0.05$ ) 45 °Bx çözeltisi ile ön işlem uygulanarak kurutulan portakal kabuğu ile hazırlanan ıhlamur çayı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 3.4.** Duyusal analiz toplam puanları

Ön işlem	Renk	Koku	Tat	Genel Beğeni
Kontrol	32 <sup>a</sup>	36 <sup>a</sup>	34 <sup>a</sup>	35 <sup>a</sup>
Ön işlemsiz	38 <sup>a,b</sup>	42 <sup>a</sup>	38 <sup>a</sup>	35 <sup>a</sup>
30 Bx U20	50 <sup>b</sup>	47 <sup>a</sup>	46 <sup>a,b</sup>	47 <sup>a,b</sup>
45 Bx U20	50 <sup>b</sup>	45 <sup>a</sup>	52 <sup>b</sup>	53 <sup>b</sup>

<sup>ab</sup> Aynı sütunda farklı harfler istatistiksel farklılığı göstermektedir .

#### **4. Sonuç**

Bu çalışmanın amacı atık olarak nitelendirilen portakal kabuğunun kurutularak aroma verici özelliği olan bir ürün haline dönüştürülmesidir. Ön işlem olarak farklı çözeltiler içerisinde ultrason ya da manyetik karıştırıcı kullanılmasının konvektif kurutma sürecindeki üzerindeki etkisinin yanı sıra ön işlem sırasında örneklerde meydana gelen katı-sıvı kaybı da incelenmiştir. Kurutulmuş örneklerin rehidrasyon oranı belirlenerek, ıhlamur çayına eklenmesi ile duyuşal özelliklere katkısı analiz edilmiştir. Kuruma kinetiği sonuçlarına göre 0 ve 35 °Bx çözeltilerinin kullanıldığı durumlarda ultrasonik ön işlem kuruma hızında artış sağlarken, 45 °Bx çözeltisinde pozitif etki gözlenmemiştir. Ayrıca artan çözelti konsantrasyonunun ön işlem yöntem ya da süresinden bağımsız olarak konvektif kuruma süresini uzattığı sonucuna ulaşılmıştır. Ön işlem sırasında katı sıvı kaybının ortamdan etkilendiği belirlenmiş olmakla birlikte konsantrasyon, yöntem ya da süreye bağılı bir koşul tespit edilememiştir. Bu durum örneğin yapısındaki değışkenlikle ilişkilendirilmiştir. Rehidrasyon oranının uygulanan ön işlemlerden etkilenmemiş olup benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan duyuşal analizde ise 30 ve 45 °Bx şeker çözeltileri ile yapılan ön işlem sonrasında kurutulan örneklerle hazırlanan çaylar daha çok beğenilmiştir.

#### **Açıklama**

Bu çalışma TÜBİTAK 2209-A projesinin (Proje kodu=1919B012100627) sonuçlarından üretilmiştir.

## Kaynaklar

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. 2009. "Performance analysis of drying of carrot slices in a semi-industrial continuous band dryer", *Journal of Food Engineering*, 91:99–108.
- Ahmad, F., Zaidi, S. 2023. "The influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pre-treatment method on the quality of vacuum dried pineapple", *Food and Humanity*, 1: 137-146.
- Azoubel, P. M., Baima, M. A. M., Amorim, M. R., Oliveira, S. S. B. 2010. "Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics", *Journal of Food Engineering*, 97:194-198.
- Bialik, M., Wiktor, A., Witrowa-Rajhert, D., Gondek, E. 2020. "The influence of osmotic dehydration conditions on drying kinetics and total carotenoid content of kiwiberry (*Actinidia Arguta*)", *International Journal of Food Engineering*, 20180328.
- Carcel, J. A., Benedito, J., Rossello, C., Mulet, A. 2007. "Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution", *Journal of Food Engineering*, 78:472-479.
- Chandra, A., Kumar, S., Kumar, S., Nema, P. K. "Ultrasound-assisted osmotic dehydration, followed by convective drying of papaya: effect on physicochemical and functional quality parameters", *System Microbiology and Biomanufacturing*, 3: 615-626.
- Chavan, U.D., Prabhukhanolkar, A. E., Pawar, V. D. 2010. "Preparation of osmotic dehydrated ripe banana slices", *Journal of Food Science and Technology*, 47(4): 380-386.
- Cheng, X., Wang, S., Iqbal, M. S., Pan, L., Hong, L. "Effects of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the drying kinetics, water state, and physicochemical properties of microwave vacuum-dried potato slices", *Ultrasonics Sonochemistry*, 99: 106557.
- Cichowska, J., Witrowa-Rajchert, J., Stasiak-Rozanska, L., Figiel, A. 2019. "Ultrasound-assisted osmotic Barbaso-Canovas, G. V., Feng, H., Weiss, J. 2010. "Ultrasound technologies for food and bioprocessing", *Food Engineering Series*, London, 665.dehydration of apples in polyols and dihydroxyacetone 8DHA) solutions", *Molecules*, 24, 3429.
- Chin, N.L., Yusof, Y.A., Kek, S.P., 2013, "Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices", *Food and Bioproducts Processing*, 91(4): 495-506.
- Çağlayan, D. ve Mazi, I. B. 2018. "Effects ultrasound-assisted osmotic dehydration as a pretreatment and finish drying methods on the quality of

- pumpkin slices”, *Journal of Food Processing and Preservation*, 42, e13679.
- Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S., Gaspaeto, O. C. P., Oliveira, E., L. 2006. “Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying”, *Journal of Food Engineering*, 77(1): 188-193.
- Fernandes, F. A. N., Oliveira, F. I. P. 2008a. “Use of ultrasound for dehydration of papayas”, *Food Bioprocess Technology*, 1: 339-345p.
- Fernandes, F. A. N, Gallao, I. M., Rodrigues, S., 2008b, Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration, *LWT*, 41:604–610.
- Fernandes, F. A. N., Gallao, M. I., Rodrigues, S., 2009, Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration, *Journal of Food Engineering*, 90:186-190.
- Garcia-Noguera, J., Oliveira, F. I. P., Gallao, M. I., Weller, C. L., Rodrigues, S., Fernandes, F. A. N. 2010. “Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: effect of pretreatment time and ultrasonic frequency”, *Drying Technology*, 28(2): 294-303.
- García-Pérez Jv, Cárcel Ja, Benedito J And Mulet A. 2007. “Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying”. *Food Bioprocess Technology* 85(3): 247-254.
- Garcia-Toledo, J., Ruiz-Lopez, I. I., Martinez-Sanchez, C. E., Rodriguez-Miranda, J., Carmona-Garcia, R., Torruo-Uco, J. G., Ochoa-Martinez, L.A., Herman-Lara, E. 2015. “Effect of osmotic dehydration on the physical and chemical properties of Mexican ginger (*Zingiber officinale* var. Grand Cayman)”, *CyTA-Journal of Food*, 14(1): 27-34.
- Guiné, R de p. F. 2006. “Influence of drying method on density and porosity of pears”, *Food and Bioprocess Technology*, 84(C3):179–185.
- İçier, F., Gündüz, G. T., Yılmaz, B., Memeli, Z. “Changes on some quality characteristics of fermented soy milk beverage with added apple juice”, *LWT-Food Science and Technology*, 63: 57-64.
- Kucuk, H., Midilli A., Kilic A., Dincer, I. 2014. ”A review on thin-layer drying-curve equations”, *Drying Technology*, 32: 757-773.
- Li, L., Yu, Y., Xu, Y., Wu, J., Yu, Y., Peng, J., An, K., Zou, B., Yang, W. 2021. “Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the drying characteristics and quality properties of Sanhua plum (*Prunus salicina* L.)”, *LWT*, 138, 110653.
- Manjarres-Pinzon, K. Cortes-Rodriguez, M., Rodriguez-Sandoval, E. 2013. “Effect of drying conditions on the physical properties of impregnated orange peel”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(3): 667-676.



- Moura, C. P., masson, M. L., Yamamoto, C. I. 2005. "Effect of osmotic dehydration in the apple (*Pyrus malus*) varieties gala, gold and fuji", *Thermal Engineering*, 4(1): 46-49.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. 2012, "Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties", *Journal of Food Engineering*, 113:427-433.
- Nowacka, M., Tylewicz, U., Romani, S., Rosa, M. D., Witrowa-Rajchert, D. 2017. "Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit", *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41: 71-78.
- Phuon, V., Ramos, I. N., Brando, T. R. S., Silva, C. L. M. 2021. "Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics", *Journal of Food Process Engineering*, e13794.
- Rahaman, A., Zeng, X., Kumari, A., Rafiq, M., Siddeed, A., Manzoor, M. F., Baloch, Z., Ahmed, Z. 2019. "Influence of ultrasound -assisted osmotic dehydration on texture, bioactive, compounds and metabolites analysis of plum", *Ultrasonics- Sonochemistry*, 58, 104643.
- Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2022. "Mass transfer kinetics (soluble solids gain and water loss) of ultrasound-assisted osmotic dehydration of apple slices", *Scientific Reports*, 12: 15392.
- Salehi, F., Cheraghi, R., Rasouli, M. 2023. "Mass transfer analysis and kinetic modelling of ultrasound-assisted osmotic dehydration of kiwifruit slices", *Scientific Reports*, 13: 11859.
- Sun, D.W., 2005, *Emerging technologies for food processing*, Elsevier Academic Press, London, 771.
- Tamer, C., Isci, A., Kutlu, N., Sakiyan, O., Sahin, S., Sumnu, G. 2016. "Effect of drying on porous characteristics of orange peel", *International Journal of Food Engineering*, 12(9): 921-928.
- Tüfekçi, S., Özkal, S. G. 2020. "Investigation of effect of ultrasound pretreatment on drying and rehydration characteristics and microstructure of apple slices", *YYU Journal of Agricultural Science*, 30: 950-962.
- Villamiel, M. and Soria, A. C., 2010, *Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review*, *Trends in Food Science & Technology*, 21:323-331.
- Yılmaz, B., Cakmak, H., Tavman, S. 2019. "Ultrasonic pretreatment of carrot slices: Effects of sonication source on drying kinetics and product quality", *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(3): e20180447.

## 5. Bölüm

# MOBİL ROBOTLARDA SLAM VE DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN HARİTA GÜNCELLEMESİ

**Oğuzhan BOZOĞLU<sup>1</sup>**  
**Can COŞKUN<sup>1</sup>**  
**Zuhal OKTAY<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, dr.can.coskun@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4100-0296>

<sup>1</sup> İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, zuhal.oktay@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6167-7048>

## 1. Giriş

Günümüzde, otomatik olarak kontrol edilen sistemler, baktığımız her yerde görülebilmektedir. Bunlara ucuz elektronik cihazlardan pahalı ve çeşitli birçok sistemlere kadar örnek sayabiliriz. Otomobiller, biyomedikal cihazlar, kimyasal işlemler ve uzay-havacılık çalışmaları örnek olarak gösterilebilir. Eski zamanlarda kontrol uygulamalarının yapıldığı sistemler “otonom sistemler” olarak değerlendirilmekteydi. Buna, Otonom Sualtı Araçları (AUVs) ve Otonom Kara Araçları (UGVs) gibi bazı örnekler verilebilir. Ancak, bilgisayar bilimleri alanında gelişmiş teknolojiler ve yöntemler (makine öğrenmesi, karar verme vb.) robotik ve insansız araç sistemlerinde kullanılmaya başlandıkça “Otonom” kelimesi; Algılama, Ayırt Etme, Karar Verme, Aksiyon Alma ve Öğrenme özelliklerinin tümünü içeren bir sistem tanımını aldı.

Bu sistemin kullanıldığı en yaygın alan olan otonom araç ve robotik uygulamalarda algılama özelliği en kritik özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun sebebi ise otonom bir sistem (mobil robot vb.) kendi çevresini algılayabilme ve hissetme özelliğine sahip olmak zorundadır. Gelişmiş algılama teknikleri, sensör füzyonu yani farklı tipte birçok sensör kullanılması ile oluşturulan sistemi kullanarak otonom sistemin (mobil robot) çevresinden haberdar olmasını sağlamaktadır. Görsel olarak renk ve termal görüntü içeren cihaz veya kameralar, engel ve mesafe ölçen lazer sensörler, konumlandırma için gerçek zamanlı kinematik içeren (Real-Time Kinematic) RTK GPS cihazlar ve sonar ekipmanlar ile bu işlemler yapılmaktadır. Gelişmiş otonom sistemler ayrıca çevrenin haritasını inşa etme ve sistemin pozisyonlama veya navigasyonunu gerçekleştirebilmesi için Eşzamanlı Lokalizasyon ve Haritalama (SLAM) teknikleri de kullanmaktadır.

Bu gelişmiş teknikleri en yaygın görebileceğimiz sistemler olan mobil robotlar, çevresini tanımlamak ve çevresinde hareket etmek için sensörler ve diğer teknolojileri kullanan, yazılım tarafından kontrol edilen makineler olarak tanımlayabiliriz. Mobil robotlar genel olarak kullanmış oldukları yazılım ile fiziksel robotik unsurlarından olan bacaklar, tekerlekler veya paletleri birleşik bir biçimde kullanarak çalışabilmektedir. Mobil robotların faaliyet gösterdiği ortamlar genellikle dinamiktir, yani zaman içinde değişebilir. Bu değişiklikler, hareket eden nesnelerin eklenmesi veya kaldırılması, ortamdaki ışık koşullarının değişmesi veya yapısal değişiklikler gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Dinamik ortamlarda, harita güncelleme süreçleri önemli bir rol oynar. Harita güncelleme, mobil robotun çevresindeki değişiklikleri algılayarak ve bu değişiklikleri haritasına entegre ederek gerçekleştirilir. Bu süreç, mobil robotun daha önce belirlenmiş

haritasını güncel tutmasını ve çevresindeki dinamik nesnelere doğru bir şekilde tanımlamasını sağlar. Harita güncelleme aynı zamanda mobil robotun konum tahminini de iyileştirebilir, böylece robot, çevresindeki değişikliklere daha hızlı ve etkili bir şekilde tepki verebilir.

Mobil robot alanında önemli bir etken olan SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) robotun bulunduğu ortam için bir harita oluşturmamıza ve bu haritada lokalizasyon yapmamıza olanak tanıyan bir yöntemdir. Herhangi bir robotun bilinmediği bir ortamın haritalamasını yapması sürecine SLAM algoritması olarak ifade etmemiz mümkündür. Haritalandırma sonrası elde edilen bilgiler farklı mühendislik dallarında yol planlaması başta olmak üzere engellerden kaçınma gibi farklı görevlerde kullanılabilir. Özellikle iç mekanlarda kullanılan mobil robotlar, bu teknik sayesinde etkili bir şekilde hareket edebilir ve görevlerini yerine getirebilir.

Mobil robot uygulamalarında önemli bir diğer unsur ise navigasyondur. Mobil robotlar için navigasyon, belirlenmiş bir hedefe güvenli ve etkili bir şekilde hareket etme yeteneğini ifade eder. Bu, SLAM teknikleri ve sensör füzyonu gibi yöntemlerle birleştirilerek gerçekleştirilir. Mobil robotlar, algıladıkları çevre bilgilerini kullanarak harita üzerinde konumlarını belirler ve bu bilgileri temel alarak hedefe doğru güvenli bir navigasyon gerçekleştirirler. Oluşturulan bu kompleks sensör sistemi ile mobil robotların iç mekanlarda veya dış mekanlarda, önceden belirlenmiş rotalarda veya dinamik ortamlarda başarılı bir şekilde hareket etmelerini sağlar. Navigasyon, mobil robotların gerçek dünya uygulamalarında güvenilir ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi için temel bir unsurdur.

Mobil robot veya otonom araç çalışmalarında lokalizasyon ve pozisyonlama için temel iki farklı SLAM yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla Görsel SLAM ve LİDAR SLAM olarak söylenebilir. Adından da anlaşılacağı gibi

Literatürde vSLAM kısaltmasıyla da kullanılan Görsel SLAM, kamera başta olmak üzere farklı sensörlerden gelen görüntülerden faydalanmaktadır. Bu süreç için çok farklı kameralar kullanılabilir. Bunlar kısaca balıkgözü, geniş açılı ve küresel kameralar olarak bilinen basit kamera sistemleri. Çoklu ve stereo kameralar olarak bilinen bileşik göz kameraları. ToF ve derinlik kameraları olarak da bilinen RGB-D kameraları. Bu uygulamanın düşük maliyet göz önünde bulundurularak göreceli olarak ucuz kameralarla uygulanma imkânı bulunmaktadır. Ayrıca kameralar büyük miktarda bilgi sağladığından yer işaretlerini (önceden ölçülen konumları) tespit etmek için kullanılabilirler. SLAM uygulamasında esneklik

sağlayabilmek noktasında yer işareti tespiti süreci grafik tabanlı optimizasyonla bütünleştirilebilir. Her ne kadar derinliği tanımlamayı güçleştirse de bir kamera veya sensörden yararlanılması sürecine Monoküler SLAM denilmektedir. Derinlik tanımlamadaki güçlük kamera bilgilerinin IMU sensörleriyle bütünleşik kullanımıyla ortadan kaldırılabilir. Bilindiği üzere IMU sensörlerinde yön ve hız gibi fiziksel nicelikleri ölçebilen bir yapı bulunmaktadır. Derinlik tanımlamadaki güçlüğü yenebilmek için bilinen nesnelerin tespit edilmesi süreci de kullanılabilir. Bilinen nesneler noktasında görüntüdeki AR işaretleyicileri veya dama tahtalarından faydalanılabilir. LİDAR mesafe belirleme ve ışık algılamada lazer veya mesafe sensörü kullanan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Lazer sensörler diğer sensörlere göre daha hassas olmasından dolayı hızlı hareket eden dronlar ve sürücüsüz araçlarda tercih edilmektedir. Bu sensörler 2B (x, y) veya 3B (x, y, z) nokta bulutu verilerini kullanmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak yüksek hassasiyete sahip mesafe ölçümleri için lazer sensör tercih edilmektedir. Tüm bu özelliklerinden ötürü lazer sensörler SLAM ile harita oluşturulmasında verimli bir biçimde çalışmaktadır. Çoğunlukla nokta bulutlarının eşleştirilmesi sonrasında hareket sıralı tahminlerle yapılır. Alınan yol aracın yerinin belirlenmesi için kullanılır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Şencan ve arkadaşları (Onur ŞENCAN, 2010) yapmış oldukları çalışmada, dört tekerli olarak çalışan bir mobil robotun belirli bir görevi gerçekleştirmesi amacıyla çevresini anlaması ve etkili bir şekilde hareket etmesi için gerekli olan temel motor reflekslerine sahip olabilmesi hedef olarak belirlemişlerdir. Görsel bileşen olarak kamera kullanımıyla, herhangi bir önceden bilgiye ihtiyaç duymadan aracın çevresindeki dinamik ortamın haritalanması (SLAM) amaçlanmışlardır. Bu çalışma, dinamik ortam ve üç boyutlu belirsizliklerin giderilmesine yönelik tek boyutlu lazer tarayıcı ve reflektör kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen ham görüntü verileri, kamera kaçma ve bozunum etkilerinden arındırılmış ve ardından çeşitli filtreleme teknikleri kullanılarak gürültülerden arındırılmıştır. Takip edilebilir noktalar belirlenerek, bu noktalar üzerinden elde edilen optik akı bilgisi kullanılarak aracın İnertial Measurement Unit (IMU) ve odometri verilerinin birleştirilmesiyle aracın üç boyutlu çevresinin düşük çözünürlüklü bir haritasının elde edilmesi amaçlanmışlardır. GKF olarak kısaltılan Genişletilmiş Kalman Filtresi temel alınarak eşzamanlı yer belirleme ve haritalama algoritması kullanılarak haritalandırma işlemi gerçekleştirilir. Bu algoritma, global optimal bir filtre olan Kalman Filtresi'nin doğrusal olmayan sistem

yaklaşımını benimser. Optik akı tabanlı görsel SLAM algoritması teorik düzeyde gerçekleşmesinin ardından deneysel sonuçlarla da algoritmanın sınanması işlemine geçilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntem ve teknikler detaylı bir şekilde incelenmiş ve iç ortam koşullarında yapılan deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmada, iç ortamlardaki belirgin takip edilebilirlik özellikleri taşıyan referans noktalarının, aracın konumuna bağlı olarak ekran izdüşümündeki yer değiştirme oranının optik akı yöntemleri kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla ileri sürülen savın tutarlılığı detaylı bir şekilde incelenmiştir. İleriki aşamada, kamera aracılığıyla elde edilen takribi haritalama işleminin, üç boyutlu lazer tarayıcılarla elde edilen yüksek çözünürlük ve hassasiyetteki verilerin geri çatılması işleminde kullanılması düşünülmektedirler.

Ayşegül Uçar ve arkadaşları (U. Ayşegül, 2019) yapmış oldukları çalışmada, tehlikeli veya insanlar tarafından ulaşılması zor olan yerlerde gerekli işlemleri yapabilen otonom robotları incelemiştir. Otonom robotların bu tür görevleri yerine getirebilmesi için çevresini ve kendi konumunu bilmesi gereklidir. Bu çalışmada, Linux üzerinde Robot İşletim Sistemi (ROS-Robot Operating System) kullanılarak Eş Zamanlı Konum Belirleme ve Haritalama (SLAM) işlemi gerçekleştirilmiştir. Kobuki

firması tarafından üretilen Turtlebot mobil robotu, çalışmanın ana odak noktası olmuştur. İlk uygulamada, Turtlebot bilgisayar USB arayüzü ile manuel olarak kontrol edilmiş, lazerle mesafe ölçümü yapan LIDAR sensörü kullanılarak çevre haritası çıkarılmış ve robotun konumu belirlenmiştir. Bu amaçla ROS içerisine Gmapping algoritması yüklenmiştir. Yapılan tüm uygulamalar, mobil robotun çevresini başarıyla tanıdığını ve içinde yer aldığı haritaları oluşturabildiğini göstermiştir ve farklı sensörlerin birlikte kullanılması, ileri yazılım yöntemleri, kontrol algoritmaları ve filtreler gibi konular, bu alandaki çalışmalar için önemli bir gereklilik olduğu sonucuna varılmıştır.

Durdu ve arkadaşları (Durdu ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada, mobil robotlar serbest hareket seçenekleri ile farklı ortamlarda görev yapabilen ve çeşitli sensörlerle donatılmış yüksek performanslı robotları hedef almışlardır. Nesne algılama, izleme ve haritalama gibi görevlerde yaygın olarak kullanılan mobil robotlar genellikle kullanıcı girdileri ile yönlendirilir. Ancak, bazı durumlarda aktif Eşzamanlı Lokalizasyon ve Haritalama (SLAM) algoritmaları kullanılarak robotlar otonom olarak hareket edebilir. Bu çalışmada, kullanıcı girdilerinden bağımsız olarak hareket eden ve otonom olarak bir ortamın haritasını çıkarabilen bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı algoritma önerilmektedir. İlk aşamada, CNN modeli, çevre görüntüsü ve tekerlek açılarından oluşan bir veri seti ile eğitilerek robotun nasıl rehberlik edeceğini öğrenir. İkinci aşamada, robot eğitim sürecinden farklı bir ortamda otonom olarak gezdirilir ve eş zamanlı olarak ortamın haritasını çıkarır. Yapılan tüm uygulamalarda, CNN tabanlı algoritmanın başarıyla çalıştığı ve robotun otonom navigasyon yeteneklerini sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, SLAM algoritmalarının otonom keşif yöntemleriyle birleştirilerek aktif bir SLAM çerçevesi oluşturulmuştur. CNN şemasının SLAM algoritması ile birleştirilmesi, gerçek zamanlı çevresel görüntüler ve direksiyon açısı ile eğitilerek başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Algoritmanın gelecekteki çalışmalarda yapay yer işaretlerine ihtiyaç duymadan genişletilmesi, özellik tespit modülleri eklenmesi ve çevrenin belirli göstergeleri ile ilgili çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, eylem tanıma eklenerek robotun insanlarla sosyal olarak etkileşime girebileceği bir activeSLAM şeması geliştirilmesi düşünülmektedir.

Pashoğlu ve arkadaşları (Pashoğlu ve ark., 2010) yapmış oldukları çalışmada, mobil robotların navigasyonunda önemli bir rol oynayan eş zamanlı haritalama ve navigasyon algoritmalarının temeli olan kestirim araçları ele almışlardır. Çalışma, son yirmi yılda bu alanda en yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri olan genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı eş

zamanlı haritalama ve lokalizasyonun (SLAM) yanı sıra, Parçacık Filtresi tabanlı FastSLAM gibi alternatif tekniklere de değinmiştir. Günümüzde, araştırmaların genellikle Dağılımlı Kalman Filtresi tabanlı eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama algoritmalarına yoğunlaştığı bilinmektedir. Bu algoritmaların geliştirilmesi, kararlı ve doğru haritaların oluşturulması açısından büyük önem taşımaktadır. Dağılımlı Kalman Filtresi, genişletilmiş Kalman filtresinin eksikliklerini gidermek amacıyla geliştirilen bir kestirim aracı olarak öne çıkmaktadır. Çalışmada, Dağılımlı Kalman Filtresi'nin genişletilmiş Kalman Filtresi'ne göre daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır. Bu filtre, genişletilmiş Kalman Filtresi'nde bulunan türev alma işlemlerine (jacobian, hessian) ihtiyaç duymadan daha etkili bir şekilde çalışabilmektedir. Çalışmanın bir parçası olarak, dağılımlı Kalman Filtresi tabanlı eş zamanlı haritalama ve lokalizasyon algoritmalarının mobil robot navigasyon uygulamalarındaki uygunluğu test edilmiştir. Bu testler, MATLAB programı kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar ve laboratuvar ortamında insansız kara araçları üzerinde yapılan deneysel çalışmalar içermiştir. Sonuç olarak, dağılımlı Kalman Filtresi'nin eş zamanlı haritalama ve lokalizasyon problemlerinde kullanıma uygun bir metot olduğu ve elde edilen verilerin SLAM problemleri için uygun olduğu gözlemlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, algoritmanın daha karmaşık senaryolarda nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek, MATLAB Simulink ortamında sigma noktalarının hesaplanmasını geliştirmek ve daha etkili kestirim algoritmaları için filtreleme tekniklerini optimize etmek gibi konular ele alınabileceğine vurgu yapılmıştır.

Lin ve arkadaşları (Lin ve ark., 2019) FastSLAM olarak bilinen ve hızlı eş zamanlı haritalama ve konumlandırma yapan sistem üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu uygulama mobil robotların kullanmış olduğu otonom navigasyon üniteleri için en çok tercih edilenlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, konumlandırma performansını iyileştirmek için önerilen geliştirilmiş bir FastSLAM algoritması testleri yapmışlardır. Bu algoritma, filtre ayırma derecesine dayalı olarak adaptif olarak ayarlanabilen akıllı yarası ilhamlı bir yeniden örnekleme içermektedir. Yapmış oldukları algoritmada karekök kübür filtresi kullanmışlardır. Bu sayede daha iyi sonuçlar ortaya koyan haritalandırmalara ulaşmışlardır. Algoritmanın doğruluğu simülasyon ve veri seti tabanlı testlerle desteklenmiştir. Algoritmayı tam anlamıyla doğrulayabilmek adına bir havuz deneyi gerçekleştirmişlerdir. Test sonuçları, önerilen IFastSLAM algoritmasının SRUFastSLAM ve STSRCDFastSLAM'e göre daha yüksek bir doğruluk değeri, hesaplama verimliliği ve filtre tutarlılığı ortaya koyduğunu göstermiştir.



Lin ve çalışma arkadaşları bu projede, mobil robotların dinamik ortamlar için konumlandırma performansını iyileştirmeyi ve akıllı bir filtre tabanlı SLAM önermektedir ve bu öneri, iki teknoloji harikası FastSLAM algoritması ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Oluşturulan algoritma hava, kara ve su altı durumlarına da uygulanabilir bir yapıdadır. IFastSLAM her ne kadar hava, kara ve su altı uygulamaları için uygun olsa da seyrek özelliklere sahip ortamlar için daha uygulanabilirdir. Her bir parçacığı gerçek zamanlı olarak gncelleyemiyor olması parçacık filtresi tabanlı bir algoritma olmasından kaynaklanmaktadır. algoritmanın verimliliğini sağlayabilmek için maksimum ölüm sayısını sınırlamak ve güvenilmez/aykırı ölümleri kaldırılması gerekmektedir. Bu çalışmada temel katkıları şu şekilde özetlenebilir: SRCKF, robot ve özellik konumlarının aşamalı kestirimi için FastSLAM algoritmasına entegre etmişlerdir. Parçacık yoksunluğu ve dejenerasyon sorunlarıyla başa çıkmak için adaptif bir yarasa ilhamlı yeniden örnekleme önerilmiştir ve SR, PRR ve AGR yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha iyi optimizasyon etkilerine sahip olduğunu ortaya atmışlardır. Önerilen IFastSLAM algoritması, simülasyon, gerçek dünya veri seti testi ve havuz deneyi içeren uygulamalarda aykırı ölümleri kaldırabilir ve SRUFastSLAM ve STSRCDFastSLAM'a göre daha iyi konumlandırma doğruluğuna ve hesaplama verimliliğine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Chen ve arkadaşları (Chen ve ark., 2020) yapmış oldukları çalışmada, aktif konumlandırma ve haritalama (SLAM) için bir diğer yöntem olan Model ngrl Kontrol (MPC) tabanlı bir yöntemi değinmektedir. Bu yöntem ile mobil robotların belirsizlikle başa çıkararak çarpışma öncesi bir trajektori (trajectory) oluşturmasını amaçlamaktadır. Robotun eş zamanlı olarak hem konumunun belirlemesi hem de harita oluşturmasını durumu Aktif SLAM kavramı ile açıklanmaktadır. Ancak, bu karmaşık süreç, dinamik ortamlarda belirsizlik ve evre kapsama gibi zorluklarla karşılaşır. Önerilen yöntem, belirsizlik azaltma ve alan kapsama görevlerini birleştirerek iki ana moddan oluşmaktadır. Birincisi, SLAM belirsizlik azaltma görevidir. Bu, bir grafik topoloji kullanarak, özellikle çevredeki belirsizlikle başa çıkabilen bir MPC formülasyonunu kullanmışlardır. Grafik topolojisi, belirsizlikle başa çıkmak için haritanın bir grafik yapısına dönüştürülmesini sağlar. İkinci mod ise alan kapsama görevidir ve bunun için bir SQP (Sequential Quadratic Programming) metodu kullanılır. SQP, belirli kısıtlar altında bir optimal zm elde etmek için kullanılan bir matematiksel optimizasyon yöntemidir. Yöntem, ayrıca lineer SLAM'ı içerir. Bunun çalışmadaki avantajı ise hesaplama maliyetini düşürmek için bir submap birleştirme yaklaşımını benimser. Submap birleştirme, haritanın parçalarını birleştirerek bütün bir harita

oluşturmayı amaçlar. Bu, daha geniş bir alanın kapsanmasını sağlar. MPC formülasyonu, belirsizlik azaltma görevinde D-opt optimalite kriterini hedef alır. Grafik topoloji ve konveks optimizasyon, bu kritere dayalı MPC sorununu çözmek için kullanılır. Alan kapsama görevinde ise SQP metodu ile bu belirsizlik azaltma görevini takip eden bir planlama yaklaşımı benimsenir. Yöntemin etkinliği, çeşitli simülasyonlar ve hava robotu deneyleri ile doğrulanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar ise önerilen yöntemin daha doğru SLAM sonuçları üretebildiğini ve aynı zamanda belirli kısıtlar altında daha hesaplamalı verimli olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile belirsizlikle mücadele etmek için MPC formülasyonunu içeren bir çerçeve, grafik topoloji ve konveks optimizasyonun SLAM belirsizlik azaltma görevine uygulanması ve submap birleştirme kullanılarak SLAM'a yönelik bir lineer yöntemin benimsenmesi konularında katkı sağlamışlardır. Sonuç olarak, bu yöntem ile aktif SLAM problemlerini çözmek için etkili bir çözüm sunmuşlardır ve gelecekte daha geniş ortamlarda ve gerçek zamanlı uygulamalarda test edilmesi için potansiyel taşımakta olduğunu vurgulamışlardır.

Tee ve Han (Tee ve Han, 2021) yapmış oldukları bu çalışmada, iç mekan ortamında yaygın olarak kullanılan üç farklı 2D SLAM (Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama) sistemini inceleyen ve karşılaştıran bir derleme sunmuşlardır. Deney yapmak amacıyla, ROS (Robot İşletim Sistemi) tabanlı SLAM kütüphanelerini kullanan deneysel bir mobil robota entegre edilmiş 2D LIDAR modülü, IMU ve tekerlek kodlayıcısı ile donatılmıştır. GMapping, Hector-SLAM ve Google Cartographer gibi üç yaygın algoritma, SLAM'ın metrik harita oluşturan yaklaşımlarıdır ve filtre tabanlı veya grafik tabanlı SLAM olarak kategorize edilirler. Benzer robot trajetorisinden elde edilen deneysel sonuçlar hem simüle hem de gerçek dünya ortamında farklı durumlar altında daha fazla analiz için incelemişlerdir. Genel olarak, bu çalışmada algoritmaların güçlü ve zayıf yönlerini açıklamakta, oluşturulan haritalar açısından farkları görselleştirmekte ve gelecekteki iyileştirmelerin potansiyel yönelimini belirlemektedirler. Haritanın amacına ve çevresine bağlı olarak, farklı duruma en iyi uygun algoritmaların seçilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, GMapping, Hector-SLAM ve Google Cartographer gibi üç temsilci ve yaygın olarak kullanılan SLAM yöntemini kısa bir karşılaştırmalı analizlerini sunmuşlardır. Tarama eşleştirme algoritmasına noktasında parçacık filtre tabanlı uygulamayı GMapping'de, grafik tabanlı uygulamayı Hector-SLAM'de ve gerçek zamanlı döngü kapama algılaması uygulamasını Google Cartographer'da kullanabilmekteyiz. Github'dan alınmış olan algoritmalar ROS çalıştıran bir uyarlanmıştır. Github'un tercih edilme nedeni açık kaynaklı kod sistemini kullanmasıdır. Farklı SLAM yöntemlerini simüle etmek için çalışmayı gerçekleştiren yazarlar ROS tabanlı STDR (Basit İki Boyutlu Robot) simülatörü kullanmışlardır. Bu simülatör, basitliği, esnekliği ve ölçeklenebilirliği nedeniyle tercih edilmiştir. SLAM sonuçlarını görselleştirmek için RQT tabanlı bir grafik arayüzü kullanmışlardır. Yaygın olarak tercih edilen üç SLAM algoritmasını gerçek kullanım şartlarında mobil robotta denemişlerdir. Robot, ROS-Melodic işletim sistemine sahip bir Raspberry Pi 4 (8GB RAM), 2D LIDAR modülü (A1M8) by SLAMTEC, IMU'yu yumuşak monte edilmiş bir güç dağıtım kartı, arka tekerleklerde tekerlek kodlayıcıları, çevreyi görselleştirmek için bir Raspberry Pi kamera ve robotu uzaktan kontrol etmek için bir alıcı içermektedir. ROS Görselleştirme olarak RViz ile oluşturulan haritalar görselleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada en çok tercih edilen üç SLAM yönteminin kendi aralarında karşılaştırılması ve sonuç analizleri gerçekleştirilmiştir. İncelen üç SLAM yöntemine ait simülasyonlar gerçek saha şartlarında test edilmiştir. Elde edilen test sonuçları simülasyon değerlerini doğrular niteliktedir. Çalışmalar boyunca SLAM yöntemlerinin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiş, farklı durumlar altında

uygulama seçimine yönelik kriterler sunulmuştur. GMapping sistemi, iç mekanlarda robotlarda sağlamlığı ve uygulanabilirliği nedeniyle iyileştirme için seçilmiştir. Ayrıca, GMapping'in çeşitli sistem parametrelerinin ayarlanması ve düşük tarama hızlı LRF modülünden kaynaklanan hareket bozulmasını gidermek için yeni bir algoritmanın eklenmesi gibi iyileştirmeler önerilmiştir.

Wolf ve arkadaşları (Wolf ve ark., 2005) yapmış oldukları bu çalışmada, dinamik ortamların eş zamanlı konumlandırma ve haritalama (SLAM) için çevrimiçi bir algoritma önermektedir. Ortaya attıkları algoritma, haritalanma yapılacak mekânda dinamik ve statik alanları ayırt edebilme özelliğine sahiptir. Algoritma sabit ve hareketli unsurları harita üzerinde uygun şekilde gösterebilmektedir. Algoritmadaki genel bakış açısı iki işgal gridini sürdürmeye temelinde şekillenmektedir. Algoritmada bir ızgara mekândaki dinamik alanları modellerken diğer ızgara statik alanları modellemektedir. İki ızgara haritası birleştirildiğinde zamana bağlı tam bir haritalandırma koymamızı sağlar. Robotun konumlandırılmasını sağlamak amacıyla statik kara noktaları ile alakalı bilgiler barındıran üçüncü bir harita oluşturulmaktadır. Simülasyon ile saha deney sonuçları, ortaya konan yaklaşımın verimliliğini ortaya koymuştur. Deney alanında statik ve dinamik nesnelerin ayrımının SLAM için önemli yararlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir. Tutarlı işgal grid haritaları oluşturabilmek için iyi bir konumlandırma gereklidir. Odometrik bilgi, ticari tarzdaki robotlar için kabul edilebilir bir konumlandırma için pekte yeterli değildir. Odometre zaman geçtikte hata biriktirmeye meyillidir. Robot için konumunu belirlemek noktasında oluşabilecek hatalar hareketsiz ortam parçalarını dinamik nesnelere olarak tefekkürdür etmeye varabilecek aldatıcı sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Bilindiği üzere dinamik nesnelerin tanımlanması daha önceki haritalandırmayı temel almaktadır. Yazar yapmış olduğu çalışmada robot sensörleri vasıtasıyla idrak edilebilen özellikleri temel alan bir konumlandırma metodu kullanmaktadırlar. Robotun, kara noktalarının konumları hakkında önceden bilgiye sahip olması durumunda, kara noktalarını algıladıkça konumunu tahmin etmesi mümkündür. Kara noktalarının pozisyonu ile ilgili daha öncesinde herhangi bir bilgi olmaması durumunda kara noktalarının pozisyonları robotun pozisyonu ile beraber kestirilmelidir. Bu çalışmada Wolf'un sunduğu yaklaşım, robotun çevresi hakkında herhangi bir önceden bilgiye sahip olmadığını varsaymaktadır. Deneylerinde kullandıkları kara noktaları, iç mekânlarda yaygın olarak bulunan köşelerdir. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ortaya konan yöntemin hareketli ortamların haritalarının çıkarılmasında uygun

bir yaklaşım olduğunu göstermiştir. Önerilen yaklaşım, hareketli ve sabit alanların istenilen kesinlikte tanımlanmasını sağlamıştır. Konumlandırma köşe tespiti temellidir, bu nedenle algoritma, statik ve dinamik varlıklar tarafından sağlanan kara noktalarını ayırt edebilir ve konumlandırma için bu statik kara noktalarını kullanabilir. Algoritma, hareketli nesnelerin robotun görüş açısında olduğunda veya görüş açısından çıktığında konumunu kestirmek için yeterli seviyede uygunluk arz etmektedir.

Yan ve arkadaşları (Yan., 2018) yapmış oldukları bu çalışmada, genellikle gömülü sistem üzerine kurulu olan ve iç mekanlarda ve dinamik ortamlarda çalışan gerçek bir mobil robot için yeni bir çeşit SLAM algoritması önermektedirler. Bu algoritma, GPS ve ilgili sensörlerin kullanılmadığı durumlarda mobil robotun doğru hareket yönünü elde etmek için yeni bir yöntem sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada, Parçacık Filtresi ve FAST-SLAM algoritmalarını birleştiren PF-SLAM algoritması temelinde, dinamik ortamdaki mobil robot için bir navigasyon algoritması önermektedir. Bu algoritma, büyük ve karmaşık hesaplamalardan kaçınarak gömülü sistemde etkili bir şekilde çalışabildiğini sunmaktadırlar. Önerilen algoritmanın simülasyonunu çalışmada göstermişlerdir ve karşılık gelen gerçek deney, laboratuvar ortamında dinamik ortamdaki mobil robot için algoritmanın etkinliğini kanıtladığını sunmuşlardır. EKF (Genişletilmiş Kalman Filtresi) algoritması, sistem hatalarını Gauss dağılımını sağlaması gereken sistem gürültülerini rekürsif olarak tahmin edebilir. Ancak EKF-SLAM algoritması, sistem gürültülerinin genellikle gerçek dünyada Gauss gürültüsü koşullarını karşılayamadığı durumlarda, gerçek dünyada Gauss olmayan gürültülere sahip PF (Parçacık Filtresi) algoritmasıyla birleştirilmiştir. PF algoritması, Bayesian Önem Örnekleme (BIS) algoritması temelinde araştırılmıştır ve rassal örneklerin ağırlıklı değerlerle kullanılması avantajından yararlanarak sonrasal olasılık yoğunluğunu yaklaşık olarak elde etmektedir. BIS algoritması, her bir parçacığın ağırlığını elde etmek için çok miktarda RAM alanı ve CPU hesaplaması gerektirdiği için, Sıralı Önem Örnekleme (SIS) algoritması, ağırlığı rekürsif güncelleme moduyla hesaplamak üzere önerilmiştir, bu da çok sayıda hesaplama verimliliğini artırmaktadır. FastSLAM algoritması, boyutsal lanetlenmeden kaçınmak için durumu ve yer işaretlerini parçalara bölebilir, bu nedenle FastSLAM, büyük ölçekli ortamlarda uygulanabilir. Diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında, bu algoritma için büyük hesaplamalar yoktur ve bu nedenle yaptıkları sistem gömülü sistem üzerine kurulu olan gerçek bir mobil robot için oldukça uygundur. Bu algoritma, mobil robotun yolu üzerinde aniden bir engel belirdiğinde diğer algoritmalarından daha hızlı bir tepki vermesini sağlar. Gösterilen yeni

navigasyon algoritmasının avantajı, mobil robotun navigasyon sürecinde sensörlerin yardımı olmadan hareket yönünü doğru bir şekilde algılayabilmesidir. Ayrıca, dinamik ortamlarda kullanılabilir, kolayca gerçekleştirilebilir, hızlı tepki verir ve diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında daha az işlem zamanı ve CPU hesaplamasıyla güç tüketimi sağlar, bu da sınırlı CPU hesaplama ve pil gücüne sahip gömülü sistemler için özellikle önemlidir. Başka bir avantajı da bu algoritmanın gerçek hayatta kullanışlı olmasıdır, çünkü genellikle gerçek mobil robot, çalıştığı bilinen bir alanda hareket eder, ancak planlanan yol üzerinde müdahale edecek dinamik engeller olabilir, bu nedenle mobil robotun gerçek hayatta uygulamaları için referans bir tasarım modeli sunmuşlardır. Sonuç olarak, yaptıkları test sonuçları önerilen gereksinimlere uygun olduğunu göstermektedir.

Wang ve arkadaşları (Wang ve ark., 2020) yapmış oldukları bu çalışmada, bir tekerlekli mobil robotun dinamik bir ortamda 3D nokta bulutu haritasını (Point Cloud) kullanarak otonom gezinmesini ele almaktadır. Dört çeşit 2D harita kullanmaktadırlar bunlar: statik global harita, dinamik global harita, global maliyet haritası ve yerel maliyet haritası; robotun dinamik bir ortama uyum sağlamasını ve uygun haritalama yapmasını hedeflemektedirler. Bu çalışmada, mobil robot 3D ortamda bulunmaktadır ve bir 2D statik global harita, gerçek zamanlı SLAM tarafından sağlanan 3D nokta bulutu haritasındaki önceki ölçülmüş verileri bir yatay düzlem üzerine yansıtarak robot navigasyonu

için bir çalışmaları göstermektedir. Ayrıca, SLAM tarafından sağlanan 2D statik global harita üzerine gerçek zamanlı 3D nokta bulutunu yansıtarak 2D dinamik global harita oluşturmaktadırlar. SLAM'ın birikmiş hataları, çevrede yerleştirilmiş bazı kara noktalarını kullanarak iptal edilebilir. Bir küresel planlayıcı, dinamik global haritadan oluşturulan global maliyet haritasına dayanarak başlangıç robot durumundan (pozisyon ve yönlendirme) hedef durumuna (pozisyon ve yönlendirme) olan mesafeyi minimize eden optimal bir global yol hesaplar ve bu algoritma ise A\* algoritmasıdır. Ancak, bu işlem çok zaman almaktadır. Hareketli engellerden kaçınmak için, TEB (Zamanlı Elastik Bant) yerel planlayıcı, bir gerçek zamanlı yerel 3D nokta bulutu tarafından verilen bir yerel maliyet haritasına dayanarak optimal bir yerel yol hesaplamak için kullanılır. Önerilen sistemin etkinliğini göstermek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyde uygulamanın basitleştirilmesi için bir AR kart kullanılmıştır. Robotun çevresindeki AR kartları gibi kara noktalar tarafından birikmiş hataların iptal edilebileceğini kanıtlamayı amaçlamışlardır. Bu şekilde otonom mobil bir robot için bir navigasyon sistemini geliştirmişlerdir. Önerdikleri dört farklı harita tipiyle (statik global harita, dinamik global harita, global maliyet haritası ve yerel maliyet haritası) 3D nokta bulutu verilerinden türetilmiş statik global 3D ortam verilerine dayanarak bir 2D statik global harita oluşturmuşlardır. Küresel ve yerel yol planlayıcılar, robotun global ve yerel maliyet haritalarına dayalı olarak dinamik bir ortamda optimal bir davranış elde etmek için uygulamaktadırlar. Geliştirilen sistemin etkinliğini göstermek için iç mekan deneyleri gerçekleştirmektedirler. Deneysel sonuçlar, robotun yokuşlardaki nesnelere algıladığını, bir statik harita temel alarak dinamik bir harita oluşturduğunu ve çevre değişse bile kendini yerelleştirebildiğini göstermektedir. Robot, kara noktaları algıladığında yer belirleme hatası azalmıştır. Deneyde AR kartları bir yer belirleme olarak kullanılsa da, gerçek ortamdaki uygulama için kara noktaları, önceden 3D nokta bulutundan çıkarılabilen diğer özelliklerle değiştirilebileceğini sunmaktadırlar. Ve bir sensörden gelen gerçek zamanlı 3D nokta bulutu kullanılarak gerçek zamanlı 3D ortamın yeniden inşası henüz gerçekleştirilmemiştir. Yaptıkları çalışma ile farklı tip haritalardan yola çıkarak 2D haritalar kullanarak 3D ortamda robot navigasyonunu SLAM algoritmaları ile başarılı şekilde yapılabileceğini göstermişlerdir.

Kumar ve arkadaşları (Kumar ve ark., 2018) yapmış oldukları bu çalışmada, mobil robotların dinamik ortamlarda otonom gezinmesini ele alıyor ve SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritması ile pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning) kullanıyor. Mobil robotların karşılaştığı

temel zorluk, dinamik bir ortamda gezinme ve bu da dinamik engellerden kaçınma için yol planlamadır. Bu çalışma, Kinect sensörü (kamera ve lazer sensörü) ile harita oluşturma ve robotun yerini belirleme için döner kodlayıcıya dayalı olarak sunulan SLAM algoritmasına ve Pekiştirmeli öğrenmeye dayalı mobil robotlar için yol planlama sorununu çözmeyi hedefleyip ve yeni bir yöntem önermektedir. Uygulanan algoritmalar, SLAM algoritmasının hata ölçümünde %4,07'lik bir ortalama hataya neden olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmada ayrıca uygulanan modifiye edilmiş Q-öğrenme (Q-Learning, RL algoritması) algoritması, mobil robotun dinamik engellerden kaçınmak için yolunu tekrar planlayarak daha önce belirlenen global optimal yoldan farklı başka bir optimal yol bulmasına sağlamıştır ve bunu çalışmada göstermişlerdir. Araştırmadan elde edilen sonuçlara göre, bir robotun Güçlendirilmiş Öğrenme tekniğini kullanarak dinamik bir ortamda gezinmesi mümkündür. Robotun Küresel ve Yerel hareket planlaması için Hiyerarşik Kısmi Gözlemlenebilir Markov Karar Süreci temelli Pekiştirmeli Öğrenme (modifiye Q- öğrenme) önerilmiştir. Bu algoritma, sadece zaman-mesafe optimal yollar elde etmekle kalmaz, aynı zamanda robotun engeller nedeniyle hangi yolları kaçınabileceğini tahmin etmede de kullanışlıdır. Uzun vadeli ve kısa vadeli hareket tahmini, engel trajektuarının tangent vektörünün hesaplanmasıyla mümkündür, bu da robotun dinamik engel kaçınma için yol planlama sürecine yardımcı olmaktadır. Ayrıca yazarlar, Kalman Filtresi kullanarak daha önce tanımlanmış bir dinamik engelin hareketini tahmin etmek için bu algoritmaya entegre etmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan Q-öğrenme algoritması, dinamik ortamı öğrenme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir ve uygulandığında robot, çevresini öğrenme deneyimine dayanarak başka bir optimal yolu seçerek 2 dinamik Lego-mind robotundan kaçınabildiğini deney sonucu ortaya koymuşlardır. Robotun deneyim kazandıkça öğrenme deneyimi de daha iyi hale gelmiştir, bu da bu algoritmanın robot dinamik engel kaçınması için kullanılabilirliğini göstermektedir ve kanıtlamışlardır. Gelecekteki araştırmalar için, robotun



dinamik ortamlarda otonom gezinmesini daha etkili bir şekilde artırabilen uzun vadeli ve kısa vadeli yörünge tahminine yönelik bir öngörülse navigasyon çerçevesi önerisinde bulunmuşlardır.

Habib ve arkadaşları (Habib ve ark., 2007) yapmış oldukları bu çalışmada, mobil robotların bilinmeyen ve dinamik ortamlarındaki haritalama sürecinin önemini, karmaşıklığını ve zorluklarını ele alıyor. Ayrıca sensörlerin rolünü ve harita oluşturmada ortaya çıkan problemleri de tartışıyor. Bu konular, mobil robotlar için dinamik navigasyon sistemleri geliştirmede genellikle açık araştırma problemleri olarak kalmaktadır. Habib'in bu çalışması, bilinmeyen bir ortamda gezinen mobil robotlar için harita oluşturma ve konumlandırma (SLAM) durumunu genel olarak sunmaktadır. Gerçek zamanlı engel tespiti ve kaçınma için uygun olan bir artımlı haritalama tekniğine odaklanan karmaşık bir otonom harita oluşturma ve bakım yöntemi açıklamaktadır. Bu durumda, mobil robotların navigasyonu, robotun çevresinde doğal olarak meydana gelen geometrik özellikleri takip etme problemi olarak ele alınabilir. Robot, çevresini ızgara doluluğu kavramını kullanarak ve ultrasonik sensör bilgisini birleştirerek ayrıntılı bir şekilde haritalandırır ve tüm engellerden uzak durur veya kaçırır. Sınırlı kaynaklarla gerçek zamanlı işlemi sağlamak ve genişletilebilirliği teşvik etmek amacıyla harita ve engel kaçınma modülleri paralel ve dağıtılmış bir çerçevede kullanılmaktadır. Habib ve arkadaşları çalışmada simülasyon tabanlı deneyler, geliştirilen harita oluşturma ve engel kaçınma yaklaşımının geçerliliğini göstermek için gerçekleştirmişlerdir. Farklı engel kaçınma teknikleri literatürde çok fazla bulunmaktadır. Bazı ilgili engel kaçınma teknikleri kenar algılama, potansiyel alan ve belirlilik ızgaralarına dayanmaktadır. Kenar algılama algoritması, robotun ultrasonik sensörleri kullanarak algılanan bir engelin dikey kenarlarının konumunu belirlemeye çalışarak robotun engelin etrafında manevra yapmasını sağlamayı amaçlar. Bu yöntemin dezavantajı, robotun engel hakkında sensör bilgisi toplarken hareketsiz kalma ihtiyacıdır. Ayrıca bu yöntem, sensör doğruluğuna çok duyarlıdır. Bir başka yöntem olan belirlilik ızgarası tabanlı engel tespiti ve kaçınma için, olasılık temelli bir engel temsil yöntemi geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle ultrasonik sensörlerden gelen mesafe ölçümleri gibi hatalı sensör verilerini içermeye uygundur. Bu yaklaşım da, mobil robotun panoramik bir tarama yapması için hareketsiz kalması gerekmektedir. İlgili ızgara hücrelerinin belirlilik değerini güncelledikten sonra, robot yeni bir konuma hareket eder, durur ve işlemi tekrarlar. Robot, çevresini travers ettiğinde ve harita oluşturduğunda, daha sonraki robot yollarının çevrimdışı hesaplamaları için global bir yol planlama yöntemi kullanılır. Bu yöntemin

temel sorunu hesaplama maliyetidir. Ayrıca, potansiyel alan konseptine dayanan geniş bir kullanılan engel kaçınma yöntemleri de bulunmaktadır. Ancak, yazarlar bu çalışmalarında gerçek zamanlı duyuşsal bilgilerle başa çıkabilen, kontrol edilen aracın hızlı, sürekli ve düzgün hareketine izin veren ve aracın engellerin önünde durmasını gerektirmeyen bir yöntemle ihtiyaç olduğunu savunmaktadırlar. Engelden kaçınma yöntemleri, sensörlerin (örneğin ultrasonik sensörlerin durumunda) doğruluk, karışıklık ve yanlış okumalar gibi kusurlarını hesaba katmalıdır. Bu çalışmadaki benimsenen yaklaşım, gerçek zamanlı olarak robotun yerel çevresini temsil eden bir 2D histogram ızgara veri yapısını giriş olarak kullanan, gerçek zamanlı olarak genişletilen vektör alanı histogramı ile engel kaçınma tekniğidir. Bu yaklaşım, daha pürüzsüz robot trajetorileri ve daha iyi güvenilirlik sunan gerçek zamanlı mobil robot engel kaçınması için geliştirilmiştir ve yazarlar bu konuda çalışmalarını ortaya koymuşlardır. Yaptıkları çalışmada, mobil robotlar için eşzamanlı ve gerçek zamanlı haritalama ve konumlandırma karşılaştığı durumu, karmaşıklık ve zorlukları da ele almaktadırlar. Gerçek zamanlı engel tespiti ve kaçınma için uygun, gerçek zamanlı bir engel tespiti ve kaçınma yöntemi geliştirme odaklı otonom harita oluşturma yöntemi göstermektedirler. Çalışmada geliştirilen harita oluşturma ve engel kaçınma yaklaşımının geçerliliğini göstermek için simülasyon tabanlı deneyler gerçekleştirmişlerdir ve açıklamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre eşzamanlı konumlandırma ve harita oluşturma, uygulamalar için önemlidir ve konumlandırma algoritmasının doğruluğunu artırmak için ek doğal işaret noktalarının kullanımını kolaylaştırabildiğini göstermişlerdir.

Filipenko ve arkadaşları (Filipenko ve ark., 2018) yapmış oldukları bu çalışmada, çeşitli ROS tabanlı SLAM sistemleri tarafından hesaplanan bir mobil robotun trajektuarlarının karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır ve çeşitli SLAM algoritmalarının testlerini karşılaştırmalı olarak

gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, ortak sensörlere (2D lidar, monoküler ve ZED stereo kameralar) sahip bir mobil robot prototipi geliştirmişlerdir. Daha sonra, tipik bir ofis ortamında deneyler gerçekleştirerek ve farklı SLAM sistemlerini elde edilen veri seti üzerinde test etmişlerdir. İnceledikleri SLAM sistemleri şunlardır:

- 2D lidar tabanlı: GMapping, Hector SLAM, Cartographer
- Monoküler kamera tabanlı: Large Scale Direct monocular SLAM (LSD SLAM), ORB SLAM, Direct Sparse Odometry (DSO)
- Stereo kamera tabanlı: ZEDfu, Real-Time Appearance-Based Mapping (RTAB map), ORB SLAM, Stereo Parallel Tracking and Mapping (S-PTAM).

Tüm SLAM yöntemleri aynı veri seti üzerinde test edildiği için farklı SLAM sistemleri için uygun metriklerle sonuçlarını da karşılaştırmışlardır ve lidar tabanlı Cartographer SLAM, Monoküler ORB SLAM ve Stereo RTAB Map yöntemleri için umut verici sonuçlar elde ettiklerini ortaya çıkarmışlardır. Çalışmalarının ana sonuçları:

- 2D lidar SLAM sistemleri: Hector SLAM ve Cartographer, UGV konumlandırma ve harita oluşturma için doğru çözümler sunmuştur. Her iki yöntem de Mutlak Trajectory Hatası (ATE) RMSE'si 0.024 m olan neredeyse aynı sonuçları vermiştir. İki trajektori de yerdeki çizgiyle örtüşmektedir. Ancak, Cartographer, global harita optimizasyon döngüsü ve yerel olasılıklı harita güncellemelerini kullandığından, bu sistem çevresel değişikliklere karşı daha dayanıklı hale geldiğini ortaya sunmuşlardır.

- Monoküler görsel SLAM sistemleri: Parallel Tracking and Mapping (PTAM), Semi-direct Visual Odometry (SVO), Dense Piecewise Parallel Tracking and Mapping (DPPTAM) deneyimler başarısız olmuştur, çünkü özellik eksikliğinden dolayı izlemeyi kaybettiklerini ortaya koymuşlardır.

- Monoküler görsel SLAM sistemleri: Large Scale Direct monocular SLAM (LSD SLAM), ORB SLAM, Direct Sparse Odometry (DSO), ölçek kurtarma için ek bir modülle birlikte konumlandırma sorununu çözmek için kullanılabileceğini belirtmektedirler. Ölçek belirsizliği sorunu, çevre hakkında ek bilgi olmadan ölçek kurtarma için ek bilgi olmadan hiçbir monoküler SLAM sistemi başa çıkamaz sonucunu çıkarmışlardır.

- Stereo görsel SLAM sistemleri: ZEDfu, Real-Time Appearance-Based Mapping (RTAB map), ORB SLAM, Stereo Parallel Tracking and Mapping (S-PTAM), ek ölçekleme modülleri olmadan lokalizasyon hakkında metrik bilgi sağlar, ayrıca 3D ölçekli nokta bulutu oluşturmaktadır.

- Görsel SLAM sistemi: RTAB map, deneyinde 0.163 m ATE RMSE

ile konumlandırma sorunu için en iyi sonuçları göstermektedir, ancak monokrom duvarlara yakın takip kaybı sorunu vardır. Test edilen sistemler arasında en sağlam ve stabil olan ORB SLAM'dir ve yapılan çalışmada en iyi sonucu verdiğini ortaya koymuşlardır.

Görsel SLAM sistemlerinin performansı, bir mobil robotun hesaplama kaynaklarına güçlü bir şekilde bağlı olduğundan, gelecekteki çalışmalarda, SLAM uygulamalarının verimliliği üzerindeki donanım kısıtlamalarını ve etkilerini ele alınabileceğini belirtmektedirler.

Wanek ve arkadaşları (Wanek ve ark., 2015) yapmış oldukları bu çalışmada, robotlar için eşzamanlı konumlandırma ve haritalama (SLAM) yöntemi çalışmalarını sunmaktadır. Çalışmanın odak noktası, sınırlı algılama ve hesaplama kaynaklarına sahip çok sayıda küçük mobil robottan oluşmaktadır. Her bir robot, çevresine olan mesafeleri hesaplamak için bir lazer işaretçi ve etkinlik tabanlı bir görüntü sensörü kullanmaktadır. Elde edilen veri, aynı anda birçok robotta paylaşılabilen bir işgal haritasını güncellemek için kullanılır. Çalışmada konsept kanıtı uygulamaktadırlar ve sonuçlarını göstermektedirler. Çalışmada ayrıca nesnelere olan mesafe tahminleri, robotun çevresinin bir haritasını oluşturmak için uzaktaki bir bilgisayara aktarılmaktadır. Genel olarak, küçük robotları bir ortamı haritalamak için nasıl kullanabileceğini göstermektedirler. Uyguladıkları yöntem, robot konumlarını tahmin etmek ve paylaşılan bir işgal haritası oluşturmak için bir parçacık filtresi kullanmaktadır. Ayrıca robotların motor işaretleri ile biyolojik olarak ilham alınmış görüntü sensöründen gelen veri arasındaki ilişkiyi öğrenmeleri için kalibrasyon yöntemleri sağlamaktadırlar. Temel bir yol planlama stratejisi kullanarak, robotlar haritalanan alanda gezinebilir ve yeni hedef konumlar seçebilir. İlk sonuçların oldukça umut verici olduğunu da vurgulamaktadırlar. Aslında, sadece bir lazer işaretçi ve etkinlik tabanlı bir görüntü sensörü kullanmak, sensörün düşük çözünürlüğüne rağmen oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca, ortaya çıkardıkları çözüm gerçek zamanlı çalışmakta ve basitçe daha fazla ajan ekleyerek genişletilebilmektedir. İlkelerine göre, sistem aynı anda işbirlikli haritalamak için herhangi bir sayıda robota başa çıkabilir. Ancak bazı sorunlar ele alınmalıdır. Örneğin, haritanın eğrilik kaynağını belirlemek ve bu bağlamda tekerlek kaymasını telafi etmek gerekmektedir. Etkinlik verisi için görsel özellik çıkarma hala çözülmemiş olduğundan, ego- hareketi hesaplamak ve kayan tekerlekleri düzeltmek için standart bilgisayar görüşü yöntemlerini kullanmaktadırlar. Yöntemi iyileştirmek için haritanın farklı temsillerini araştırdıklarını vurgulamaktadırlar. Şu anda yalnızca tek bir merkezi işgal haritası kullanıyorlar, ancak seyrek bir harita, bazı hesaplamaların robotlara

taşınmasına izin verebileceğine de değinmişlerdir. Örneğin, bir grafik tabanlı temsil, alt haritalara bölünebilir. Belirli bir alanı gezinen bir robotun sadece belirli bir alt haritaya erişmesi gerekir. Robot, konumunu kendi başına değerlendirebilirdi, bu durumda yalnızca merkezi bilgisayara yeni veri iletecekti. Bu bilgisayar da tüm ajanlar üzerinde genel bir görünümü sürdürecektir ve örtüşen bölgeleri tanımlayabilecektir. Sonuç olarak, birden çok robotun nasıl iletişim kurabileceğini bu çalışmada göstermişlerdir. Şu anda, başka bir robotu haritalama sürecine eklemek için gereken adımlar, lazer işaretçi frekansını ve parçacık filtresinin etiketini manuel olarak ayarlamaktır. Birbirleriyle iletişim kurabilen robotlar, ayarlarını otomatik olarak uyarlayabilirler. Bu, manuel adımı kaldıracak ve robotların dinamik olarak eklenebilmesine ve çıkarılabilmesine olanak tanıyacaktır. Bu işlemleri ise gelecek çalışmalar olarak belirtmişlerdir.

Yaghmaie ve arkadaşları (Yaghmaie ve ark., 2013) yapmış oldukları bu çalışmada, mobil robotların dinamik ortamlarda gezinmesi için yeni bir Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) yöntemi ele almaktadır. Önerilen yöntem, kuvvet alanı yöntemine dayanmakta olup, robotun dinamik engeller hakkında önceden belirlenmiş bilgi olmaksızın SLAM ve otonom gezinme gerçekleştirdiği varsayılmaktadır. Dinamik engellerin hareketi, Kalman filtresi tarafından tahmin edilmekte ve çarpışma tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Çarpışma tespiti anında, statik çevreye karşılık gelen itici ve çekici kuvvetlere değiştirici bir kuvvet eklenir ve robotun çarpışmayı önlemesi sağlanır. Ayrıca, güvenli bir dönüş açısı tanımlanmıştır ki bu, robotun güvenli bir şekilde gezinmesini sağlamaktadır. Önerilen yöntem olan Kaçış Algoritması'nın (Escaping Algorithm, EA) performansı farklı simülasyon ve deneysel testler aracılığıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar, Kaçış Algoritması'nın dinamik engel kaçınma açısından otonom gezinme için pratik bir yöntem olarak uygun performans sergilediğini göstermektedir. Statik bir ortamda, mobil robotlar, statik nesnelere itici kuvvetleri ve hedefin çekici kuvvetini kullanarak hedefe ulaşabilir. Ancak, dinamik bir ortamda güvenli bir şekilde hareket etmek için dört adımı sıralı olarak gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu adımlar şunlardır: hareket eden nesnelere itici kuvveti, hareket tahmini, çarpışma tespiti ve engel kaçınma için hız planlaması. Bu alt programlar, SLAM algoritması içinde yürütülür ve hesaplamalarında SLAM'den elde edilen ızgara haritasını kullanırlar. Bu makalede, Kaçış Algoritması, dinamik ortamlarda gezinme için önerilmektedir. Bu yöntem, çekici ve itici kuvvetlere ek olarak değiştirici bir kuvveti kuvvet alanı ortamında tanıtır. EA, dinamik engellerin hızı ve konumu gibi kesin bilgilere ihtiyaç duymaz. Bu özellikler, Kalman filtresi

tarafından tahmin edilir ve elde edilen sonuçlar, değiştirici kuvvetin tanımlanmasında kullanılır. EA'nın temel fikri, insanların engel kaçınma konusundaki ortak davranışından elde edilmiştir ve nesneyi arkadan çevirmektir. Önerilen yöntemin genel performansı, farklı sayıda dinamik engelle U şeklindeki bir ortamda yapılan çeşitli simülasyonlarla kontrol edilmiştir. Ek olarak, deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin pratik uygulamadaki etkinliğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu gözlemlerden bu yöntemin dinamik engel kaçınma açısından başarılı olduğu sonucuna varılabilir ve yazarlar sonuçları bu şekilde paylaşmışlardır.

## SONUÇLAR

Yapılan çalışmalara ve literatürdeki yorumlara bakılacak olursa, mobil robotlar veya otonom araçlar için çevre bilgisi ve değişen ortam koşulları büyük bir sorun olup bu sorun için çözüm bulmanın kritik olduğunu anlamaktayız. Dinamik iç veya dış ortam koşulları güvenlik ve çalışmalar açısından önemli olduğunu öğrenmekteyiz ve SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) teknolojisinin mobil robotlar için dinamik ortamlarda gezinme konusunda bu soruna çözüm olan bir algoritma olduğunu anlayabiliriz. SLAM, robotun aynı anda konumunu belirlemesine ve çevresini haritalamasına izin vererek, özellikle hareketli engellerle başa çıkma konusunda etkili bir çözüm olmaktadır.

Literatürdeki önceki araştırmalara dayanarak, SLAM'ın dinamik ortamlarda gezinme konusundaki avantajları olduğu kadar zorlukları da anlaşılmıştır. SLAM teknolojisinin kullanımının, hareketli engellerle etkili bir şekilde başa çıkma yeteneği ile birleştiğinde, mobil robotların daha güvenli ve akıllı bir şekilde hareket etmelerini sağlayabileceği sonucuna varılmaktadır.

Ayrıca çıkarılan sonuçlardan görüldüğü üzere SLAM tabanlı gezinme sistemlerinin performansını değerlendirmek için farklı SLAM algoritmalarını karşılaştırmaları da incelenmiştir ve SLAM algoritmalarının değerlendirilmesi ve robot lokalizasyonu için gerekli geliştirmelerin yapılabileceği sonucuna varılmaktadır. Yapılan karşılaştırmalar, özellikle dinamik ortamlarda etkili bir şekilde çalışabilen SLAM algoritmalarının belirlenmesine yardımcı olmuştur.

Sonuç olarak, dinamik ortam koşullarında hareketli engellerle başa çıkma, güvenli sürüş ve robotik görevler gerçekleştirebilmek amacıyla harita güncellemesi ve optimal bir yol planlaması gibi özellikleriyle SLAM, robotların veya otonom araçların sürüş yeteneklerini arttırmakta ve robot bilinci konusunda önemli bir çözüm sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akyol, S., Uçar, A., (2019). Rp-lidar ve mobil robot kullanılarak eş zamanlı konum belirleme ve haritalama. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31;1:137-143. <https://dergipark.org.tr/en/pub/fumbd/issue/43638/534772>
- Chen, Y., Huang, S., Fitch, R. (2020) Active SLAM for Mobile Robots With Area Coverage and Obstacle Avoidance, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 25;3:1182-1192, doi: 10.1109/TMECH.2019.2963439. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8948245>
- Chewu C.C.E., Kumar, V.M. (2018) Autonomous navigation of a mobile robot in dynamic indoor environments using SLAM and reinforcement learningc 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 402 012022. <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012022>
- Durdu, A., Bol, N., Öztürk, E., Duramaz, M., vd. (2021). Convolutional Neural Networks Based Active SLAM and Exploration. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(22), 342-346. <https://doi.org/10.31590/ejosat.862953>
- Habib M.K. (2007) Real Time Mapping and Dynamic Navigation for Mobile Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*.4;3. <https://doi.org/10.5772/5681>
- Filipenko, M., Afanasyev, I. (2018) Comparison of Various SLAM Systems for Mobile Robot in an Indoor Environment, 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), Funchal, Portugal, pp. 400-407, doi: 10.1109/IS.2018.8710464. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8710464>
- Lin, M., Yang, C., Li, D., Zhou, G. (2019) Intelligent Filter-Based SLAM for Mobile Robots With Improved Localization Performance, *IEEE* 7:113284-113297, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8795445>
- Paslıoğlu, K. (2010) Otonom Mobil Robotlarda Dağılımlı Kalman Filtresi Tabanlı Eş Zamanlı Lokalizasyon ve Haritalama. PhD Thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü. <https://polen.itu.edu.tr/items/d5482f9d-f259-4080-b1cc-65fddb7d0bf7>
- Şencan, O. (2010). Otonom mobil robotlarda optik akış tabanlı görsel eş zamanlı lokalizasyon ve haritalama. PhD Thesis.
- Tee, Y.K., Han, Y.C. (2021) Lidar-Based 2D SLAM for Mobile Robot in an Indoor Environment: A Review, 2021 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST), Miri, Malaysia, pp. 1-7, doi:

10.1109/GECOST52368.2021.9538731.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9538731>

- Yan, Y., Wong, S. (2019). A navigation algorithm of the mobile robot in the indoor and dynamic environment based on the PF-SLAM algorithm. *Cluster Comput* 22;6:14207–14218 <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2271-3>
- Yaghmaie, F.A., Mobarhani, A., Taghirad, H. D. (2013) A new method for mobile robot navigation in dynamic environment: Escaping algorithm," 2013 First RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, Iran, pp. 212-217, doi: 10.1109/ICRoM.2013.6510107. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6510107>
- Waniek, N., Biedermann, J., Conradt, J. (2015) Cooperative SLAM on small mobile robots, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Zhuhai, China, pp. 1810-1815, doi: 10.1109/ROBIO.2015.7419035 <https://ieeexplore.ieee.org/document/7419035>
- Wang, X., Mizukami, Y., Tada, M. et al. (2021). Navigation of a mobile robot in a dynamic environment using a point cloud map. *Artif Life Robotics* 26:10–20 <https://doi.org/10.1007/s10015-020-00617-3>
- Wolf, D.F., Sukhatme, G.S. (2005). Mobile Robot Simultaneous Localization and Mapping in Dynamic Environments. *Auton Robot* 19:53–65 <https://doi.org/10.1007/s10514-005-0606-4>



## 6. Bölüm

### POLİMERLERİN KULLANILDIĞI EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Merve Sena SUR<sup>1</sup>  
Devrim Demiray SOYASLAN<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> <sup>2</sup>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi

<sup>1</sup>ORCID : <http://orcid.org/0009-0004-8040-7616>

<sup>2</sup> Doç. Dr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5145-8551>

## 1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, dijital tasarım verilerini kullanarak malzemelerin birbiri üstüne katmanlar halinde eklenmesiyle üç boyutlu nesnelere üretmeyi sağlayan bir imalat yöntemidir. Sağladığı bir takım avantajlar (üretim kolaylığı, tasarım özgürlüğü, prototipleme hızı, malzeme çeşitliliği) nedeniyle eklemeli imalat yöntemleri; havacılık, otomotiv, sağlık, savunma sanayi, uzay araştırmaları, eğitim, tekstil gibi birçok endüstride kullanılmaktadır. Eklemeli İmalat süreçlerinde kullanılan malzemeler polimerler ve metaller olarak iki ana başlıkta sınıflandırılabilir. Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılacak polimerler, üretilen parçanın özelliklerine ve kullanım amacına göre seçilmektedir. Bu çalışmada polimerler kullanılarak üretim yapılan eklemeli imalat yöntemleri tanıtılmış ve bu yöntemlerde kullanılan polimerler açıklanmıştır. Polimerler kullanılarak üretim yapılabilen yöntemlerin başlıcaları SLA (Stereolitografi) ve FDM (Fused Deposition Modelling) yöntemleridir. Bu kapsamda en çok kullanılan polimerler PLA (Polilaktik Asit), ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PETG (Polietilen Tereftalat Glikol), Poliamid (PA) veya Nylons, TPE (Termoplastik Elastomer), Polikarbonat (PC), PVA (Polivinil Alkol), Fotopolimerler ve Epoksi Reçinelerdir. Polimerler kullanılarak üretilen ürünlere stent, biyomedikal ürünler örnekler olarak verilebilir (Bozkurt vd., 2021). En sık kullanılan metaller ise; Paslanmaz Çelik, Alüminyum, Titanyum'dur.

Tablo 1'de, Eklemeli imalat yöntemlerinin geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırılması verilmiştir.

**Tablo 1.** Eklemeli imalat ve geleneksel üretimin karşılaştırılması.

	Geleneksel Üretim	Eklemeli İmalat
Üretim Süreci	İşlem sonunda fazlalık oluşur. Döküm, frezeleme gibi çeşitli işlemlerle oluşturulur.	İşlem sonunda fazlalık oluşmaz. Katmanların üstte konulmasıyla oluşturulur.
Malzeme Kullanımı	Büyük bloklar veya parçalar kullanılır ve malzeme israfı olur.	Sadece gereken malzeme miktarını kullanır ve malzeme israfı olmaz.
Tasarım Özgürlüğü	Karmaşık geometrilerin üretiminde zorluklar yaşanır.	Katmanlı üretimi sayesinde tasarım esnekliği sağlar.
Prototipleme Hızı	Ürünün prototipinin oluşturulması zaman alır.	Tasarımlar dijital olarak oluşturulur ve hızlıca fiziksel prototiplere dönüştürülür.
Malzeme Çeşitliliği	Belirli malzemelerle sınırlıdır ve farklı malzemelerin bir araya getirilmesi zorluk çıkarabilir.	Geniş malzeme yelpazesine sahiptir bu da çeşitli uygulamalar için idealdir.
Özelleştirilebilirlik	Üretimi zor ve maliyetlidir.	Ürünlerin ekonomik ve etkili bir şekilde üretilmesini sağlar.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri Lazer Tabanlı İşlemler, Ekstrüzyon İşlemleri, Malzeme Püskürtme, Yapıştırıcı Bazlı İşlemler, Elektron Demeti olmak üzere 5 ana başlıktan oluşmaktadır (Tablo 2). Bu başlıklar da kendi içlerinde tekrar başlıklara ayrılmaktadır. (Bikas vd., 2015)

**2.1.1. Lazer Tabanlı İşlemler;** Lazer tabanlı işlemler, faz değişimi mekanizmasına bağlı olarak lazer ergitme ve lazer polimerizasyonu olarak iki alt kategoriye ayrılır.

**2.1.1.1. Lazer Polimerizasyonu:** Lazer polimerizasyonu, prototip ve yapısal olmayan uygulamalarda karmaşık ve hassas üç boyutlu nesnelere üretmek için kullanılmaktadır. Üretilen parçalar düşük dayanıma sahiptir.

• **Stereolitografi (SLA):**SLA teknolojisi, lazer ışığı ile sıvı reçineyi katılaştırarak katman katman üç boyutlu nesnelere oluşturmada kullanılır.

**Tablo 2.** Eklemeli imalat yöntemlerinin alt işlem aşamaları

Lazer Tabanlı İşlemler	Ekstrüzyon İşlemleri	Malzeme Püskürtme	Yapıştırıcı Bazlı İşlemler	Elektron Demeti
Lazer Polimerizasyonu	Erime Dayalı Modelleme (FDM)	Üç Boyutlu Baskı (3DP)	Laminat Nesne Üretimi (LOM)	Elektron Demeti ile Üretim (EDM)
Lazer Ergitme	Robodöküm	Mürekkep Püskürtmeli Yazdırma (IJP)	Katı Folyo Polimerizasyonu (SFP)	
		Çoklu Püskürtme Modelleme (MJM)		
		Balistik Partikül Üretimi (BPM)		
		Thermojet		

• **Katı Zemin Kütleme (SGC):**SGC, bir maske kullanarak UV ışığı ile sıvı reçineyi katılaştırarak katmanlı üretim yapan fotopolimer esaslı katkısız üretim teknolojisidir. Üretimi hızlıdır fakat maliyetli teknolojidir.

• **Sıvı Isıl Polimerizasyon (LTP):**LTP, SLA'ya benzeyen üretim teknolojisidir. Her iki yöntemde de parça katman katman katılaştırarak yapılmaktadır. LTP'den farklı olarak yerine ısı kullanılarak katılaştırma sağlanır.

• **Işın Girişimi Katılaştırma (BIS):** BIS, farklı dalga boylarına sahip iki lazer ışınının kesişme noktasında ışığa duyarlı polimerlerin nokta nokta katılaştırılmasına dayanan teknolojidir. Bu işlemde derinlik yükseldikçe yetersiz lazer absorpsiyonu, lazer ışığının kırınımı gibi faktörler tam kesişim noktası elde etmeyi zorlaştırır.

• **Holografik Girişim Katılaştırma (HIS):** HIS, sıvı fotopolimeri lazer ışığı ile BIS'ten farklı olarak nokta nokta yerine tamamıyla katılaştırır.

**2.1.1.2. Lazer Ergitme:** Lazer Eritimi, toz metali lazerle eriterek katman katman istenilen şekli oluşturan bir katkısız üretim teknolojisidir.

• **Seçici Lazer Sinterleme (SLS):** SLS, tozu lazerle ısıtarak ve kaynaştırarak katmanlı üretim yapan bir teknolojidir. Bu üretimde metal tozları, naylon, kum, balmumu ve polikarbonat gibi malzemeler kullanılır.

• **Seçici Lazer Ergitimi (SLM):** SLM, SLS teknolojisine benzer. Her iki yöntem de toz malzemeyi kullanır ancak SLS sinterleme yaparken, SLM yüksek lazer gücüyle tozu tamamen ergitir. Bu nedenle SLS'den daha hızlı bir teknolojidir.

• **Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS):** DMLS, SLS ve SLM ile aynı prensibe dayanır. Diğer teknolojilerden farklı olarak bu teknoloji sadece metallerle çalışır.

• **Lazer Destekli Net Şekillendirme (LENS):** LENS, yüksek güçlü bir lazerle metal tozunu eriterek karmaşık metal parçalar üretmekte kullanılan teknolojidir. Büyük boyutlarda parçalar üretilebilir fakat bu teknolojiye yüzey kalitesi genellikle düşüktür.

• **Doğrudan Metal Biriktirme (DMD):** DMD, toz yatağı olmadan lazer ve metal tozu kullanarak katmanlı üretim yapan teknolojidir. SLS ve SLM'yle çalışma prensibi benzese de daha esnek olmasıyla bu teknolojilerden ayrılır.

• **Lazer Toz Biriktirme (LPD):** LPD, toz ve hava karışımını lazer ışınına odaklayarak katmanlı olarak metal parçalar üreten bir teknolojidir. Diğer teknolojiler (LENS, SLC, SDM ve DMD) bu teknolojinin varyasyonlarıdır.

• **Seçici Lazer Kaplama (SLC):** SLC, lazeri ısı kaynağı olarak kullanarak metal tozunu eriten ve altlık üzerine yapıştıran bir üretim teknolojisidir. Bu teknolojiyle hızlı ve doğrudan işlevsel metal parçalar üretmek mümkündür.

**2.1.2. Ekstrüzyon İşlemleri;** Ekstrüzyon işlemleri, ısıtılmış bir nozul yardımıyla plastik malzemeyi eritip katman katman istenilen şekli oluşturan bir üretim teknolojisidir.

**2.1.2.1. Erime Dayalı Modelleme (FDM):** FDM'de, eritilmiş plastik filament kullanılarak katmanlı üretim yapılır. Masaüstü prototipleme ve düşük maliyetli parça üretimine uygun bir teknolojidir .

**2.1.2.2. Robodöküm:** Robodöküm, yüksek katı içeriğe sahip sıvıları kullanarak katmanlı üretim yapan teknolojidir. Karmaşık seramik ve kompozit parça üretimini hızlı şekilde gerçekleştirmeye imkan sağlar.

**2.1.3. Malzeme Püskürtme (Material jetting);** Malzeme püskürtme, sıvı malzeme veya yapıştırıcı püskürterek toz malzemeyi katmanlar halinde yapıştırarak bir araya getiren üretim teknolojisidir. Lazer eritme teknolojisinden farklı olarak erime yerine yapıştırma yapılıır.

**2.1.3.1. Üç Boyutlu Baskı (3DP):** 3DP, toz yatağına sıvı bağlayıcı püskürterek katmanlı üretim yapan teknolojidir.

**2.1.3.2. Mürekkep Püskürtmeli Yazdırma (IJP):** M püskürtme, dijital görüntüyü oluşturmak için mürekkep damlacıklarını kağıt, plastik veya diğer yüzeylere püskürterek çalışan bir bilgisayar yazdırma teknolojisidir. Mürekkep Püskürtmeli yazıcılar yaygın olarak kullanılan yazıcı türüdür.

**2.1.3.3. Çoklu Püskürtme Modelleme (MJM):** MJM, mürekkep püskürtme teknolojisine benzer sıvı polimeri katmanlar halinde püskürterek ve UV ışınımıyla sertleştirerek çalışan bir katmanlı üretim yöntemidir.

**2.1.3.4. Balistik Partikül Üretimi (BPM) :** BPM, püskürtme başlıklarından çıkan erimiş malzeme damlacıklarını hedef yüzeye yapıştırarak katmanlı üretim yapan teknolojidir. Bu teknoloji malzemenin erimesine dayandığından erime ve katılma kolaylığı olan termoplastik ve metal malzemelerde kullanılır.

**2.1.3.5. Thermojet:** Bu teknoloji çoklu püskürtme teknolojiyle benzer özellik gösterir. Thermojet, balmumu benzeri malzemeyi katmanlar halinde püskürterek düşük hassasiyetli plastik modeller üreten teknolojidir. Hassas döküm uygulamalarında kullanılmaktadır.

**2.1.4. Yapıştırıcı Bazlı İşlemler (Adhesive);** Yapıştırıcı bazlı işlemlerin günümüzde kullanımı sınırlıdır.

**2.1.4.1. Laminat Nesne Üretimi (LOM):** LOM, bir taraflı ısıya duyarlı yapıştırıcı sürülmüş özel kağıt kullanarak katmanlı olarak üç boyutlu nesnelere oluşturan bir hızlı prototipleme teknolojisidir.

**2.1.4.2. Katı Folyo Polimerizasyonu (SFP):** SFP, yarı-polimerize plastik folyoların ışığa tutularak tamamen katılmasını kullanan teknolojidir.

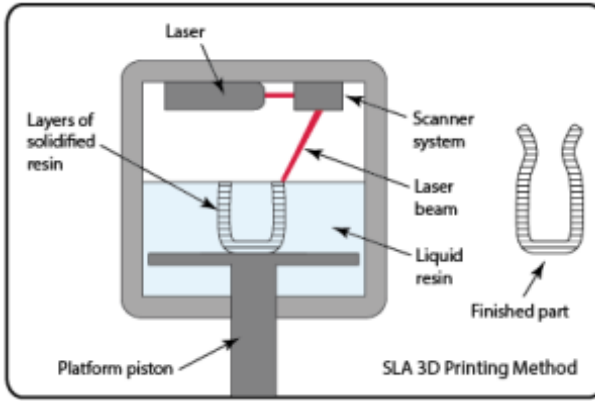
**2.1.5. Elektron Demeti;** Elektron ışını kullanarak malzemeyi eritmek ve sinterelemek için kullanılır.

**2.1.5.1. Elektron Demeti ile Üretim (EDM):** Toz metal kullanarak katmanlı üretim yapan yeni gelişen üretim teknolojisidir. Sadece metal parçalarda kullanımı uygundur.

### 3. POLİMER KULLANILAN YÖNTEMLER

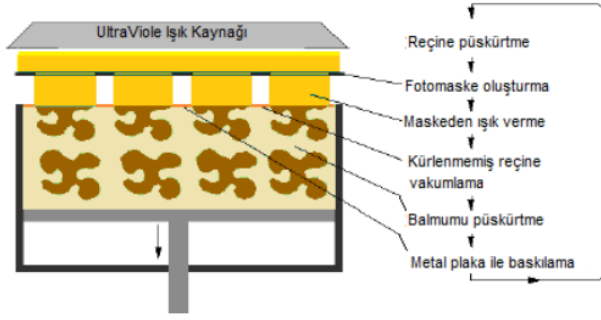
**3.1. Lazer Polimerizasyonu:** Bu yöntem genellikle düşük güçlü bir lazerle aydınlatıldığında katılaştıran bir sıvı fotosensitif reçine prensibine dayanır. Üretilen malzemelerin dayanımları düşüktür. Bu yöntemin 5 tane alt üretim yöntemi bulunmaktadır.

**3.1.1. Stereolitografi (SLA):** SLA teknolojisi, lazer ışınının sıvı reçineyi katılaştırılmasıyla üç boyutlu nesnelere katmanlar halinde oluşturmada kullanılır. Bu yöntem detaylı ve karmaşık nesnelere oluştururken kullanılır. Hammadde olarak bu yöntem için hazırlanan fotopolimer reçineler kullanılır. Takı tasarımı, tıbbi cihazlar, diş protezleri gibi alanlarda kullanılır. Yüzey pürüzsüzlüğü, hızlı prototip üretimi gibi avantajları olması yanında destek yapılarına ihtiyaç duyması, zaman alıcı olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Şekil 1).



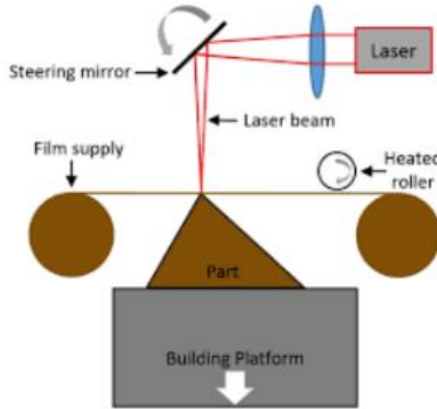
Şekil 1: SLA yöntemi şematik gösterimi. (Uğur, 2018)

**3.1.1 Katı Zemin Kürleme (SGC):**SGC, bir maske kullanarak UV ışığı ile sıvı reçineyi katılaştırarak katmanlı üretim yapan fotopolimer esaslı katkısız üretim teknolojisidir. 1986'da Cubital Ltd. tarafından geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2015). SLA'nın alt dalı olarak da kabul edilir. Hammadde olarak UV ışını karşısında hızla katılaşabilen ve yüksek kaliteli sonuçlar üreten fotopolimer reçine kullanılır. Yüksek maliyetli olması nedeniyle çok tercih edilmemektedir (Şekil 2).



Şekil 2: SGC yöntemi şematik gösterimi. (Özsoy ve Duman, 2017)

**3.1.2 Sıvı Isıl Polimerizasyon (LTP):** LTP, SLA'ya benzeyen üretim teknolojisidir. Her iki yöntemde de parça katmanların katılaştırılmasıyla oluşur. Ancak hammadde olarak termosetler kullanılması ve katılma işleminin termal enerjile gerçekleşmesi SLA yöntemiyle LTP yöntemini birbirinden ayırır. UV ışını kullanmadığı için daha esnek bir üretim ortamı sağlaması ve termoset polimer kullanılması çeşitli malzemelerin işlenmesini sağlaması avantajlarından sayılır fakat yüksek maliyeti ısı kontrolünün zorluğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Şekil 3).

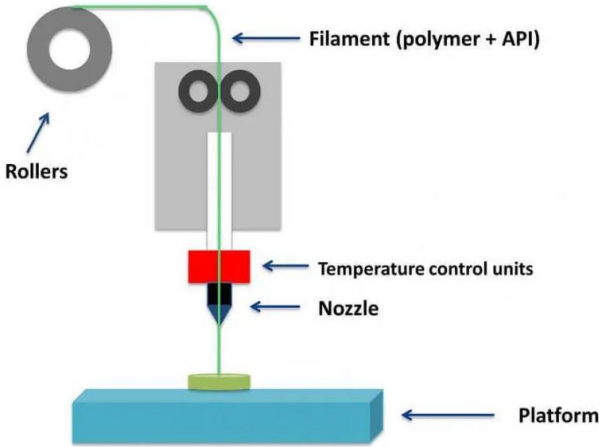


Şekil 3. LTP yöntemi şematik gösterimi. (Dehghanhadikolaei vd., 2018)

**3.1.3 Işın Girişimi Katılaştırma (BIS):** BIS, farklı dalga boylarına sahip iki lazer ışınının kesişme noktasında ışığa duyarlı polimerlerin nokta nokta katılaştırılmasına dayanan teknolojidir. Bu işlemde derinlik yükseldikçe yetersiz lazer absorpsiyonu, lazer ışığının kırınımı gibi faktörler tam kesişim noktası elde etmeyi zorlaştırır. Kullanılan polimer türü fotosensitif reçinelerdir. Yüzey pürüzsüzlüğü, karmaşık geometri parçaların üretiminde kullanılması gibi avantajlarının yanı sıra yavaş üretim hızı, yüksek maliyet gibi dezavantajları bulunur.

**3.1.4 Holografik Girişim Katılaştırma (HIS):** HIS, holografik optik özelliklerin kullanıldığı bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu süreçte, bir lazer ışını, bir referans ışınla birleştirilir ve bu birleşme holografik bir desen oluşturur. Oluşturulan bu desen, fotosensitif bir polimer tabakasının katılmasını sağlar. Bu sayede, karmaşık ve yüksek çözünürlüklü 3B yapıların üretimi sağlanır.

**3.2 Erime Dayalı Modelleme (FDM):** FDM yönteminde termoplastik malzeme bobini ısıtılır ve eritilir. Daha sonra, bir nozül yardımıyla bu erimiş malzeme katmanlar halinde bir tabaka üzerine uygulanır. Her katman, önceki katmanın üstüne eklenerek istenilen nesne şekli oluşturulur. Bu yöntemin avantajlarının en önemlisi uygun fiyatlı, zararsız ve kokusuz malzemelerin kullanılabilmesi, farklı renk ve türlerde sunulabilme imkânıdır. ABS, medikal ABS, PLA, yatırım döküm balmumu ve elastomerler kullanılabilen malzemelere örnek gösterilebilir. Bu yöntemin basit ve düşük maliyetli olması hobi amaçlı kullanıcıları kendine çeker. Ancak, bu yöntemin doğruluk ve yüzey kalitesi, toz bazlı plastik eklemeli imalat süreçlerine göre daha düşük olabilir (Şekil 4) (Başçı ve Yamanoğlu, 2021).

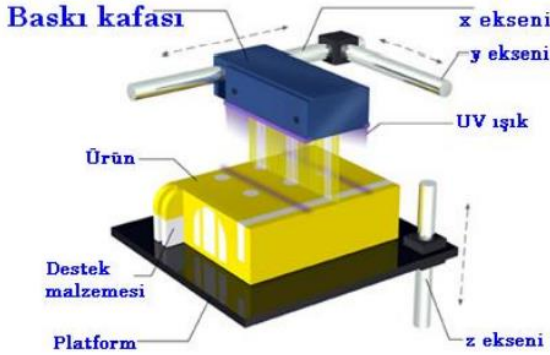


Şekil 4 : FDM yöntemi şematik gösterimi. (3DBaskıal, 2021)

**3.3 Çoklu Püskürtme Modelleme (MJM):** MJM, üç boyutta uygulanan mürekkep püskürtme tekniğine benzeyen bir yöntemdir. Bu yöntemde üretilen ürünler son ürün olarak kullanılmamaktadır (Okucu, 2016). MJM kafası, x-y düzleminde hareket eder ve gerektiği noktalara yalnızca özel termo-polimer malzeme ekleyerek modelin her katmanını oluşturur. Her adımda, yatırılan termo-polimeri iyileştirmek için UV lambası kullanılır. Bir katman tamamlandığında, platform kafadan uzaklaştırılır (z-ekseninde) ve kafa bir

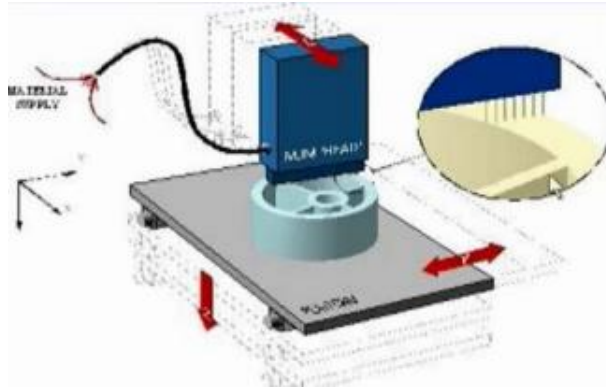


sonraki katmana geçer. Bu yöntemin avantajları az malzeme israfı, yüksek üretim hızı, çeşitli termo-polimer malzemelerin kullanımı sayılabilir (Şekil 5).



Şekil 5. MJM yöntemi şematik gösterimi. (Okucu, 2016)

**3.4 Thermojet:** Thermojet, çoklu püskürtme modelleme yöntemine benzeyen yöntemdir. Bu yöntemde mum benzeri plastik modeller oluşturur fakat bu yöntem SLA yöntemi kadar doğruluk sağlamaz. Thermojet yöntemi çoğunlukla mücevher endüstrisinde döküm kalıpları ve diğer hassas döküm uygulamaları için kullanılır (Şekil 6).

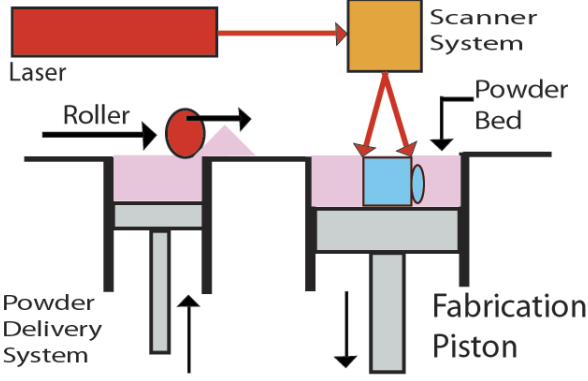


Şekil 6. Thermojet yöntemi şematik gösterimi. (Sharma, 2020)

**3.5 Katı Folyo Polimerizasyonu (SFP):** SFP, yarı-polimerleşmiş plastik folyoların tam polimerizasyonunu sağlayan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık geometrili parçaların üretiminde kullanılır. Yüksek hassasiyet, esneklik ve azalan malzeme atığı gibi avantajları bulunur.

**3.6 Seçici Lazer Sinterleme (SLS):** SLS, tozu lazerle ısıtarak ve kaynaştırarak katmanlı üretim yapan bir teknolojidir. Bu yöntemde hem polimer

hem de metal tozu kullanılır. Güçlü ve dayanıklı parçalar, desteksiz üretim, ekonomik ve hızlı üretim gibi avantajları bulunmaktadır. Tıbbi endüstri, otomotiv endüstrisi gibi alanlarda bu yöntem kullanılır (Şekil 7).



Şekil 7. SLS yöntemi şematik gösterimi. (Uğur, 2018)

**3.7 Polimerlerin En Sık Kullanıldığı İmalat Yöntemleri;** Stereolitografi, Seçici Lazer Sinterleme, Erime Dayalı Modelleme ve Malzeme Püskürtme yöntemleridir. Bu yöntemlerin tercih edilmesinin nedeni olarak çeşitlilik ve uygulanabilirlik, hız ve verimlilik, tasarım esnekliği, prototip üretim ve maliyet avantajları sayılabilir.

## 4. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİNDE KULLANILAN POLİMER TÜRLERİ, POLİMERLERİN SEÇİMİ VE ÖZELLİKLERİ

### 4.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılan Polimerler

**Termoplastik Polimerler:** Belirli sıcaklıkta bükülebilir veya kalıplanabilir hale gelen ve soğuduktan sonra katılaştıran bir plastik polimer malzemedir. Yeniden şekillendirilebilir, çatlak ve kırıkları ısı ile kaynatılabilir.

**PLA (Polilaktik Asit) :** Mısır nişastası, şeker kamışı ve şeker pancarı gibi ürünlerden üretilen plastiktir. Tamamen organik bir filamenttir.

**ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) :** Hafif ve sert bir polimerdir. Bu malzeme polibütadien içinde stiren ve akrilonitrilin polimerizasyonu ile elde edilen bir kopolimerdir. (**Kopolimer;** iki veya daha fazla monomerden oluşan polimer çeşididir.) Yüksek ısıya dayanıklı,aleve dayanıklıdır.

**PETG (Polietilen Tereftalat Glikol) :** Kimyasallarla önemli temasa direnebilen, dayanıklı olan ve üretim sürecinde herhangi bir şekilde oluşumuna uyum sağlayacak kaliteye sahip termoplastik polyesterdir.

**PA (Poliamid) veya Nylons :** Üstün aşınma direnci, iyi sürtünme katsayısı ve çok iyi sıcaklık ve darbe özellikleri sayesinde poliamitler, en önemli ve kullanışlı teknik termoplastikler arasındadır.

**TPE (Termoplastik Elastomer) :** Termoplastik Elastomerler, elastomer ve plastik olmak üzere iki fazdan oluşur. Termoplastik elastomer (TPE), elastomer fazı sayesinde kauçuk malzemelere benzer esneklik ve mekanik dayanım özellikleri sergilerken; plastik fazı sayesinde ise kolay işlenebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik avantajına sahip olan malzemedir.

**PC (Polikarbonat):** Normalde şekilsiz ve saydam termo plastiklerdir. Kurşun geçirmez camlardan gözlük camına, tıbbi cihazlardan otomotiv parçalarına, seralardan dijital disketlere, cd ler ve dış aydınlatma armatürlerinde yaygın olarak kullanılır. Polikarbonat iyi derecede ısı direnci gösterir ve alev geciktiriciler ile birlikte bu direnci daha üst seviyeye taşıyabilir.

**PVA (Polivinil Alkol) :** PVA kısaltmasıyla da bilinen polivinil alkol, vinil asetat ve bir katalizörün polimerizasyonu sonucu türetilen renksiz, termoplastik, suda çözünebilir, reçinemsiz, sentetik bir yüksek polimerdir. Yapışkan özelliği vardır ve film oluşturmada, emülsifiye etmede etkilidir.

**Fotopolimerler :** Fotopolimerler, ışığa duyarlı kimyasal bileşiklerden oluşan bir tür polimerdir. Bu malzemeler, belirli bir dalga boyundaki ışığa maruz kaldıklarında kimyasal reaksiyon geçirerek sertleşir veya polimerleşirler.

**Epoksi Reçineler:** Yüksek yapıştırma gücü ve başarılı kimyasal direnci ile bilinmiş plastik bir malzemedir. Karışımının sert plastik benzeri bir malzemeye dönüşebilmesi için iki kompenantın karıştırılmasıyla başlayan kimyasal reaksiyon sonucu oluşmaktadır.

En Yaygın Kullanılan Polimerler;

- PLA (Polilaktik Asit)
- ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren)
- PETG (Polietilen Tereftalat Glikol)
- Poliamid (PA) veya Nylons
- TPE (Termoplastik Elastomer):
- PVA (Polivinil Alkol)

Eklenebilir imalat yöntemlerinde kullanılan polimerin bazı önemli özellikleri şunlardır:

- Düşük maliyet
- Hafiflik
- Dayanıklılık
- Esneklik
- Biyolojik uyumluluk

## 4.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinde Kullanılan Polimerin Seçimi

Eklemeli imalatta kullanılacak polimer, üretilecek parçanın özelliklerine ve kullanım amacına göre seçilir. Polimer seçerken dikkate alınması gereken bazı faktörler şunlardır:

- **Mekanik Özellikler:** Son ürünün dayanıklılığı, sertliği, esnekliği ve yorgunluk mukavemeti gibi mekanik özellikler, polimer seçimi için önemlidir. İhtiyaca uygun polimer seçimi yapılmalıdır.

- **Termal Özellikler:** Sıcaklık karşısında uygun özellik gösterecek polimer seçmek önemli bir faktördür. Bazı polimerler yüksek sıcaklıklara dayanabilirken, bazıları düşük sıcaklıklarda bile esnekliğini korur.

- **Kimyasal Direnç:** Kimyasal maddelere maruz kalma durumu, polimer seçimini etkiler. Örneğin, bazı polimerler asitlere, bazlara veya çözücülere karşı dayanıklıyken, diğerleri bu tür kimyasallara karşı hassastır.

- **Biyoyumluluk:** Tıbbi uygulamalar veya vücutla temas eden parçalar için kullanılacaksa, polimerin biyoyumluluğuna dikkat edilmelidir. Biyoyumlu polimerler, vücutla uyumlu ve güvenli malzemelerdir.

- **Görünüm ve Yüzey İşleme İmkânları:** Estetik açıdan hoş bir sonuç elde etmek için veya belirli bir yüzeyin işlenmesi için, polimer uygun olmalıdır. Bazı polimerler daha kolay boyanabilir veya cilalanabilirken, bazıları daha zor olabilir.

- **Malzeme Maliyeti:** Malzeme maliyeti, projenin bütçesini etkileyen önemli bir faktör olduğu için maliyete uygun polimer seçimi oldukça önemlidir.

**Baskı Süreci ve Donanımı:** Kullanılan eklemeli imalat teknolojisi ve baskı donanımı da polimer seçimini etkiler. Bazı polimerler belirli baskı sistemlerinde daha iyi performans gösterirken, diğerleri için uygun olmayabilir.

## 5. SONUÇ

Eklemeli imalat, dijital tasarım verilerini kullanarak ürünleri katmanlar halinde oluşturan imalat tekniğidir. Bu yöntemler, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak üretim kolaylığı, esnek tasarım imkanları, hızlı prototipleme ve geniş malzeme seçenekleri gibi avantajlar sunmaktadır. Polimerler, geniş malzeme yelpazesine sahip olmalarından dolayı eklemeli imalatta yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Üretilecek parçanın gereksinimleri, mukavemet, esneklik, kimyasal direnç gibi faktörler dikkate alınarak en uygun polimer seçilmektedir. Bu doğru malzeme seçimi, son ürünün performansını ve dayanıklılığını belirlemektedir. Sonuç olarak, polimerlerin eklemeli imalatta kullanımı, endüstriyel süreçlerde büyük bir dönüşüm sağlamaktadır. Esneklik,

tasarım özgürlüğü ve prototip oluşturma hızı gibi avantajlar, üretim süreçlerini iyileştirirken, doğru malzeme seçimi ise ürünlerin kalitesini artırır ve uygulama çeşitliliğini genişletmektedir. Bu nedenle polimerlerin eklemeli imalatta kullanımı, endüstriyel süreçlerde esneklik ve verimlilik sağlayarak üretim kalitesini arttırmaktadır.

## KAYNAKÇA

1. Bozkurt, Y., Gülsoy, H. Ö., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 962-980.
2. 3DBaskıal (2021, Ocak 9). Ocak 9, 2021 tarihinde 3D Baskı Al Web Sitesi: <https://3dbaskial.com> adresinden alındı
3. Başcı, Ü. G., & Yamanoglu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: fdm ile eklemeli imalat. *Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi*, 5(2):339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>
4. Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssoulouris, G. (2015). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 389-405.
5. Dehghanhadikolaei, A., Namdari, N., Mohammadian, B., & Fotovvati, B. (2018). Additive Manufacturing Methods: A Brief Overview. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 123-131.
6. Okucu, E. (2016). Manyetik rezonans ve bilgisayarlı tomografi verileri kullanılarak insana ait anatomik yapıların hızlı prototoplenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Yayımlanmamış).
7. Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1):36-48.
8. Sharma, P. D. (2020). *Advanced Manufacturing Processes*. Roorkee: Department of Mechanical and Industrial Engineering, Indian Institute of Technology.
9. Uğur, Ö. (2018, Nisan 10). KodBursa. Nisan 10, 2018 tarihinde KodBursa Web Sitesi: <https://bursa.meb.gov.tr/fatihprojesi/Kodbursa/Sayfa/13-sla-stereolithografi-teknolojisi> adresinden alındı
- 10.

## 7. Bölüm

### İSTANBUL'DA BİR BİNA İÇİN ISI YALITIMININ ÖNEMİ VE MALZEME SEÇİMİNİN ETKİLERİNİN TS 825'E GÖRE ANALİZİ

**Fadel AL HAMADO AL CHEHABI<sup>1</sup>**

**Mustafa TAHİR AKKOYUNLU<sup>2</sup>**

**Ali KAHRAMAN<sup>3</sup>**

---

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst./Makine Mühendisliği (D.R.), Konya / Türkiye , Orcid : 0000-0001-7872-3098, abomahmud1991@gmail.com

<sup>2</sup>Doç .Dr. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Konya / Türkiye, Orcid: 0000-0001-5748-6759, makkoyunlu @erbakan.edu.tr

<sup>3</sup>Prof. Dr. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Konya / Türkiye, Orcid: 0000-0003-3203-4697, akahraman@erbakan.edu.tr

## 1.GİRİŞ

Yapı sektöründe enerji tüketimi, ısıtma, soğutma ve iklimlendirme süreçlerinden kaynaklanan yüksek oranıyla dikkat çekmekte ve bu durum enerji verimliliği uygulamalarını zorunlu hale getirmektedir (Ülker, 2009). Enerji verimliliği uygulamaları, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir (Baneaz & Akkoyunlu, 2023). Ayrıca, bu uygulamalar küresel ısınmayla mücadelede etkili bir yaklaşım olarak kabul edilmekte ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Baneaz & Akkoyunlu, 2024).

Isı yalıtımı, enerji kayıplarını önleyen ve kaynakların etkin kullanımını sağlayan bir uygulama olarak öne çıkmaktadır. Doğru bir şekilde planlanıp uygulandığında, maliyetlerin azaltılmasının yanı sıra çevresel etkilerin minimum seviyeye indirilmesine olanak tanır (Karakas, 2018). Türkiye'de bu hedefleri desteklemek amacıyla yürürlüğe giren 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, kaynakların verimli kullanımını teşvik etmekte ve çevre kirliliğini azaltmayı hedeflemektedir (Karakas, 2018).

Modern teknolojilerin gelişmesiyle birlikte modelleme ve simülasyon yöntemleri, ısı yalıtımı uygulamalarını daha etkili hale getirmiştir. Bu yöntemler, süreçlerin hızlandırılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkıda bulunurken, yalıtımın etkilerini daha iyi analiz etme imkanı sunmaktadır (Pusat et al., 2016). Böylelikle, enerji tasarrufunu artırmayı hedefleyen bu uygulamaların teknolojik, ekonomik ve çevresel faktörler dikkate alınarak planlanması gerekmektedir (Sarucan, Akkoyunlu & Baş, 2010).

Türkiye'de enerji tüketiminin önemli bir kısmının binalarda gerçekleştiği göz önüne alındığında, TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı, enerji kaybını azaltmaya yönelik kritik bir düzenleme olarak öne çıkmaktadır. Bu standart, yalıtım uygulamalarının doğru ve planlı bir şekilde yapılmasını zorunlu kılarak enerji tasarrufunu artırmayı hedeflemektedir. Yanlış yalıtım uygulamaları enerji kaybına neden olabileceğinden, uygulamalardaki eksikliklerin tespit edilip düzeltilmesi büyük önem taşımaktadır (Mermet, 2019).

Enerji verimliliği ve ısı yalıtımı uygulamaları, yalnızca ekonomik fayda sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir araç sunmaktadır. Artan nüfus ve sanayileşmeyle birlikte enerji talebinin sürekli yükseldiği bir dünyada, bu tür uygulamalar enerji talebindeki artışı dengelemede ve çevresel etkileri azaltmada önemli bir yere sahiptir (Akkoyunlu et al., 2018; Ülker, 2009).

## 2. ISI YALITIMI



## 2.1. ISI VE SICAKLIK TANIMI

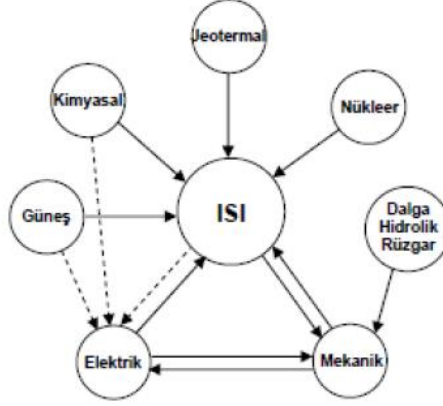
Isı, bir sistemden başka bir sisteme, yalnızca sıcaklık farkı nedeniyle aktarılan enerjidir. Bir cismin sahip olduğu ısı miktarı, genellikle o cismin sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Sıcaklık, pozitif ya da negatif bir değer alabilen ve bir noktanın termal durumunu ölçmeye yarayan bir büyüklüktür. Aynı zamanda bir maddenin ısıl durumunu tanımlayan temel bir kavramdır ve ısı transferine yol açan temel etkenlerden biri olarak kabul edilir. Ancak, sıcaklık değişimi olmaksızın da ısı transferi gerçekleşebilir; bu durum özellikle hal değişim süreçlerinde gözlemlenmektedir.

Bu nedenle:

- Soğuk hava koşullarında, binalarda sağlanmaya çalışılan sıcak iç mekanlardan daha soğuk dış ortamlara doğru bir ısı geçişi gerçekleşir.
- Sıcak hava koşullarında ise bu durum tersine dönerek, sıcak dış ortamdan daha serin iç mekanlara doğru ısı transferi olur.

**Isı farklı yollarla üretilebilir:**

- **Mekanik enerjiden elde edilen ısı:** Mekanik süreçlerde sürtünme nedeniyle ısı enerjisi açığa çıkar. Örneğin, bir matkabın ucunun dönerken sürtünmeden dolayı ısınması buna bir örnektir.
- **Kimyasal reaksiyonlardan elde edilen ısı:** Petrol, kömür veya odun gibi maddelerin kimyasal olarak yanması sonucunda ısı enerjisi ortaya çıkar.
- **Elektrik enerjisinden elde edilen ısı:** Elektrik akımının bir direnç üzerinden geçmesiyle ısı enerjisi üretilir. Buna evlerde ve iş yerlerinde kullanılan elektrikli ısıtıcılar örnek verilebilir.
- **Işınım yoluyla elde edilen ısı:** Güneş ışınları yeryüzü tarafından emilir ve bu süreçte ısınma meydana gelir.
- **Atom enerjisinden elde edilen ısı:** Atomun daha küçük alt parçalarına ayrılmasıyla büyük miktarda enerji açığa çıkar (KARAKOÇ, 2015).



*Şekil1. Enerji Dönüşüm Diyagramını Göstermektedir  
(KARAKOÇ, 2015)*

## 2.2. Isı Yalıtımının Önemi ve Faydaları

Isı yalıtımı, enerjinin verimli kullanılması ve enerji tasarrufunun sağlanması açısından hayati bir role sahiptir. Binalarda enerji tüketiminin azaltılması, hem bireysel hem de ulusal düzeyde ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır. Türkiye gibi enerji kaynaklarının büyük kısmını dışarıdan temin eden ülkelerde, enerji tüketiminde tasarruf sağlamak ve israfı önlemek zorunluluktur.

Isı yalıtımı, iç ve dış ortamlar arasındaki sıcaklık farkını dengeleyerek binaların yapısal bütünlüğünü korur ve enerji israfını önler. Ayrıca enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır. Bu durum, hem bireylerin bütçesine hem de ülke ekonomisine katkı sağlar. Bununla birlikte, doğru ısı yalıtım uygulamaları çevresel kirliliğin azaltılmasında da önemli bir etkidir.

### Isı yalıtımının başlıca faydaları şunlardır:

- **Enerji tasarrufu sağlar:** Isı yalıtımı ile binalarda enerji tüketimi önemli ölçüde azaltılabilir, bu da hem bireyler için yakıt masrafını düşürür hem de enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlar.
- **Konforlu bir yaşam sunar:** Isı yalıtımı sayesinde binalarda ısı dengesi sağlanır. Hava akımı, yoğuşma, nem ve küf gibi istenmeyen durumlar ortadan kaldırılarak yaşam konforu artırılır.
- **Yapı ömrünü uzatır:** Binalarda ısı köprülerinin oluşumunu engelleyen ısı yalıtımı, korozyonun ve dış etkenlerden kaynaklanan zararların önüne geçerek yapıların dayanıklılığını artırır.
- **Çevresel etkilere katkı sağlar:** Daha az enerji tüketimi sayesinde atmosfere salınan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) gibi zararlı

gazların miktarı azalır, bu da hava kirliliğinin ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerin önlenmesine yardımcı olur.

- **Estetik görünüm kazandırır:** Isı yalıtımı uygulamaları, yıpranmış binalara estetik bir görünüm kazandırabilir.

- **İklim kaynaklı sorunları azaltır:** Isı yalıtımı, sıcaklık farklarından kaynaklanan çatlaklar ve şekil bozukluklarına karşı koruma sağlar(Karakoç, 2015; Bektaş, Çerçevik & Kandemir, 2017).

### **2.3. ISI YALITIM MALZEMELERİNDE ARANILAN ÖZELLİKLER VE SEÇİM KRİTERLERİ**

Isı yalıtım malzemelerinin seçimi ve özellikleri, enerji verimliliği ve yapıların uzun ömürlü olması açısından son derece önemlidir. Ancak, tek bir malzemenin tüm istenen özellikleri bir arada sunması genellikle mümkün olmadığından, kullanım alanına göre en uygun malzemenin belirlenmesi gereklidir. İyi bir ısı yalıtım malzemesinde bulunması gereken genel özellikler ve malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanabilir:

#### **Isı Yalıtım Malzemelerinde Aranılan Özellikler**

- **Düşük ısı iletkenlik katsayısı:** Isı kayıplarını en aza indirerek enerji verimliliği sağlar.
- **Yüksek mekanik dayanım:** Basınca ve çekmeye karşı dayanıklı olmalı, zamanla çökme ve deformasyona uğramamalıdır.
- **Kimyasal kararlılık:** Bulunduğu ortamda bozulmamalı ve diğer malzemelerle reaksiyona girmemelidir.
- **Uzun ömürlü kullanım:** Özelliklerini zamanla kaybetmemeli, çürümemeli ve küflenmemelidir.
- **Yangına dayanıklılık:** Yanmaz, alev yaymaz ve toksik duman üretmeyen malzemeler tercih edilmelidir.
- **Nem ve suya dayanıklılık:** Su geçirmez ve neme karşı dirençli olmalıdır.
- **Buhar difüzyon direnci:** Su buharı geçirgenliği yeterli düzeyde olmalıdır.
- **Hafiflik:** Yapıya fazla yük bindirmemesi için hafif malzemeler tercih edilmelidir.
- **Boyutsal kararlılık:** Zamanla şekil değişikliğine uğramamalıdır.
- **Sağlık ve çevre dostu:** İnsan sağlığına zararlı maddeler içermemeli, kaşıntı veya alerji yapmamalıdır.
- **Uygulama kolaylığı:** İşçilik ve uygulamada kolaylık sağlamalıdır.
- **Ekonomiklik:** Hem satın alma hem de kullanım maliyeti açısından ekonomik olmalıdır.

- K f ve mikroorganizmalara dayanıklılık: Böcekler ve mikroorganizmalar tarafından zarar görmemelidir.

### **Isı Yalıtım Malzemesi Seçiminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar**

- Binanın yük kapasitesi: Malzemenin hafif olması, yapı üzerindeki ek yük   azaltarak deprem dayanıklılığını artırır.

- Isı iletkenlik değeri: Enerji tasarrufu açısından malzemenin düşük ısı iletkenlik değerine sahip olması gerekir.

- Suya ve neme karşı dayanıklılık: Malzemenin su geçirmezlik özelliği yüksek olmalı ve neme karşı direnç göstermelidir.

- Kullanım alanı ve ortam etkileri: Malzemenin kullanılacağı yapı elemanının maruz kalacağı koşullara uygun seçilmesi önemlidir.

- Yangın güvenliği: Malzemenin tutuŐtuktan sonra alev yayma hızı, ürettiği ısı ve toksik duman miktarı dikkate alınmalıdır.

- Su buharı geçirgenliği: Buhar difüzyon direnç katsayısı ( $\mu$ ) düşük olan malzemeler tercih edilmelidir.

- Ekonomiklik: Tüm  zellikleri sağlarken maliyet açısından uygun olması gerekir.

Bu  zelliklerin göz önüne alınması, doğru yalıtım malzemesinin seçilmesini ve uzun vadede enerji tasarrufu ile yapı ömrünün artırılmasını sağlar. Isı yalıtım malzemesinin seçimi, yalnızca ekonomik bir gereklilik değil, aynı zamanda enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük bir öneme sahiptir. (Evcil, 1999; Bektaş, erevik & Kandemir, 2017).

AŐađdaki Şekil 2'de, farklı tipteki ısı yalıtım uygulamaları gösterilmektedir. Bu uygulamalar, yalıtım malzemelerinin yapıya entegrasyonuna dair örnekler sunmaktadır.



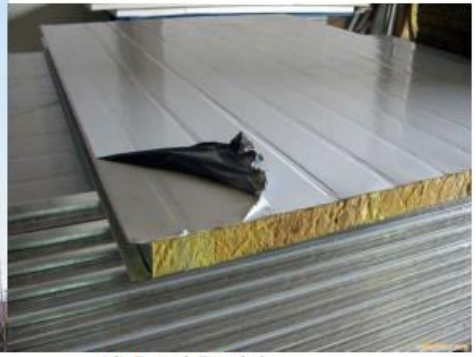
(a) Sandviç duvar



(b) Gaz beton



(c) Xps Kaplama



(d) Panel Sandviç

*Şekil 2. Çeşitli Yalıtım Tiplerini Göstermektedir  
(Bektaş, Çerçevik & Kandemir, 2017)*

### 3. ISI YALITIMI MALZEMELERİ

#### 3.1. Isı Yalıtım Malzemelerinin Tanımı

Isı yalıtımı, farklı sıcaklıklara sahip iki ortam arasında ısı transferini azaltmak amacıyla yapılan bir işlemdir. Bu işlemden kullanılan malzemelere ise "ısı yalıtım malzemesi" denir. Isı yalıtım malzemelerinin en belirgin özelliği, düşük ısı iletim katsayısına sahip olmalarıdır. ISO ve CEN Standartlarına göre, ısı iletim katsayısı  $0,065 \text{ W/mK}$ 'den düşük olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak kabul edilir. Bu sınır değer üzerindeki malzemeler ise yapı malzemesi olarak sınıflandırılır (İZODER, 2003).

### **3.2. Yalıtım Malzemelerinin İç Yapısı**

Isı yalıtımında kullanılan malzemeler, iç yapısal özelliklerine göre beş ana gruba ayrılabilir. Her bir grubun temel özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

#### **3.2.1. Taneli Malzemeler**

Bu tür malzemeler taneciklerden oluşur ve uygulama sırasında tanecikler arasında hava boşlukları bulunur. Taneciklerin rastgele bir düzenle sıralanması nedeniyle, hava hareketi oldukça yavaştır. Bu durum, taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini azaltır. Taneciklerin arasında oluşan hava boşlukları, yalıtım performansını artırır.

#### **3.2.2. Lifli Malzemeler**

Lifli malzemelerde, lifler arasındaki serbest hava kanallarının genişliği ve yoğunluğu nedeniyle düşük yoğunluk söz konusudur. Bu tür malzemelerde hava kanalları, taşınım yoluyla ısı transferine direnç oluşturur. Ancak taşınım yoluyla oluşan ısı transferi, iletim yoluyla meydana gelen ısı transferinden genellikle daha yüksektir. Lifli malzemeler, özellikle ses yalıtımı amacıyla önerilmektedir. Yalıtım performansını artırmak için lifler arasındaki boşlukların azaltılması gerekir.

#### **3.2.3. Hücreli Malzemeler**

Hücreli yapıya sahip malzemelerde, taşınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini minimum seviyeye indirmek için hücre boyutlarının mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Bu tür malzemeler, öncelikle ısı yalıtımı amacıyla kullanılmaktadır ve oldukça etkili sonuçlar sunar.

#### **3.2.4. Reflektif Malzemeler**

Reflektif malzemeler, düşük yutma katsayısına sahip olmaları nedeniyle, ısının büyük bir kısmını yansıtarak enerji kaybını önler. Bu özellikleri, özellikle ısı yansımaya gereken alanlarda etkili bir çözüm sunar.

#### **3.2.5. Karma Malzemeler**

Karma malzemeler, yukarıda belirtilen dört grup malzemenin iki ya da daha fazlasının bir araya gelmesiyle oluşur. Bu malzemeler, farklı özellikleri bir arada sunmayı hedefler. Ancak tüm özelliklerin tek bir malzemede eksiksiz bir şekilde bulunması mümkün değildir (Candan, 2007).

### **3.3. Isı Yalıtım Malzemeleri**

#### **3.3.1. Camyünü**

Camyünü, farklı sıcaklık değerlerine dayanıklı bir ısı yalıtım malzemesi olarak, 1919 yılında Avrupa'da geliştirilmiş ve 1967 yılından itibaren Türkiye'de üretilmeye başlanmıştır. Bu malzeme, silis kumu, soda ve boraks gibi inorganik hammaddelerin karışımından elde edilmektedir. Silis kumunun yüksek sıcaklıklarda (1200°C - 1250°C) eritilip elyaf haline getirilmesiyle üretilir.

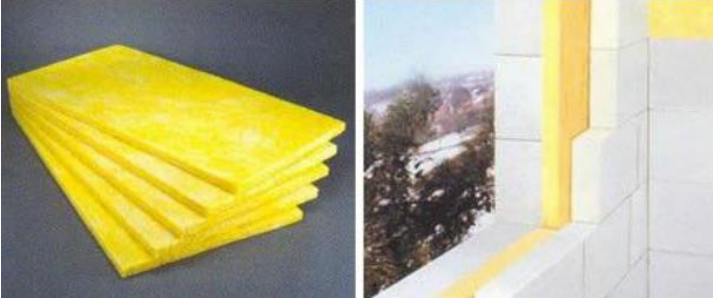
Camyünü, yapısal olarak amorf bir özellik sergiler ve lifleri arasında %99 oranında hava boşluğu bulunur.

Camyünü, bağlayıcı madde olmadan şilte formunda üretilebildiği gibi, fenol-formaldehit (bakalit) gibi bağlayıcı maddelerle sert levhalar halinde de üretilebilir. Bu bağlayıcı, malzemeye esneklik ve dayanıklılık kazandırır. Bakalitsiz camyünü beyaz renkte olurken, bakalit eklenmiş türü sarı renktedir ve Türkiye'de genellikle bu türü binalarda tercih edilmektedir. Bakalitsiz camyünü, genellikle kümes teli veya oluklu mukavva gibi taşıyıcı malzemelere sabitlenerek kullanılır.

Camyünü, DIN 4102 standardına göre A sınıfı yanmaz malzeme kategorisindedir. Bağlayıcı kullanılmamış camyünü 550°C'ye kadar dayanabilirken, bakalit içeren türler için bu sınır 250°C'dir. Bakalit, 250°C üzerinde yanmaya başlar ve gaz haline geçerek liflerin bağlanma özelliğini kaybetmesine neden olur. Camyününün TS 825 standardına göre belirlenmiş ısı iletkenlik değeri 0,040 W/mK'dir. Ayrıca ultraviyole ışınlar ve asit türlerinin çoğuna karşı dayanıklıdır. Ancak, su ile temas ettiğinde, lifler ıslanmamasına rağmen hava boşluklarının su ile dolması nedeniyle ısı yalıtım özelliğini kaybeder. Yoğunluğu düşük olan camyünü, basınca karşı oldukça hassastır ve bu nedenle yük taşıyan döşemelerde, yürünen çatılarda veya ters çatı sistemlerinde kullanılması uygun değildir (Aydın, 2010).



**Şekil 3.** Isıtılmayan Bir Çatı Arasında Cam Yünü Isı Yalıtım Ürününün Döşemeye Serilmesini Göstermektedir (Aydın, 2010).

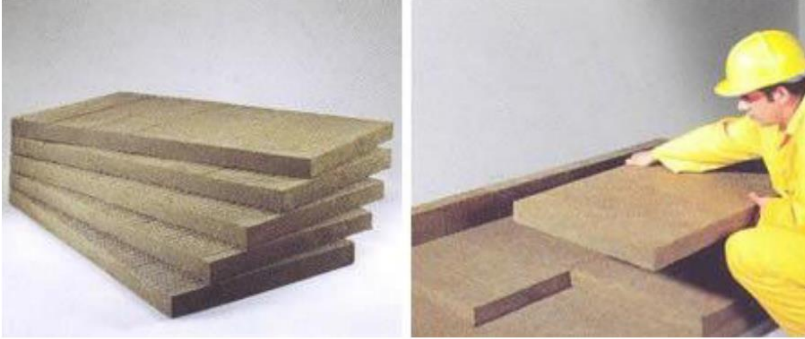


**Şekil 4.** Cam Yünü Isı Yalıtım Ürününün Katmanlı Dış Duvarda Uygulanmasını Göstermektedir (Aydın, 2010).

### 3.3.2. Taşyünü

Taşyünü, ilk defa 1897 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmiştir. Ancak yalıtım malzemesi olarak kullanımı, 1927 yılında başlamıştır. Türkiye'de ise 1993 yılında üretimine geçilmiştir. Hammaddesi, doğal mineraller olan bazalt taşı, kireçtaşı, dolomit, feldspat ve kalkerdir. Taşyünü, bazalt taşının yüksek sıcaklıklarda ( $1350^{\circ}\text{C}$  –  $1400^{\circ}\text{C}$ ) ergitilerek lif haline getirilmesiyle üretilir. Bu süreçte, geri dönüşümlü elyaf da bazalt ile birlikte eritilerek üretim aşamasına dahil edilir.

Elde edilen liflerin belirli bir kalınlıkta sabitlenmesi ve dayanıklılık kazanması için fenol-formaldehit bağlayıcı maddesi eklenir. Üretim şekline göre, düşük yoğunluklu taşyünü rulo halinde, yüksek yoğunluklu olanları ise levha şeklinde hazırlanır. Taşyününün lifli yapısı, onu hem ısı yalıtımı hem de ses yalıtımı için uygun bir malzeme haline getirir (Demir, 1999).



**Şekil 5.** Levha Şeklindeki Taşyünü Isı Yalıtım Malzemesinin Döşemede Uygulanmasını Göstermektedir





*Şekil 6. Rabbitz Teline Dikilmiş Taşyünü Şilte Yalıtım Malzemesini Göstermektedir (İZOCAM, 2003).*

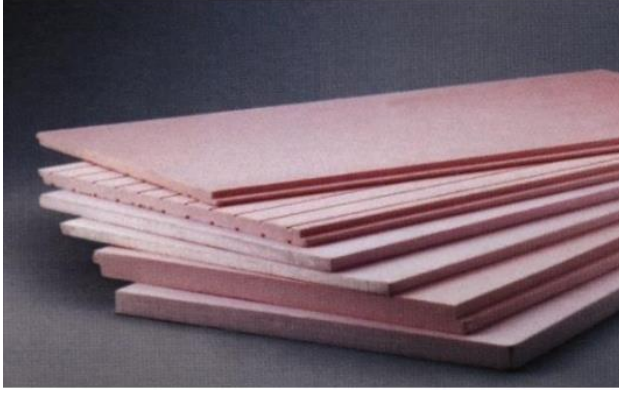
### **3.3.3. Ekstrüde Polistren Köpük (XPS)**

Ekstrüde polistren köpük (XPS), polistiren hammaddesinin ekstrüzyon yöntemi ile levha formunda üretilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Bu malzemenin en önemli özelliklerinden biri, üretim sırasında ortaya çıkan kapalı gözenekli hücre yapısıdır. Üretim sürecinde polistiren tanecikleri ısıtılarak eritilir, daha sonra katkı maddeleri ve köpük yapısını oluşturmak için şişirme ajanları eklenir. Bu karışım, belirli sıcaklık ve basınç koşulları altında bir üretim hattından geçirilerek istenilen kalınlıkta şekillendirilir. Çıkan malzeme, yüzey ve boyut özellikleri ihtiyaca göre düzenlendikten sonra nihai ürün haline getirilir.

Kapalı hücre yapısına sahip olan XPS, hem homojen bir dokuya hem de yüksek yalıtım performansına sahiptir. Bu özellikleri sayesinde malzeme, suya karşı dayanıklılık gösterir ve uzun süreli kullanımda performansını korur. Ayrıca, düzenli hücre yapısı, XPS'in yüksek yük dayanımına sahip olmasını sağlar.

Polistren, termoplastik bir malzeme olduğundan, üretim sürecinde ortaya çıkan artıklar tekrar işlenebilir ve yeniden kullanılabilir. Bu nedenle XPS üretim tesisleri genellikle minimum atıkla çalışır. Üretim sırasında kullanılmayan veya kesimlerden arta kalan malzemeler toplanır, işlenir ve yeniden polistiren taneciklerine dönüştürülerek sonraki üretimlerde değerlendirilir (Güç, 2006).

XPS üretiminde köpük yapısının oluşturulması amacıyla şişirici gaz olarak HCFC (Hidrokloroflorokarbon) kullanılmaktadır. Ancak HCFC, çevreye zararlı etkilerinden dolayı ozon tabakasının incelmesine neden olmaktadır.

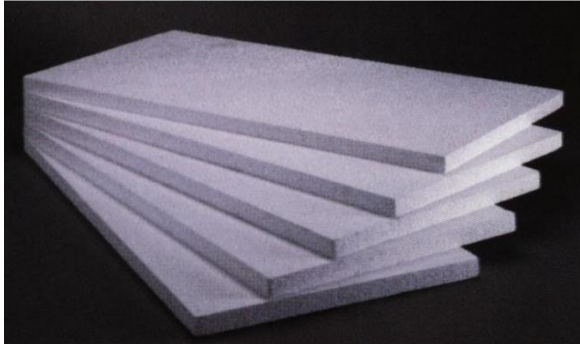


*Şekil 7. Haddelenmiş Polistren Köpük Isı Yalıtım Levhalarının Görünümünü Göstermektedir (İZODER, 2004).*

### **3.3.4. Ekspande Polistren Köpük (EPS)**

Ekspande Polistren Köpük (EPS), petrolden elde edilen, köpük yapısına sahip termoplastik bir ısı yalıtım malzemesidir. Kapalı gözenekli bir yapıya sahip olan bu malzeme, polistren taneciklerinin şişirilip birbirine kaynaştırılmasıyla üretilir. Taneciklerin şişirilmesi ve köpük oluşturulması sırasında pentan gazı kullanılmaktadır. Pentan, üretim sürecinde taneciklerin içinde yer alır ve zamanla hava ile yer değiştirir. Bu işlem sonucunda, EPS levhaların içinde çok sayıda küçük kapalı hücreler oluşur ve bu hücrelerde hareketsiz hava hapsolür.

EPS'nin bünyesinde bulunan malzemenin yaklaşık %98'i durgun havadan oluşur. Bu özellik, malzemenin etkili bir ısı yalıtım performansı sunmasını sağlar. Üretim sürecinin son aşaması olan şekillendirme (kalıplama) aşamasında, taneciklerin birbirine sıkıca bağlanması sağlanır. Ürünler, bloklar halinde üretilip kesilerek levha haline getirilir veya doğrudan levha şeklinde kalıplar içinde genişletilerek hazırlanabilir(Candan, 2007).



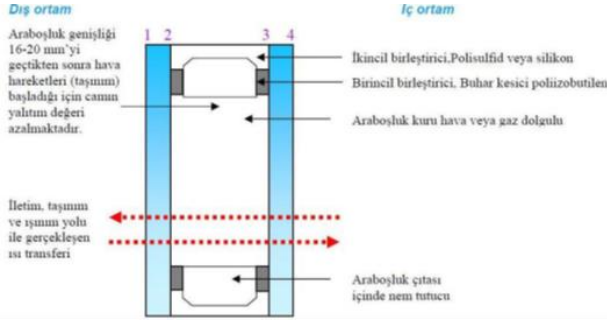
*Şekil 8. Polistren Köpük (EPS) Isı Yalıtım Levhalarını Göstermektedir*

(İZODER, 2004).

### 3.3.5. Yalıtımlı Cam Ünitesi

Yalıtımlı cam ünitelerinde ısı transferi, iletim, taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşen enerji geçişlerinin bir kombinasyonudur. Bu sistemlerde optimum hava boşluğu kalınlığı genellikle 16-20 mm arasında olmalıdır. Taşınım yoluyla ısı kaybını azaltmak için akışkan hareketi sınırlandırılmalı ve yüksek viskoziteye sahip gazlar tercih edilmelidir. Ayrıca, taşınım ısı iletimini düşürmek için düşük ısı iletkenlik katsayısına ( $\lambda$ ) sahip gazlar kullanılabilir.

Işınım yoluyla gerçekleşen ısı transferi, cam yüzeylerine düşük yayımlı kaplamalar eklenerek minimum seviyeye indirilebilir. Geleneksel çift camlı pencerelerde, iç ortamdaki dışarıya olan ısı kaybının yaklaşık %70'i ışınım yoluyla, %30'u ise iletim yoluyla gerçekleşmektedir. Çift camlı pencerelerin önemli avantajlarından biri, yalnızca düşük U-değeri sağlamaları değil, aynı zamanda bu değeri çevresel koşullardan bağımsız olarak sabit tutabilmeleridir (University of Sheffield, 1999).



Şekil 9. Çift Tabakalı Yalıtım Camı Kesitini Göstermektedir

(University of Sheffield, 1999).

## 4. ISI YALITIM HESAPLAMALARI

### 4.1. Bir Bina İçin Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacı Hesaplamalarında

#### Kullanılan Formüller

$$Q_{yıl} = \sum Q_{ay}$$

(1)

$$Q_{ay} = [ H(\theta_i - \theta_e) - \eta_{ay}(\phi_{i,ay} + \phi_{s,ay}) ] \cdot t$$

(2)

- Binanın özgül ısı kaybının hesabı

Binanın özgül ısı kaybı (H), iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ( $H_T$ ) ve havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybının ( $H_v$ ) toplanması ile bulunur.

$$H = H_T + H_v \quad (3)$$

İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı, (4) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplamada, yapı elemanlarının bünyesinden iletilen ısı kaybına, eğer mevcutsa, ısı köprülerinden kaynaklanan ısı kaybı da eklenir. Isı köprüsü, çevresindeki yüzeylere göre farklı bileşimde olan, ısı kaybı oranı binanın ortalamasından daha yüksek ve kış aylarında iç yüzey sıcaklığı daha düşük olan bölgelerdir.

$$H_T = \Sigma AU + 1 U_l$$

(4)

$$\Sigma AU = U_{DA}A_D + U_{p, Ap} + U_{k, Ak} + 0,8 U_{T, AT} + 0,5 U_{tA_t} + U_{dA_d} + 0,5U_{dsA_{ds}} \quad (5)$$

**UYARI:** Çatı döşemesi doğrudan dış hava ile temas ediyorsa, eşitlikte yer alan  $U_T$ 'nin önündeki 0,8 katsayısı 1 olarak alınır.

- Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybının hesabı

Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı (6) no'lu eşitlik ile hesaplanır.

Doğal havalandırma:

$$H_v = \rho \cdot c \cdot V^1 = \rho \cdot c \cdot n_h \cdot V_h = 0,33 \cdot n_h \cdot V_h \quad (6)$$

“ $\rho$ ” ve “ $c$ ” değerleri sıcaklık ve basınca bağlı olarak küçük değişiklikler gösterebilir, ancak aşağıdaki denklemden bu etkiler göz ardı edilmiştir. Kullanılan değerler, 20 °C sıcaklık ve 100 kPa basınç için geçerlidir. Ayrıca, giren ve çıkan hava arasındaki entalpi farkı ihmal edilmiştir. 0,33 katsayısının hesabında kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$0,33 = (\rho \cdot c / 3600) = (1,184 \cdot 1006 / 3600) = 0,33 \text{ Jh/m}^3\text{Ks} = \text{Wh/m}^3\text{K}$$

Doğal havalandırma yapılan binalarda havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı hesabında havalandırma sayısı “ $n_h$ ” değeri 0,8 ( $\text{h}^{-1}$ ) olarak alınır.

- Aylık ortalama iç kazançlar ( $\phi_{i,ay}$ )

$$\text{Konutlarda, okullarda ve normal donanımlı binalarda } \phi_{i,ay} \leq 5 \times A_n \quad (W)$$

$$\text{Yüksek iç enerji kazançlı binalarda } \phi_{i,ay} \leq 10 \times A_n \quad (W)$$

$$A_n = 0,32 \times V_{\text{brüt}} \quad (7)$$

- Aylık ortalama güneş enerjisi kazançları ( $\phi_{s,ay}$ )

$$\phi_{s,ay} = \sum r_{i,ay} \times g_{i,ay} \times I_{i,ay} \times A_i \quad (8)$$

Güneş enerjisi geçirme faktörü:

$$g_{i,ay} = F_w \cdot g \quad (9)$$

$F_w$ : Camlar için düzeltme faktörüdür.  $F_w = 0,8$  alınır

Kazanç kullanım faktörü ( $\eta$ )

$$\eta_{ay} = 1 - e^{(-1/KKO_{ay})} \quad (10)$$

Burada;

$KKO_{ay}$  Kazanç / kayıp oranı olup, aşağıda verildiği gibi hesaplanmalıdır.

$$KKO_{ay} = (\phi_{i,ay} + \phi_{s,ay}) / H(Q_{i,ay} - Q_{e,ay}) \quad (11)$$

$KKO_{ay}$  oranı 2,5 ve üzerinde olduğunda o ay için ısı kaybı olmadığı kabul edilir (TSE, 2013).

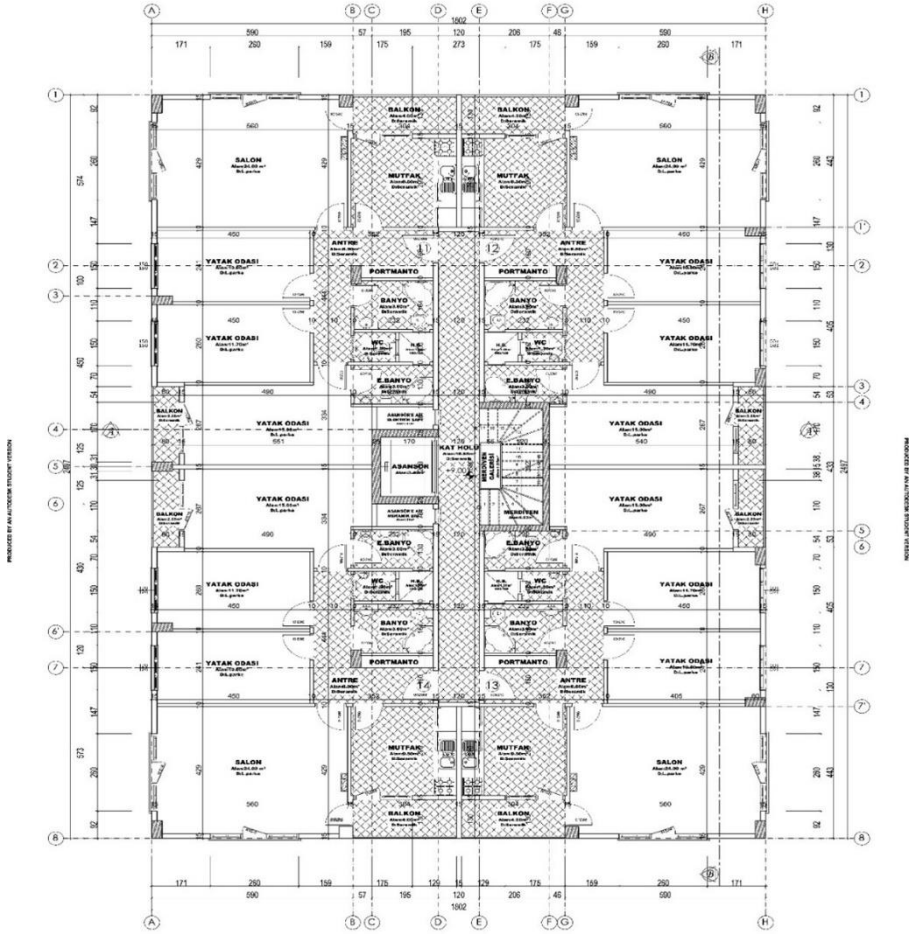
## 4.2. Ts 825'e Göre Isı Yalıtım Hesaplamaları Ve Excel İle Örnek Bina Analizi

### 4.2.1. Binanın İncelenmesi

İstanbul'un Küçükçekmece Mahallesi'nde bulunan bu bina, bitişik nizamda tasarlanmış olup, zemin kat ve dört normal kattan oluşmaktadır. Bina, tek girişli bir yapıya sahiptir. Her katta dört adet daire bulunmaktadır ve daireler 3+1 düzeninde planlanmıştır. Zemin katta ise iki daire ve iki dükkân yer almaktadır. Zemin katında dükkânların bulunması nedeniyle, zemin kat ve üst katlar ayrı ayrı incelenmektedir.

#### 4.2.1.1. Normal Kattların İncelenmesi

Şekil 10'da plan şeması gösterilen binanın normal katlarının toplam alanı  $A_{(top)}$  1931,6788 metrekare ( $m^2$ ) ve brüt hacmi  $V_{(brüt)}$  5399,5128 metreküp ( $m^3$ ) olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 10.** Normal Kat Plan Şemasını Göstermektedir

Tablo 1, normal katlardaki farklı yapı elemanlarının (dış duvarlar, pencereler, döşemeler vb.) yüzey alanları ve ısı geçirgenlik katsayıları (U değerleri) üzerinden hesaplanan özgül ısı kaybını göstermektedir. Her yapı elemanının alanı ve U değeri kullanılarak toplam ısı kaybı hesaplanmıştır. Tabloda yer alan veriler, normal katlardaki enerji kaybının hangi yapı elemanlarında yoğunlaştığını belirlemek için hazırlanmıştır. Bu analiz, yalıtım uygulamalarının hangi alanlarda iyileştirilmesi gerektiği konusunda yol gösterici niteliktedir.

Tablo 1. Normal Katlardaki Özgül Isı Kaybını Göstermektedir

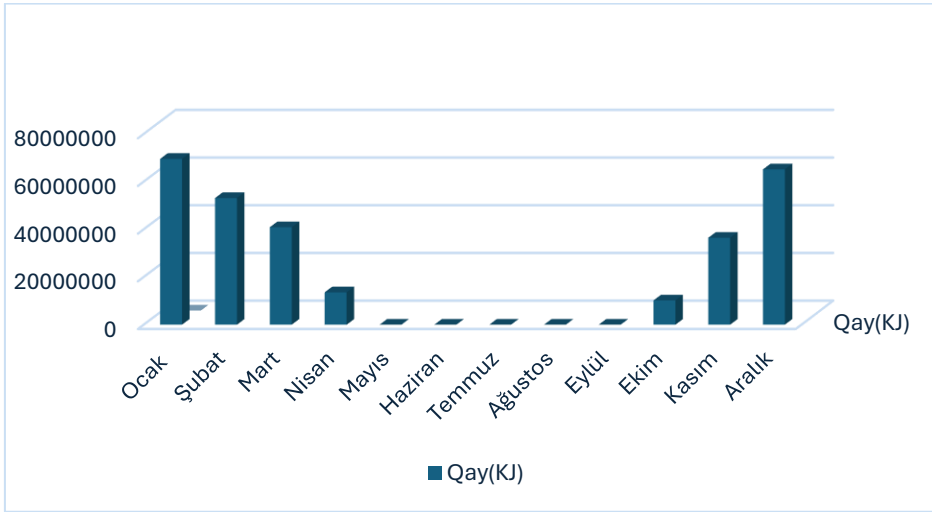
Isı kaybeden yüzey	Binadaki yapı elemanları	Yapı elemanı kalınlığı d (m)	Isıl iletkenlik K (W/mK)	Isıl iletkenlik direnci R (m <sup>2</sup> K/W)	Isı geçirgenlik katsayısı U (W/m <sup>2</sup> K)	Isı kaybedilen yüzey alanı A (m <sup>2</sup> )	Isı kaybı A x U W/K
Taban	Ri			0.17			
	Re			0.000			
	İğne yapraklı ahşap	0.01	0.13	0.077			
	şap	0.02	1.4	0.014			
	betonarma	0.12	2.5	0.048			
	ısı yalıtım malzemesi(taş yünü)	0.05	0.04	1.250			
	sıva	0.08	0.35	0.229			
Toplam				1.788	0.559	449.9594	251.686
Tavan	Ri			0.130			
	Re			0.080			
	İç Sıva	0.02	0.87	0.023			
	Demirli beton	0.12	2.1	0.057			
	Cam Yünü	0.1	0.04	2.500			
Toplam				2.790	0.358	449.9594	161.268
Dış Duvar	Ri			0.13			
	Re			0.04			
	İç Sıva	0.02	0.87	0.023			
	yatay delikli tuğla	0.19	0.45	0.422			
	ısı yalıtım malzemesi(EPS)	0.05	0.035	1.429			
	Dış Sıva	0.03	1.4	0.021			
Toplam				2.065	0.484	825.36	399.649
pencere					2.4	206.4	495.36
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı							1149.866873
$\Sigma AU = U_D A_D + U_p \cdot A_p + 0.8 U_T \cdot A_T + 0.5 U_i A_i = 1149.866873$ W/K <b>Özgül ısı kaybı ; H = HT + Hv</b> <b>iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = <math>\Sigma AU + I U_i</math>.</b> <b>Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı Hv</b> $Hv = 0,33 \cdot n_h \cdot V_h = 0.33 \times 0.8 \times 0.8 \times 12 \times 18.02 \times 24.97 = 1140.377$ W/K $H = HT + Hv = 1149.866873 + 1140.377 = 2290.2438$ W/K							
Binanın ısıtılan Brüt Hacmi $V_{brüt}$ (m <sup>3</sup> )							5399.5128
A <sub>n</sub> : Binanın hullanım alanı (m <sup>2</sup> ) $A_n = 0.32 \times V_{brüt}$							1727.844096
A <sub>brüt</sub> : Binanın Toplam Alanı $A = (2 \times 18.02 \times 12) + (2 \times 24.97 \times 12) + (2 \times 18.02 \times 24.97)$ (m <sup>2</sup> )							1931.6788

Tablo 2, normal katlardaki aylık ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacını hesaplamakta ve bu değerleri izin verilen yıllık ısıtma enerji ihtiyacıyla karşılaştırmaktadır. Hesaplanan veriler, normal katlar için gerekli enerji miktarını detaylı bir şekilde ortaya koyarken, mevcut enerji ihtiyacının izin verilen sınırları aşmış olmadığını analiz etme imkanı sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, normal katların hesaplanan yıllık enerji ihtiyacının izin verilen sınırların altında olduğu belirlenmiştir. Bu durum, seçilen yalıtım malzemesinin

enerji tasarrufu sağlama açısından etkili olduğunu ve normal katların ısıtma ihtiyacının optimize edilerek enerji yönetmeliklerine uygun hale getirildiğini göstermektedir.

**Tablo 2. Normal Katların Aylık ve Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacını Göstermektedir**

Aylar	Isı kaybı			Isı kazançları			KKO	kazanç kullanım faktörü $\eta$	Isıtma enerji ihtiyacı $Q_{ay}$ (kJ)
	Özgül ısı kaybı $H = HT+Hv$ (W/K)	Sıcaklık farkı $\theta_i - \theta_e$ (K,C)	Isı kayıpları $H(\theta_i - \theta_e)$	İç ısı kazancı $\phi_i$ (W)	Güneş enerjisi kazancı $\phi_s$ (W)	TOPLAM $\phi_T = \phi_i + \phi_s$ (W)			
		2290.244	16.1	36872.925	8639.2205	3466.714			
Ocak	2290.244	16.1	36872.925	8639.2205	3466.714	12106	0.328	0.952	67877877.564
Şubat	2290.244	14.6	33437.559	8639.2205	4393.786	13033	0.390	0.923	51786445.539
Mart	2290.244	11.7	26795.852	8639.2205	5381.856	14021	0.523	0.852	39770796.036
Nisan	2290.244	6.2	14199.512	8639.2205	6144.077	14783	1.041	0.617	13151147.045
Mayıs	2290.244	1.0	2290.244	8639.2205	7180.358	15820	6.907	0.135	0.000
Haziran	2290.244	-3.5	-8015.853	8639.2205	7571.060	16210	-2.022	-0.640	0.000
Temmuz	2290.244	-5.9	-13512.438	8639.2205	7364.390	16004	-1.184	-1.326	0.000
Ağustos	2290.244	-5.3	-12138.292	8639.2205	6834.931	15474	-1.275	-1.191	0.000
Eylül	2290.244	-0.9	-2061.219	8639.2205	5656.435	14296	-6.936	-0.155	0.000
Ekim	2290.244	4.9	11222.195	8639.2205	4474.483	13114	1.169	0.575	9859958.665
Kasım	2290.244	10.5	24047.560	8639.2205	3318.106	11957	0.497	0.866	35486020.738
Aralık	2290.244	15.2	34811.706	8639.2205	3020.890	11660	0.335	0.949	63586755.263
Yıllık Isıtma İhtiyacı $Q_{yil}$ (kJ)								281519000.851	
Yalıtım Hesabı $Q = Q_{yil} / A_n$ (Kj/m <sup>2</sup> )								162930.7884	
Yalıtım Hesabı $Q$ (kwh/m <sup>2</sup> )								45.25855234	
Yalıtılmış Bir Binanın Sahip Olabileceği Max Isı Kaybı $Q' < 2.B\theta$ (göde bir bina için) (kwh/m <sup>2</sup> )								49.44254013	
$Q < Q'$ kullanılan yalıtım malzemesi uygundur									

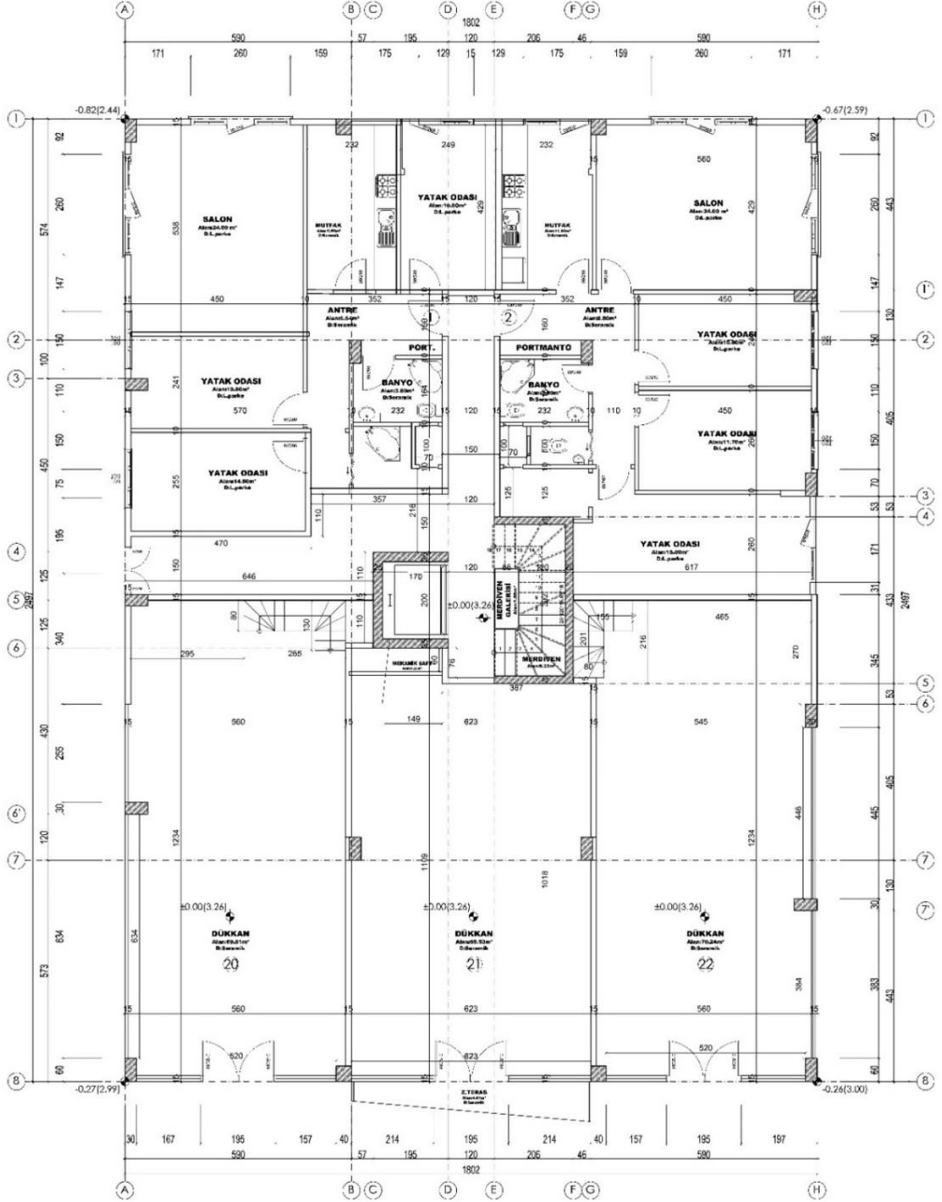


**Şekil 11: Aylara Göre Normal Katların Isıtma Enerjisi İhtiyacını Göstermektedir**



#### 4.2.1.2. Zemin Katı İncelenmesi

Şekil 12'de plan şeması gösterilen binanın zemin katı toplam alanı  $A_{(top)}$  1157,8588 metrekare ( $m^2$ ) ve brüt hacmi  $V_{(brüt)}$  1349,8782 metreküp ( $m^3$ ) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 12. Zemin Kat Plan Şemasını Göstermektedir.

Tablo 3, zemin kattaki farklı yapı elemanlarının (dış duvarlar, pencereler, döşemeler vb.) yüzey alanları ve ısı geçirgenlik katsayıları ( $U$  değerleri)

üzerinden hesaplanan özgül ısı kaybını göstermektedir. Her yapı elemanının alanı ve U değeri kullanılarak toplam ısı kaybı hesaplanmıştır. Tabloda yer alan veriler, zemin katın enerji kaybının hangi yapı elemanlarında yoğunlaştığını belirlemek için hazırlanmıştır. Bu analiz, yalıtım uygulamalarının hangi alanlarda iyileştirilmesi gerektiği konusunda yol gösterici niteliktedir.

Tablo 3. Zemin Katındaki Özgül Isı Kaybını Göstermektedir

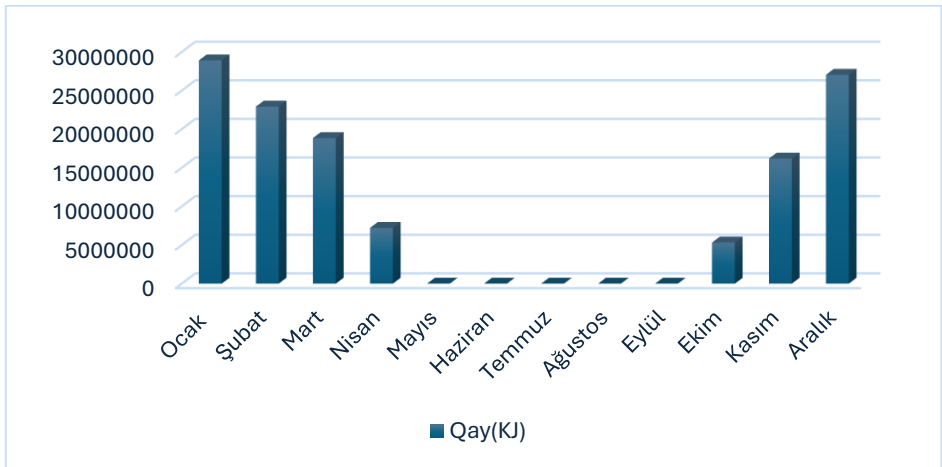
Isı kaybeden yüzey	Binadaki yapı elemanları	Yapı elemanı kalınlığı d (m)	Isıl iletkenlik K (W/mK)	Isıl iletkenlik direnci R (m <sup>2</sup> K/W)	Isı geçirgenlik katsayısı U (W/m <sup>2</sup> K)	Isı kaybedilen yüzey alanı A (m <sup>2</sup> )	Isı kaybı A x U W/K
Tavan	Ri			0.17			
	Re			0.000			
	İğne yapraklı ahşap	0.01	0.13	0.077			
	şap	0.02	1.4	0.014			
	betonarma	0.12	2.5	0.048			
	ısı yalıtım malzemesi (taş yünü)	0.05	0.04	1.250			
	sıva	0.08	0.35	0.229			
<b>Toplam</b>				<b>1.788</b>	<b>0.559</b>	<b>449.9594</b>	<b>251.686</b>
döşme	Ri			0.170			
	Re			0.000			
	karo mozaik	0.03	1.3	0.023			
	Tesviye beton	0.06	1.4	0.043			
	grebeton	0.15	1.74	0.086			
	curuf	0.25	0.23	1.087			
<b>Toplam</b>				<b>1.581</b>	<b>0.633</b>	<b>449.9594</b>	<b>284.690</b>
Dış Duvar	Ri			0.13			
	Re			0.04			
	İç Sıva	0.02	0.87	0.023			
	yatay delikli tuğla	0.19	0.45	0.422			
	ısı yalıtım malzemesi (EPS)	0.05	0.035	1.429			
	Dış Sıva	0.03	1.4	0.021			
<b>Toplam</b>				<b>2.065</b>	<b>0.484</b>	<b>237.18</b>	<b>114.845</b>
pencere					2.4	20.76	49.824
kapı					2.4	16.8	40.32
Yapı elemanlarından iletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı toplamı							548.6831112
$\sum AU = U_b A_D + U_p A_p + 0.8 U_r A_r + 0.5 U_i A_i = 548.6831112$ W/K							
<b>Özgül ısı kaybı ; H = HT + Hv</b>							
<b>İletim ve taşınım yoluyla gerçekleşen ısı kaybı ; HT = <math>\sum AU + I U</math></b>							
<b>Havalandırma yoluyla gerçekleşen ısı kaybı Hv</b>							
Hv = 0,33 . n <sub>h</sub> . V <sub>h</sub> = 0.33 x 0.8 x 0.8 x 3x18.02x24.97 = 285.094 W/K							
H = HT + Hv = 548.681112 + 285.094 = 833.775112 W/K							
Binanın Isıtılan Brüt Hacmi V <sub>brüt</sub> (m <sup>3</sup> )							1349.8782
A <sub>n</sub> : Binanın hullanım alanı (m <sup>2</sup> ) A <sub>n</sub> = 0.32x V <sub>brüt</sub>							431.961024
A <sub>brüt</sub> : Binanın Toplam Alanı A = (2x18.02x3) + (2x24.97x3) + (2x18.02x24.97) (m <sup>2</sup> )							1157.8588

Tablo 4, zemin katın aylık ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacını hesaplamakta ve bu değerleri izin verilen yıllık ısıtma enerji ihtiyacıyla karşılaştırmaktadır.

Hesaplanan veriler, zemin kat için gerekli enerji miktarını detaylı bir şekilde ortaya koyarken, mevcut enerji ihtiyacının izin verilen sınırları aşmış olmadığını analiz etme imkanı sunmaktadır. Analiz sonuçlarına göre, zemin katın hesaplanan yıllık enerji ihtiyacının izin verilen sınırların altında olduğu belirlenmiştir. Bu durum, seçilen yalıtım malzemesinin enerji tasarrufu sağlama açısından etkili olduğunu ve zemin katın ısıtma ihtiyacının optimize edilerek enerji yönetmeliklerine uygun hale getirildiğini göstermektedir.

Tablo 4. Zemin Katın Aylık ve Yıllık Isıtma Enerjisi İhtiyacını Göstermektedir

Aylar	Isı kaybı			Isı kazançları			KKO	kazanç kullanım faktörü $\eta$	Isıtma enerji ihtiyacı $Q_{iy}$ (kJ)
	Özgül ısı kaybı $H = HT+HV$ (W/K)	Sıcaklık farkı $\theta_i - \theta_e$ (K, C)	Isı kayıpları $H(\theta_i - \theta_e)$	İç ısı kazancı $\phi_i$ (W)	Güneş enerjisi kazancı $\phi_s$ (W)	Toplam $\phi_i - \phi_i + \phi_s$ (W)			
Ocak	833.775	16.1	13423.779	2160	365.6016	2525	0.188	0.995	29223445.482
Şubat	833.775	14.6	12173.117	2160	458	2618	0.215	0.990	23176988.234
Mart	833.775	11.7	9755.189	2160	548	2708	0.278	0.973	19072974.338
Nisan	833.775	6.2	5169.406	2160	619	2779	0.538	0.844	7317032.146
Mayıs	833.775	1.0	833.775	2160	712	2872	3.444	0.252	0.000
Haziran	833.775	-3.5	-2918.213	2160	749	2908	-0.997	-1.727	0.000
Temmuz	833.775	-5.9	-4919.273	2160	729	2889	-0.587	-4.490	0.000
Ağustos	833.775	-5.3	-4419.008	2160	682	2842	-0.643	-3.735	0.000
Eylül	833.775	-0.9	-750.398	2160	675	2834	-3.777	-0.308	0.000
Ekim	833.775	4.9	4085.498	2160	464	2624	0.642	0.789	5396361.926
Kasım	833.775	10.5	8754.639	2160	349	2509	0.287	0.969	16387986.543
Aralık	833.775	15.2	12673.382	2160	320	2479	0.196	0.994	27348700.980
Yıllık ısıtma ihtiyacı $Q_{iy}$ (kJ)									127918489.649
Yalıtım Hesabı $Q = Q_{iy} / A_n$ (Kj/m <sub>2</sub> )									296134.3328
Yalıtım Hesabı $Q$ (kwh/m <sub>2</sub> )									82.2595369
Yalıtılmış Bir Bina için Sahip Olabileceği Max Isı Kaybı $Q'$ (2. Bölgede bir bina için) (kwh/m <sub>2</sub> )									84.44254013
$Q < Q'$ kullanılan yalıtım malzemesi uygundur									



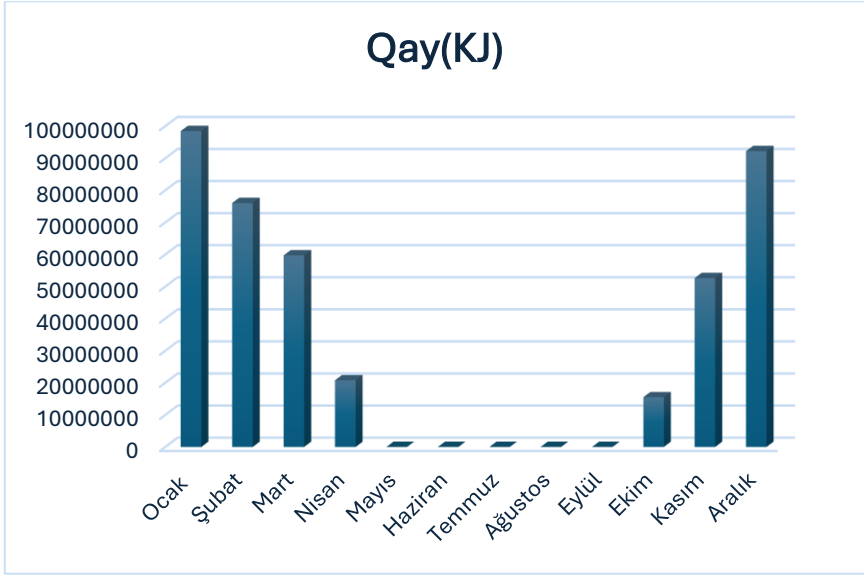
Şekil 13. Aylara göre zemin katın ısıtma enerji ihtiyacı gösterilmektedir.

#### 4.2.1.3. Bina Geneli Toplam Isıtma Enerjisi

Tablo 5, binanın aylık ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacını (kJ ve kWh biriminde) ve kullanılan yalıtım malzemesinin uygunluğunu analiz etmektedir. Yıllık ısıtma enerji ihtiyacı, 415355432 kJ (115376.50 kWh) olarak hesaplanmış, özgül ısı kaybı ise 53.42 kWh/m<sup>2</sup> bulunmuştur. Kullanılan yalıtım malzemesinin maksimum izin verilen ısı kaybı sınırının (56.44 kWh/m<sup>2</sup>) altında olduğu belirlenmiş ve sonuç olarak kullanılan yalıtım malzemesi uygundur.

Tablo 5. binanın toplam aylık ve yıllık ısıtma enerji ihtiyacını göstermektedir.

Aylar	Isıtma enerji ihtiyacı (Qay (kJ))
Ocak	98467504.19
Şubat	76042140.54
Mart	59715191.52
Nisan	20776860.15
Mayıs	0.00
Haziran	0.00
Temmuz	0.00
Ağustos	0.00
Eylül	0.00
Ekim	15491019.04
Kasım	52646932.39
Aralık	92215784.20
Yıllık Isıtma İhtiyacı Q <sub>yıl</sub> (kJ)	415355432.00
Yalıtım Hesabı Q=(kwh)	115376.50
Yalıtım Hesabı Q (kwh/m <sup>2</sup> )	53.42
Yalıtımış Bir Binanın Sahip Olabileceği Max Isı Kaybı Q` (2.Bölgede bir bina için) (kwh/m <sup>2</sup> )	56.44
Q<Q` kullanılan yalıtım malzemesi uygundur	



*Şekil 14, Aylara Göre Binanın Toplam Isıtma Enerji İhtiyacı*

## 5. SONUÇ

Binada uygulanan yalıtım malzemesi, enerji verimliliği, maliyet tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Yapılan hesaplamalarda, binanın yıllık toplam ısıtma enerji ihtiyacının 415355432 kJ (115376.50 kWh) olduğu ve kullanılan yalıtım malzemesi sayesinde özgül ısı kaybının 53.42 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplandığı görülmüştür. Bu değer, 2. bölge için belirlenen maksimum izin verilen sınır olan 56.44 kWh/m<sup>2</sup>'nin altında kalmaktadır, bu da yalıtım malzemesinin yönetmeliklere uygun olduğunu kanıtlamaktadır.

Enerji verimliliği açısından yalıtım, bina genelinde önemli bir enerji tasarrufu sağlamıştır. Enerji kaybının minimize edilmesi, ısıtma için harcanan toplam enerji miktarını azaltmış ve bina kullanıcılarına ekonomik avantaj sunmuştur. Ayrıca, enerji ihtiyacının düşmesi sayesinde fosil yakıt tüketimi azalmış, böylece atmosfere salınan zararlı gazlar (CO<sub>2</sub> ve diğer sera gazları) sınırlandırılmıştır.

Sonucunda, seçilen yalıtım malzemesi hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunarken, bina enerji yönetmeliklerine tam uyum sağlamıştır. Bu durum, yalıtım uygulamalarının yalnızca enerji tasarrufu değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir yaşam ortamı yaratmada da kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

## Kaynakça

- Akkoyunlu, M. T., Pekel, E., Akkoyunlu, M. C., Pusat, S., Özkan, C., & Karab, S. S. (2018). Determination of Effective Parameters for Coal Moisture Content Determination Using a 'Design of Experiment' Method. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 38(8), 443–450. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1300582>
- Aydın, İ. (2010). *Binalarda uygulanan ısı yalıtım sistemlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Baneaz, M. O. O., & Akkoyunlu, M. T. (2023). Türkiye’de bina zarfları için enerji verimliliği simülasyon programlarının ve enerji tasarrufu optimizasyon analizinin incelenmesi. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9), 202–217. <https://doi.org/10.12911/22998993/169178>
- Baneaz, M. O. O., & Akkoyunlu, M. T. (2024). The Application of Rivet, HAP, and Ecotect Programs for the Analysis of Building Envelope Parameters to Optimize Energy Efficiency and Energy Savings: A Case of Baghdad-Iraq. *3C TIC. Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC*, 13(1), 15–38. <https://doi.org/10.17993/3ctic.2024.131.15-38>
- Bektaş, V., Çerçevik, A. E., & Kandemir, S. Y. (2017). Binalarda ısı yalıtımının önemi ve ısı yalıtım malzemesi kalınlığının yalıtıma etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 36-40. <https://edergi.bilecik.edu.tr/index.php/fbd>
- Candan, N. (2007). *Isı yalıtım sistemleri ve özelliklerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Demir, P. (1999). *Isı yalıtım malzemeleri ve yapılarda kullanımları* (Yayınlanmamış Bitirme Ödevi). Trakya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu.
- Evcil, N. (1999). *Yapı kabuğunda ısı yalıtım değerlerinin yapı formuna bağlı olarak belirlenmesi için bir yöntem önerisi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güç, A. (2006). Yapılarda ekstrüde polistiren ısı yalıtımı. *İzolasyon Dünyası Dergisi*, (52), 30-31.
- İZOCAM. (2003). *Camyünü, taşıyünü, ekspande polistiren, ekstrüde polistiren, elastomerik kauçuk, İzocam Optimum, cam giydirme cephe levhası ürün kataloğu*. İstanbul.
- İZODER. (2004). *Bina ve tesisatta ısı yalıtımı genel teknik şartnamesi*. İstanbul.

- Karakaş, İ. Y. (2018). *Binalarda ısı yalıtımı uygulamaları ve maliyet yönünden karşılaştırması* (Uzmanlık Tezi). İller Bankası Anonim Şirketi, Ankara, Türkiye
- Karakoç, V. R. (2015). *Çorum ilindeki binalarda kullanılan farklı türdeki ısı yalıtım malzemelerinin optimum kalınlığının hesaplanması* (Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, Türkiye.
- Mermet, M. (2019). *Bina ısı yalıtım sistemlerinin incelenmesi ve optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye
- Pusat, S., Akkoyunlu, M. T., Pekel, E., Akkoyunlu, M. C., Özkan, C., & Kara, S. S. (2016). Estimation of coal moisture content in convective drying process using ANFIS. *Fuel Processing Technology*, 147, 12–17.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.010>
- Sarucan, A., Akkoyunlu, M. C., & Baş, A. (2010). Analitik Hiyerarşi Proses Yöntemi ile Rüzgar Türbini Seçimi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(1), 11–18.
- Türk Standartları Enstitüsü (TSE). (2013). *TS 825: Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Ankara: TSE.
- University of Sheffield. (1999). *Technologies and techniques: Bioclimatic design*.
- Ülker, S. (2009). *Isı yalıtım malzemelerinin özelliklerinin uygulamaya etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- ZODER (Isı, Ses ve Su İzolasyoncuları Derneği). (2003). *T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı Denetim Kuruluşları Yalıtım Seminerleri* (13 Mayıs-11 Haziran). İstanbul.

## **8. Bölüm**

# **SICAK PRESLEME VE NANOTEKNOLOJİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN ÇEVRE DOSTU AMBALAJ MATERYALLERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**İdris KAYNAK<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi; Uşak Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü Kaynak Teknolojisi Programı. idris.kaynak@usak.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8278-9230



## ÖZET

Genel olarak plastik kirliliği özellikle mikroplastikler çevreye yayılarak su ve gıda zincirine karışmaktadır. İnsanlar ve deniz canlıları bu parçacıkları yutarak sağlık sorunları yaşamaktadır. Mikroplastikler, kanser, organ hasarı ve üreme bozuklukları gibi ciddi sağlık etkilerine yol açabilmektedir. Bu durum, ekosistemleri tehdit ederken, biyolojik çeşitliliği de olumsuz etkiler. Plastik kirliliği ve mikroplastik tehditi gibi küresel sorunlarla mücadelede biyobozunur malzemeler önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmamızda, %30 ve %50 deniz yosunu katkılı polilaktik asit (PLA) malzemelerinin yapısal, morfolojik, termal, mekanik ve biyolojik özellikleri optimize edilerek sürdürülebilir özelinde alternatif materyaller geliştirilmiştir. Yanmazlık özellikler kapsamında alev direncinde belirgin iyileşmeler sağlanmıştır. Mekanik ve termal analiz sonuçlarına göre, %30 deniz yosunu katkılı PLA, optimum mekanik özellikler sunarken, termal özelliklerde hafif sıcaklık düşüşleri tespit edilmiştir. Yapısal ve morfolojik analizlere göre FTIR ve FEGSEM sonuçları, deniz yosunlarının PLA içerisinde homojen dağılım ve yapısal bütünlüğünü doğrulamıştır. Deniz yosunu katkılı PLA numunelerinden, sıcak presleme ve nanoteknolojik elektroğirme yöntemleriyle nihai ürünler haline başarıyla getirilmiş ve gıda ambalajı gibi sektörlerde uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Çalışmamızda üretilen kompozit ambalajlar, mikroplastik kirliliğinin azaltılması, karbon ayak izinin düşürülmesi ve ekonomik katma değer yaratılması açısından büyük bir potansiyel taşımaktadır. Çalışmamız, sürdürülebilir biyoplastiklerin endüstriyel ölçekte yaygınlaşmasıyla çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayarak plastik kirliliğiyle mücadelede güçlü bir çözüm sunabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyoplastik, Plastik Kirliliği, Deniz Yosunu Katkılı PLA, Sürdürülebilir Malzemeler, Endüstriyel Uygulamalar

## 1. GİRİŞ

Plastik kirliliği, dünya genelinde çevresel sorunların başında yer almakta ve özellikle mikroplastiklerin yayılması, ekosistemler üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Plastiklerin çevreye verdiği zararlar, biyolojik çeşitliliği tehdit etmekte ve insanlar ile deniz canlıları üzerinde sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Bu sorunlar, plastiklerin doğada bozunmaması ve geri dönüşüm süreçlerinin zorlukları ile daha da karmaşıklaşmaktadır. Özellikle mikroplastikler, 5 mm'den küçük parçalara bölünerek denizlerde ve toprakta uzun süre kalarak çevreye yayılmakta, deniz canlıları tarafından tüketilmekte ve sonunda insan gıda zincirine dahil olmaktadır. Dünya Doğayı Koruma Vakfı'nın (WWF) 2020 raporuna göre, denizlerdeki tüm balık türlerinin %44,3'ünde mikroplastikler tespit edilmiştir ve bu sorunun 2050 yılına kadar dört katına çıkması beklenmektedir (Bayak, 2022). Canlı yaşamını tehdit eden mikroplastiklerin insan vücudundaki görüntüsü Şekil 1'de gösterilmektedir (<https://imgroupofresearchers.com/the-devastating-impact-of-micro-plastics-on-human-health-and-marine-life/>)



**Şekil 1:** Canlı yaşamını tehdit eden mikroplastiklerin insan vücudundaki görüntüsü (<https://imgroupofresearchers.com/the-devastating-impact-of-micro-plastics-on-human-health-and-marine-life/>)

Mikroplastiklere özelinde plastik kirliliğine karşı sürdürülebilirlik çerçevesinde biyobozunur ambalajların geliştirilmesi, plastik kirliliği ile mücadelede büyük önem taşımaktadır. Plastiklerin çevre dostu alternatifleri olarak biyoplastikler, doğada biyolojik olarak parçalanabilen ve çevreye zarar vermeyen ürünler sunmaktadır. Bu ürünler, mikroplastiklerin yayılmasını

engellemeye ve doğanın plastik atıklarla kirlenmesini önlemeye yardımcı olmaktadır. Özellikle deniz yosunları, bu biyoplastiklerin üretiminde önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır (Muthusamy & Pramasivam, 2019).

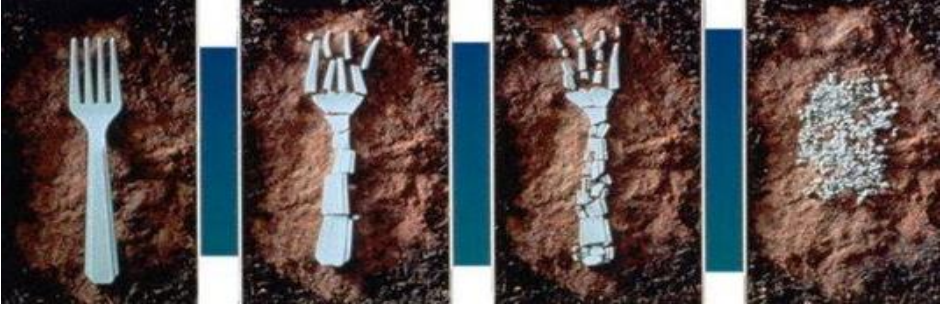
Deniz yosunları, algler ailesine ait sucul bitkilerdir ve denizlerde yaygın olarak bulunmaktadır. Çeşitli türleri olan deniz yosunları, ekolojik sistemde önemli roller üstlenmektedir. Deniz yosunları, oksijen üretimi, karbon emilimi ve deniz ekosistemlerine destek sağlama gibi faydalı özelliklere sahiptir. Bu bitkiler, aynı zamanda hızlı büyüyen, yenilenebilir kaynaklar olup, çevre dostu biyoplastik üretiminde tercih edilen bir hammadde kaynağıdır. Yosunlar, çevreye zarar vermeden biyobozunur materyallerin üretimini sağlayacak potansiyeli taşımaktadır (Lomartire vd., 2022). Oksijen kaynağı deniz yosunu görüntüsü Şekil 2’de yer almaktadır (<https://www.dunya.com/surdurulebilir-dunya/denizdeki-yosun-karadaki-mahsulun-verimini-artirabilir-haberi-719826>)



**Şekil 2:** Oksijen kaynağı deniz yosunu görüntüsü

(<https://www.dunya.com/surdurulebilir-dunya/denizdeki-yosun-karadaki-mahsulun-verimini-artirabilir-haberi-719826>)

Deniz yosunlarından elde edilen biyoplastikler, doğada hızla parçalanarak plastik atıkların oluşturduğu kalıcı çevresel zararı ortadan kaldırılabilecektir. Bu biyoplastiklerin üretimi, karbon salınımı açısından düşük bir etkiye sahip olup, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda çevreye katkı sağlamaktadır. Ayrıca, deniz yosunları, besin zincirine zarar vermeden doğada bozulabilen, biyolojik olarak ayrışabilen bir yapı sunmaktadır (Freile-Pelegrín & Madera-Santana, 2017). Biyobozunur malzeme dönüşümü adımları Şekil 3’de bulunmaktadır (<https://blog.3dortgen.com/etiket/karbon-notr/?print=print-search>).



**Şekil 3:** Biyobozunur malzeme dönüşümü adımları  
(<https://blog.3dortgen.com/etiket/karbon-notr/?print=print-search>)

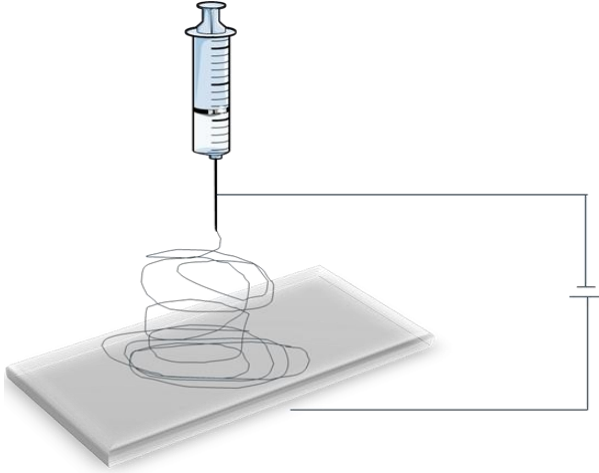
Biyobozunur ambalajların üretimi için çeşitli yenilikçi teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden biri, çift vidalı ekstrüder ile yapılan kompaunding işlemidir. Çift vidalı ekstrüder, farklı malzemelerin homojen bir şekilde karıştırılmasını sağlayarak, biyoplastik üretimi için gerekli olan hammadde bileşenlerinin ideal özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Bu işlem, deniz yosunu ve polilaktik asit (PLA) karışımlarının eşit şekilde dağıtılmasını ve istenilen fiziksel özelliklere sahip biyoplastiklerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Negrete-Bolagay & Guerrero, 2024). Çift vidalı ekstrüder görüntüsü Şekil 4’de yer almaktadır (<https://limaextrusion.com/tr/projects/granul-ekstruzyon-paralel-cift-vidali-ekstruder/>).



**Şekil 4:** Çift vidalı ekstrüder görüntüsü  
(<https://limaextrusion.com/tr/projects/granul-ekstruzyon-paralel-cift-vidali-ekstruder/>)

Biyobozunur ambalaj üretim gerçekleştirildiği bir diğer teknik nanoteknolojik elektroçirime (electrospinning) yöntemidir. Bu yöntemle, biyoplastik karışımları

ince nanofiberler halinde üretilir ve bu malzemeler, ambalaj üretiminde kullanılabilir hale gelmektedir. Nanoteknolojik elektroğirme, son derece ince ve dayanıklı malzemelerin üretimi için ideal bir yöntemdir. Ayrıca, bu malzemelerin mikroorganizmalarla daha hızlı ayrışması sağlanarak biyobozunur özellikleri güçlendirilmiş olmaktadır (Luo vd., 2012). Nanoteknolojik elektroğirme sistem görüntüsü Şekil 5’de gösterilmektedir (<https://www.centexbel.be/nl/pilootplatformen/elektrospinning>).



**Şekil 5:** Nanoteknolojik elektroğirme sistem görüntüsü  
(<https://www.centexbel.be/nl/pilootplatformen/elektrospinning>)

Deniz yosunu ve PLA karışımından biyobozunur ambalajların eldesine dünyada giderek artan bir ilgi yer almaktadır. Elde edilen biyoplastikler, doğada hızla bozularak mikroplastik kirliliğini azaltacak ve çevre dostu bir alternatif sunacaktır. Bu materyallerin en önemli avantajı, bakteriler aracılığıyla biyolojik olarak parçalanabilmesi ve 2-4 ay gibi kısa bir sürede doğada kaybolabilmesidir. Böylece, plastiklerin doğada uzun yıllar kalma ve ekosistemlere zarar verme süresi önemli ölçüde kısalmış olacaktır. Özellikle gıda ambalajı gibi sektörlerde, biyoplastiklerin kullanımı mikroplastiklerin deniz ekosistemlerine ve insan sağlığına zararını engellemeye yardımcı olacaktır. Biyobozunur materyallerin, mikroplastiklerin çevreye yayılmasını engelleyerek, deniz canlılarının sağlığını koruyacak ve plastik atıkların doğaya verdiği zararı ortadan kaldıracaktır (Kumar vd., 2021).

Biyoplastiklerin üretimi, çevresel faydalarının yanı sıra ekonomik olarak da önemli fırsatlar sunmaktadır. Birçok ülke biyoplastik ihtiyacını büyük ölçüde ithalat yoluyla karşılamaktadır. Ancak deniz yosunu ve PLA gibi biyobozunur materyallerin yerli üretimi, dışa bağımlılığı azaltabilir ve ekonomik büyümeye

katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca, biyoplastiklerin üretimi, yeni iş alanları yaratacak ve yerli üretim sektörünün gelişmesine olanak tanıyacaktır. Biyoplastik pazarının büyümesi, sürdürülebilirlik, geri dönüşüm ve çevre dostu üretim süreçlerine olan talebin artmasıyla daha da hızlanmaktadır. 2020 yılı itibarıyla biyoplastik üretim kapasitesi 2,11 milyon ton iken, 2025 yılı itibarıyla bu kapasitenin 2,87 milyon tona çıkması beklenmektedir. Deniz yosunu ve PLA karışımından üretilen biyoplastikler, çevresel ve ekonomik açıdan büyük avantajlar sunmaktadır. Bu biyoplastikler, mikroplastik kirliliğini azaltarak, karbon ayak izini düşürerek ve biyoplastik pazarını büyütürken çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır (El Semary vd., 2022).

Bu çalışma, çevre dostu ve biyobozunur ambalaj malzemelerinin geliştirilmesi için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Plastik kirliliği ve mikroplastiklerin çevreye olan zararları göz önüne alındığında, bu proje biyoplastik üretiminde deniz yosunu ve polilaktik asit (PLA) gibi sürdürülebilir kaynakların kullanılmasını hedeflemektedir. Deniz yosunları, biyoplastiklerin üretiminde kullanılan yenilenebilir ve hızlı büyüyen bir kaynak olup, doğada biyolojik olarak parçalanabilen özelliklere sahip olmaktadır. Bu özellik, geleneksel plastiklerin aksine, çevreye kalıcı zarar bırakmayan, doğada hızla bozunabilen materyallerin elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

## **2. MATERYAL VE METOD**

### **2.1. Materyal**

Çalışmamızda deniz yosunları İstanbul ili Şile plajından toplanmıştır. 15 kDA GPC Jel Geçirgenlik Kromatografisi değerine sahip polilaktik asit (PLA) biyoplastığı Ataman Kimya (Türkiye) firmasından ve polimeri çözmek için aseton ve dimetilformamid (DMF) çözücüsü üniversitemizden temin edilmiştir.

### **2.2. Deniz Yosunu-Nişasta Karışım Malzemesi ve Erime Akış İndeks Ölçümü**

Deniz yosunu ve nişasta karışımına sahip parçacıkların akışkanlık durumunu belirlemek amacıyla erime akış cihazında (Melt Flow Indeks) (MFI)10 dakikada ki akış durumu incelenmiştir. İstenen akış durumu burada da gözlemlenememiştir. Ekstruder ve/veya enjeksiyon makinelerinde polimer ve polimer tabanlı kompozitlerin kullanıma uygun olduğu MFI test sonucuna göre belirlenmektedir. Ancak %30 ve %50 deniz yosunu içeren nişasta karışımı numunelerimiz MFI testini geçememiştir. Bu sebeple deniz yosunu katkılı PLA granül ve filament sistemine karar verilmiştir (Arrieta vd., 2018). Deniz yosunu ve nişasta karışımına sahip malzemenin MFI testini geçememe görüntüsü Şekil 6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6:** Deniz yosunu ve nişasta karışımına sahip malzemenin MFI testini geçememe görüntüsü

### 2.3. Deniz Yosunu Toplanması ve Toz Haline Getirilmesi

İstanbul İli Anadolu Yakası Şile ilçesine bağlı Şile plajından 1 kg deniz yosunu toplanmıştır. Toplanan deniz yosunları ultrasonik banyoda safsu ile muamele edilmiş ve bu işlem sonrasında safsu ile yıkanmıştır. Yıkama sonrası deniz yosunları beherlere alınarak üstleri alüminyum folyo ile kaplanmış ve iğne ile üstleri delinmiştir. 1 gece buzdolabında  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de dondurulduktan sonra örnekler liyofilizatör (dondurarak kurutma) sisteminde 7 gün süresince bekletilerek kurutulması gerçekleştirilmiştir. Kurutulan deniz yosunları bilyalı öğütücü haznelere yerleştirilmiş ve 600 rpm hızda 20 dakika öğütülmüştür. Elde edilen tozlar 100 mikrometrelik elekten elenmiş ve elekten geçen tozlar bir kaba alınmıştır (Krishnan vd., 2024). Şekil 7’de deniz yosununun toz haline getirilmesi aşamaları gösterilmektedir.



**Şekil 7:** Deniz yosununun toz haline getirilmesi aşamaları

## 2.4. Çift Vidalı Ekstruderde Kompaunding Granül Eldesi

PLA filament öncelikle granülatörde granül haline getirilmiştir. Hopper dan PLA granülleri beslenmiştir. Yan dozajlamadan ise deniz yosunu eriyik PLA içersine homojen dağıtılmıştır. 40/L vida uzunluğuna sahip çift vidalı ekstruder deniz yosunu %30 ve %50 oranında PLA polimerine yüklenmiştir. Çift vidalı sistemde homojen karışım sağlanarak granül eldesi gerçekleştirilmiştir. 180 °C sıcaklıkta işlenme gerçekleştirilmiştir (Perera vd., 2021). Şekil 8’de çift vidalı ekstruder de kompozit granül elde edilme aşamaları yer almaktadır.



Şekil 8: Çift vidalı ekstruder de kompozit granül elde edilme aşamaları

## 2.5. Tek Vidalı Ekstruderde 3 Boyutlu Yazıcı Filament Eldesi

%30 ve %50 deniz yosunu yüklü PLA granül karışımları 195 °C sıcaklıkta tek vidalı ekstruderde 1.75 mm çapında 3 boyutlu yazıcı filament şeklinde üretilmiştir. Elde edilen filament sarılmıştır. Şekil 9’da tek vidalı ekstruder kullanımı ile 3 boyutlu yazıcılar da kullanılmaya uygun filament üretim aşamaları gösterilmektedir (Chong vd., 2019).

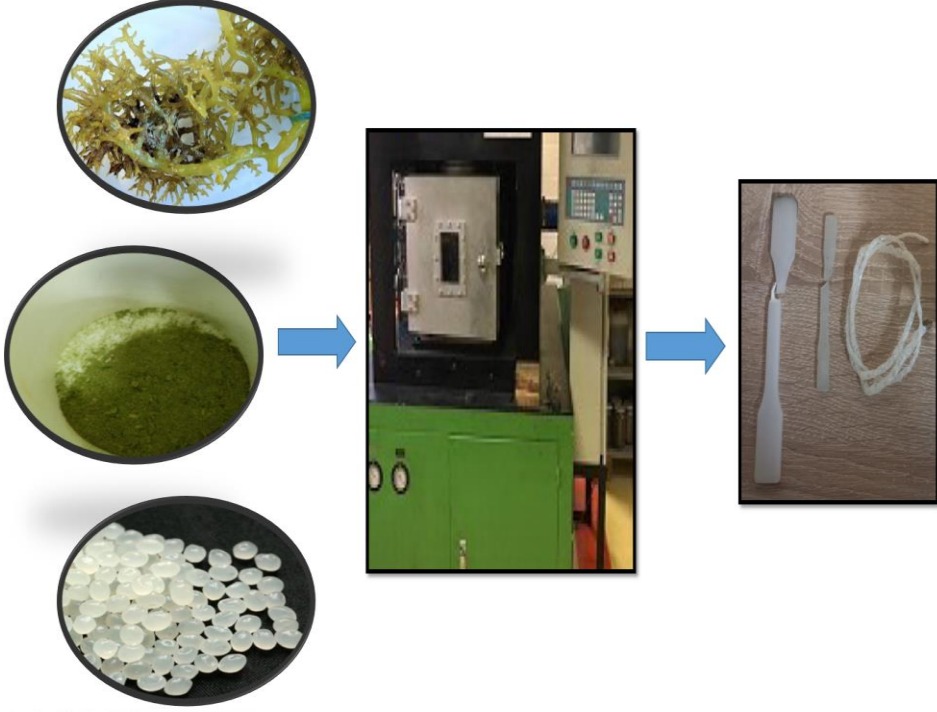


Şekil 9: Tek vidalı ekstruder kullanımı ile 3 boyutlu yazıcılar da kullanılmaya uygun filament üretim aşamaları



## 2.6. Sıcak Presleme İle Dogbone (Köpek Kemığı) Eldesi

%30 ve %50 deniz yosunu içeren PLA granülleri sıcak presleme sonucunda dogbone şeklinde üretilmiştir (Othman vd., 2024). Şekil 10'da sıcak presleme sonrası elde edilen dogbone çekme çubuğu bulunmaktadır.



Şekil 10: Sıcak presleme sonrası elde edilen dogbone çekme çubuğu

## 2.7. Nanoteknolojik Elektroğirme Tekniğiyle Nanofiber Membran Ambalaj Ürünü Eldesi

Elektroğirme sisteminde %30 ve %50 deniz yosunu içeren PLA granülleri ayrı ayrı 10 gram tartılmıştır. 50 ml aseton-50 ml dimetilformamid karışım solvent sistemine 10 gram granüller ayrı ayrı beherlerde eklenmiştir. Isıtıcı manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen dağılımlı elektroğirme çözeltileri sırasıyla elde edilmiştir. Vakum etüvünde 1 saat dinlenmeye alınmış ve hava kabarcıkları giderilmiştir. Üretim işlemi, altlık malzeme olarak yağlı kağıt kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektroğirme işleminde, akış hızı 1 ml/saat, voltaj değeri 15-30 kV arasında olacak ve iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe 15-20 cm arasında ayarlanmıştır. Bu çalışma parametreleri altında optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Doh vd., 2020). Şekil 11'de nanofiber membranların elektroğirme tekniğiyle elde edilme aşamaları gösterilmektedir.



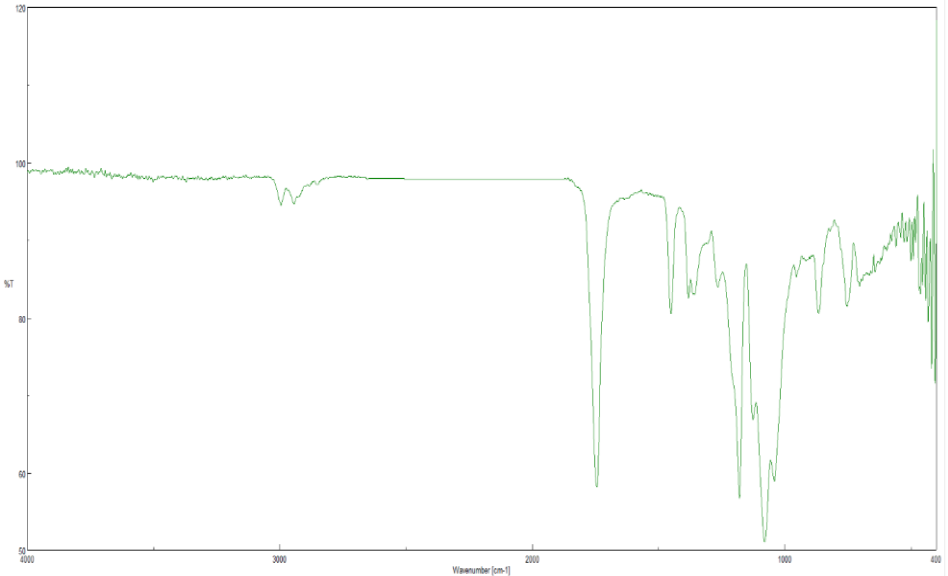
**Şekil 11:** Nanofiber membranların elektroçğirme tekniğıyle elde edilme aşamaları

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

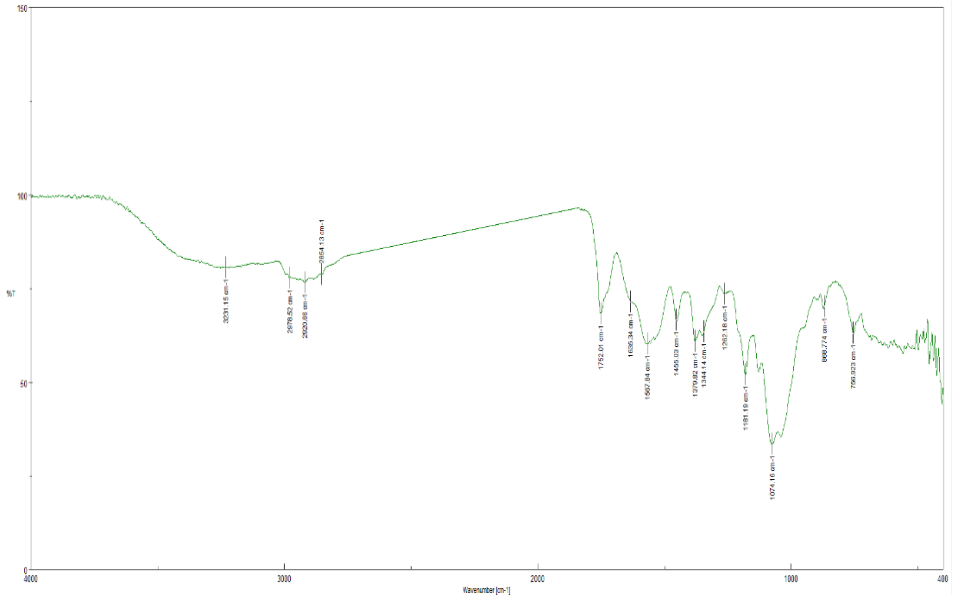
#### 3.1. Yapısal karakterizasyon

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) spektrumu, bir malzemenin kimyasal yapısını analiz etmek için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu yöntem, bir maddeye uygulanan infrared ışığın, bileşenin fonksiyonel grupları tarafından emilmesini temel alır ve her fonksiyonel grup için özgün bir pik gösterir. Polilaktik asit (PLA) ve deniz yosunu karışımının FTIR spektrumu, her iki bileşenin karakteristik işaretlerini ve potansiyel etkileşimlerini ortaya koymak için kullanılabilir. Bu analizin amacı, PLA ve deniz yosunu karışımının kimyasal yapısını ve malzeme özelliklerini anlamaktır. PLA'nın FTIR spektrumunda,  $1375\text{ cm}^{-1}$  civarındaki bir pik,  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  gruplarının bükülme titreşimlerine karşılık gelir. Bu, PLA'nın alifatik yapısını gösterir. PLA'nın en belirgin özelliklerinden biri olan ester bağlarının ( $\text{C}=\text{O}$ ) titreşimi,  $1740\text{ cm}^{-1}$  civarında görülür. Bu pik, PLA'nın ester grubu içeren kimyasal yapısını işaret eder. Aynı zamanda, C-O bağının titreşimleri de  $1200\text{ cm}^{-1}$  civarında belirgindir.  $2950\text{ cm}^{-1}$ 'deki  $\text{CH}_3$  grubunun simetrik ve asimetrik uzama titreşimleri, PLA'nın metilen ve metil gruplarını temsil eder. Deniz yosununun spektrumunda,  $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$  arasında geniş bir O-H uzama (hidrojen bağları) piki gözlemlenir. Bu pik, deniz yosununun içinde yer alan fenolik ve alkol gruplarının titreşimlerini yansıtır.  $1150\text{ cm}^{-1}$  civarında, karbonhidratların C-O bağlarına karşılık gelen bir pik bulunur.

Bu, deniz yosununun şeker bileşenlerinin varlığını gösterir. Ayrıca,  $2950\text{ cm}^{-1}$  civarında da karbonhidratların C-H uzama titreşimlerine işaret eden bir pik bulunabilir. Deniz yosununun asidik bileşenlerinden (örneğin alginik asit) gelen C=O ve C-O bağlarının titreşimleri sırasıyla  $1700\text{ cm}^{-1}$  ve  $1300\text{ cm}^{-1}$  civarında görülür. Bu pikler, deniz yosununun asidik özelliklerini yansıtır. PLA'nın ester grubu ( $1740\text{ cm}^{-1}$ ) ile deniz yosununun karbonhidrat bileşenleri ( $1150\text{ cm}^{-1}$  civarındaki C-O ve  $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$  civarındaki O-H uzama pikleri) arasında bir etkileşim olabilir. Bu etkileşim, biyokompozitin yapısal bütünlüğünü ve biyobozunur özelliklerini etkileyebilir. Deniz yosununun O-H gruplarının titreşim pikleri ( $3200\text{-}3400\text{ cm}^{-1}$ ) PLA ile karıştığında, bu geniş pik, karışımdaki su içeriği veya hidrojen bağlarının kuvvetlendiğini gösterebilir. PLA ve deniz yosununun karışımında, her iki bileşenin fonksiyonel gruplarının etkileşimiyle yeni titreşim piki oluşturulabilir. Örneğin, ester grubu ile fenolik ya da alkol grupları arasında potansiyel etkileşimler, yeni bir pikle kendini gösterebilir. Bu durum, karışımdaki bileşenlerin birbirleriyle etkileşimde bulunduğunu ve malzemenin özelliklerinin değiştiğini gösterir. PLA'nın FTIR spektrumunda,  $1375\text{ cm}^{-1}$  civarındaki bir pik,  $\text{CH}_3$  ve  $\text{CH}_2$  gruplarının bükülme titreşimlerine karşılık gelir. Bu, PLA'nın alifatik yapısını göstermektedir (Qiang vd., 2024). Şekil 12'de PLA ve Şekil 13'de PLA-Deniz Yosunu FTIR spektrumu yer almaktadır.



**Şekil 12: PLA FTIR spektrumu**

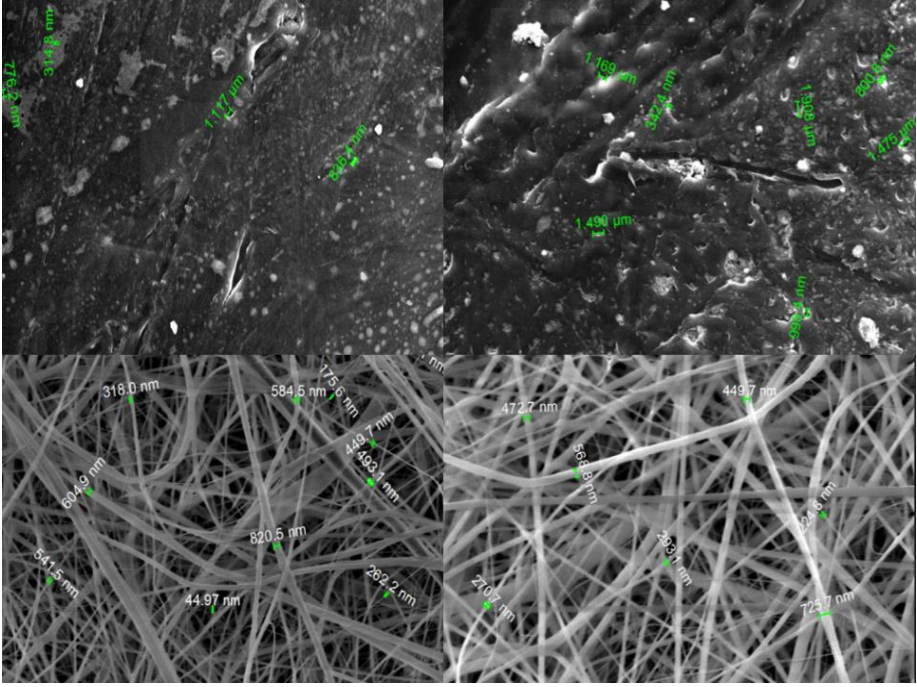


**Şekil 13: PLA-Deniz Yosunu FTIR spektrumu**

PLA ve deniz yosunu karışımının FTIR spektrumu, her iki bileşenin kimyasal yapılarını ve etkileşimlerini ortaya koyar. PLA'nın ester grupları, deniz yosununun karbonhidrat ve fenolik bileşenleriyle etkileşime girebilir, bu da biyoplastiklerin biyobozunur özelliklerini geliştirebilir. FTIR analizi, karışımın yapısal özelliklerini anlamak ve geliştirilmiş biyoplastiklerin çevresel sürdürülebilirliğini daha iyi değerlendirmek için çok önemli bir araçtır. Sonuç olarak, bu tür biyokompozit malzemeler, doğada çözünebilir ve çevre dostu alternatifler olarak plastik kirliliğini azaltmada önemli bir rol oynayabilir (Rodríguez-Núñez vd., 2017).

### 3.2. Morfolojik karakterizasyon

%30 ve %50 deniz yosunu yüklü PLA dogbone çekme çubuğu ve nanoteknolojik membranların FEGSEM görüntüleri incelenmiştir. PLA yapı içerisinde deniz yosunu tozlarının dağılımı gözlemlenmiştir. Sıcak presleme etkisi ile dağılım tüm yapıda olurken, nanoteknolojik elektroçizme tekniği sonucunda elde edilen membranlarda deniz yosunları fiber içerisine gömülmüştür (Perera vd., 2021). Dogbone ve nanofiber membran FEGSEM görüntüleri Şekil 14'de gösterilmektedir.

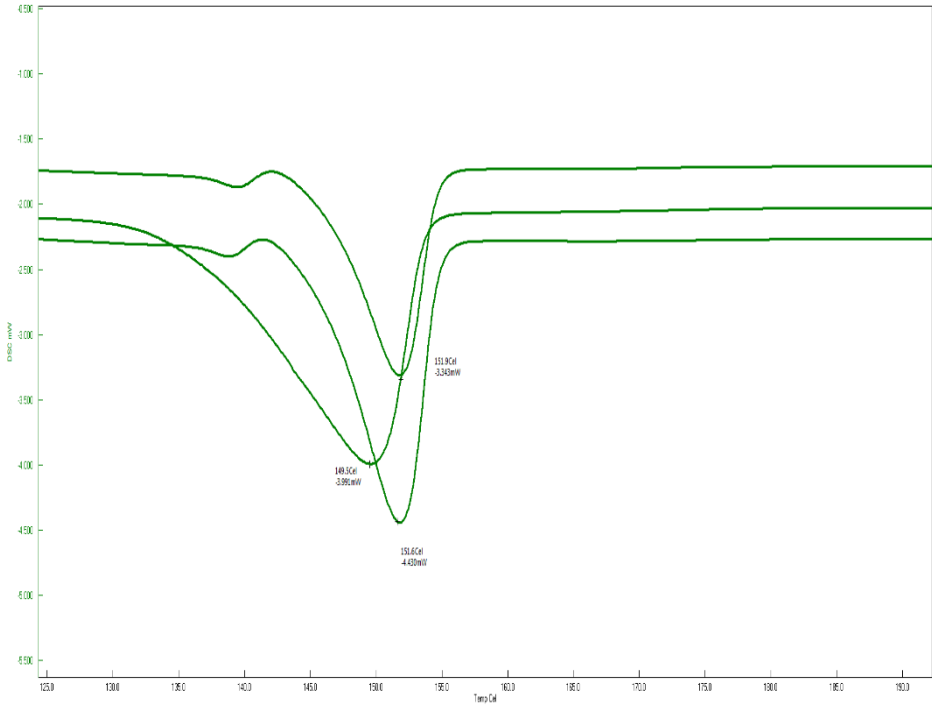


**Şekil 14:** Dogbone ve nanofiber membran FEGSEM görüntüleri

%30 deniz yosunu yüklü dogbone çekme çubuğu FEGSEM görüntüsü incelendiğinde 300-1.200 nanometre aralığında çap dağılımı olduğu, %50 deniz yosunu yüklü numunede ise 600-2.400 nanometre aralığında olduğu tespit edilmiştir. %30 deniz yosunu yüklü nanofiber membran FEGSEM görüntüsü incelendiğinde 40-700 nanometre çap aralığında olurken, %50 yüklü numunede 100-850 nanometre çap aralığı elde edilmiştir. Deniz yosunu toz içeriği arttıkça PLA yapısında çaplarda artış meydana gelmektedir (Chong vd., 2019).

### 3.3. Termal Karakterizasyon

PLA ile yapılan çalışmalarda, camsı geçiş noktası genel olarak 60°C dolaylarında görülmektedir. Yaptığımız çalışmada saf PLA 61.4°C 'de camsı geçiş sıcaklığı, 149.5°C'de ise erime sıcaklığı değeri göstermiştir. İlk olarak PLA'ya eklenen %30 Deniz Yosunu ile birlikte hem camsı geçiş hem de erime sıcaklığında belirgin bir düşüş olarak sırasıyla 61°C ve 151.6°C değerini almıştır. Daha sonra PLA'ya eklenen %50 Deniz Yosunu camsı geçiş sıcaklığı artış göstererek 62.2°C'ye, erime sıcaklığı da 151.9°C'ye yükselmiştir (Numunelerin DSC termogramları Şekil 15'de yer almaktadır (Anuar vd., 2017). Numunelerin DSC termal analiz sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir.



**Şekil 15:** Numunelerin DSC termogramları

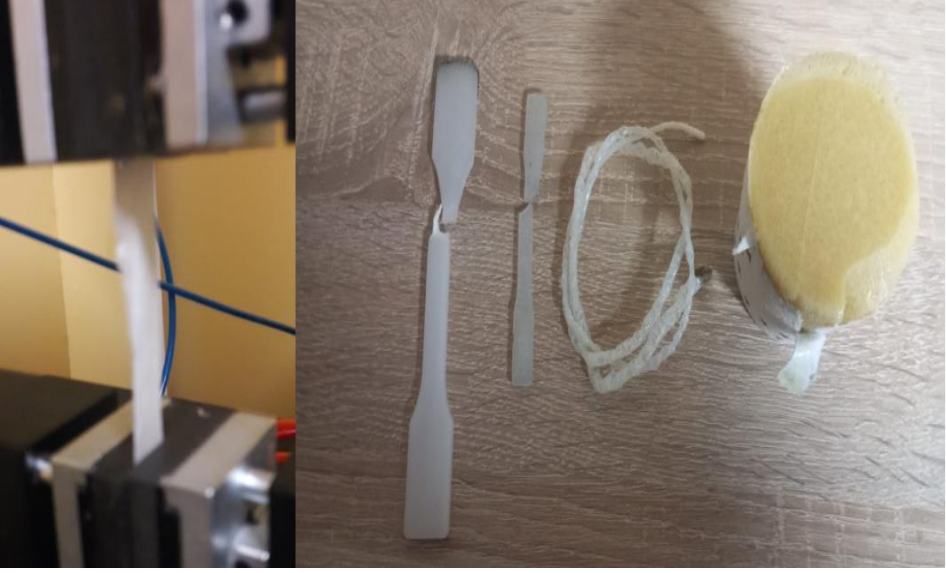
**Tablo 1.** Numunelerin DSC termal analiz sonuçları

Numune	Camsı Geçiş Sıcaklığı( $T_g$ ) °C	Erime Sıcaklığı( $T_m$ ) °C	Soğuk Kristallenme Sıcaklığı ( $T_{cc}$ ) °C
PLA	61.4	149.5	111.1
PLA-%30 Yosunu	61	151.6	113.2
PLA-%50 Yosunu	62.2	151.9	113.2

### 3.4.Mekanik Karakterizasyon

Dogbone ve nanofiber membranlara 50 mm ve 5 mm olmak üzere iki farklı ASTM standartlarına göre işlem uygulanmış ve mekanik çekme test sonuçları elde edilmiştir. %30 deniz yosunu içeren malzeme mukavemet özellikleri PLA yapısını iyileştirirken, %50 deniz yosunu içeren PLA saf PLA ya göre yüksek ancak %30 deniz yosunu içeren numunelere göre daha düşük olmuştur. Diğer testler de de %30 deniz yosunu içeren numune ideal özellikleri sağlamıştır (Kia

vd., 2024). Numunelerin mekanik çekme analiz sonuçları Tablo 2’de ve mekanik çekme test işlemleri Şekil 16’da gösterilmektedir.



**Şekil 16:** Numunelerin mekanik çekme test işlemleri

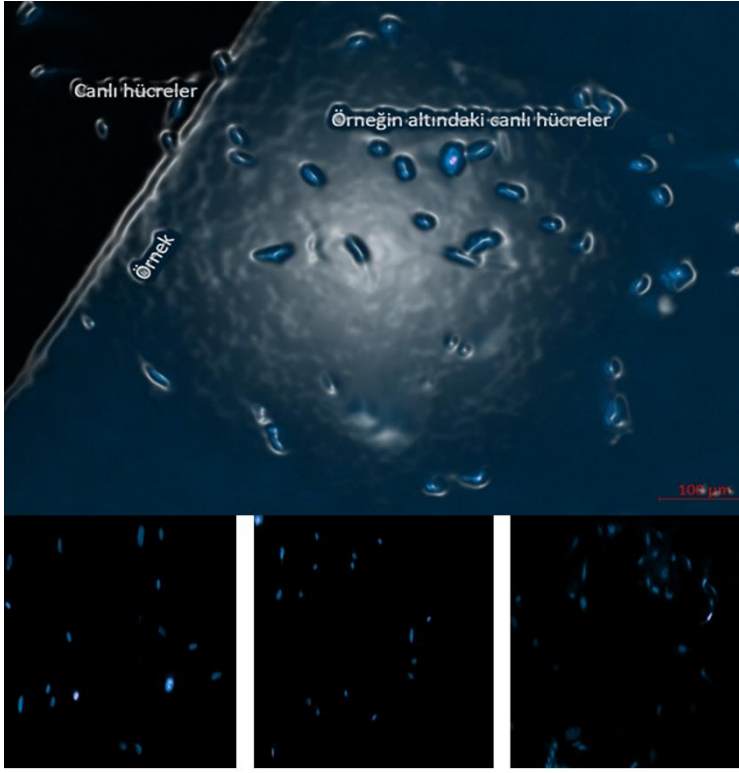
**Tablo 2.** Numunelerin mekanik çekme analiz sonuçları

Numune	Dakika da 50 mm çekme hızı uygulanmış dogbone	Dakika da 5 mm çekme hızı uygulanmış nanofiber membran
PLA	65.892	0.783 MPa
PLA-%30 Deniz Yosunu dogbone	72.453	-
PLA-%50 Deniz Yosunu dogbone	68.249	-
PLA-%30 Deniz Yosunu nanofiber membran	-	1.621 MPa
PLA-%50 Deniz Yosunu nanofiber membran	-	0.971 MPa

### 3.5. Biyolojik Karakterizasyon

PLA, %30 ve %50 deniz yosunu içeren PLA numunelerine hücre canlılığı testi gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerine sırasıyla Mezankimal kök hücreler ekilmiş ve 24, 48, 72 saat bekletilmiş ve gün gün hücre sayımı gerçekleştirilmiştir. %30 deniz yosunu içeren PLA numunesi 72 saat süre sonunda ölçüme göre %96 canlılık %4 ölü hücre sonucu elde edilmiştir (Ilhan

vd., 2021). Numunelerin hücre canlılık görüntüleri Şekil 17’de ve hücre canlılık değerleri Tablo 3’de yer almaktadır.



PLA PLA-%30 Deniz Yosunu PLA-%50 Deniz Yosunu

Şekil 17: Numunelerin hücre tutunma görüntüleri

Tablo 3. Numunelerin hücre canlılık değerleri

Numune	24 saat canlı hücre	24 saat ölü hücre	48 saat canlı hücre	48 saat ölü hücre	72 saat canlı hücre	72 saat ölü hücre
PLA	95	5	94	6	89	11
PLA-%30 Deniz Yosunu	98	2	97	3	96	4
PLA-%50 Deniz Yosunu	95	5	94	6	92	8



#### 4. SONUÇLAR

Çalışmamız kapsamında PLA ve deniz yosunu karışımının biyoplastik özellikleri incelenmiştir. FTIR analizi, PLA ve deniz yosunu arasında etkileşimler olduğunu ve karışımın biyobozunur özelliklerini geliştirebileceğini göstermektedir. Özellikle PLA'nın ester gruplarının, deniz yosununun karbonhidrat ve fenolik bileşenleriyle etkileşime girdiği gözlemlenmiştir. FEGSEM görüntüleri, %30 ve %50 deniz yosunu yüküyle PLA yapısındaki çap dağılımını incelemiş ve deniz yosunu içeriği arttıkça çapların büyüdüğünü ortaya koymuştur. %30 deniz yosunu içeren dogbone çekme çubuğu, 300-1200 nm çap aralığındayken, %50 yükü 600-2400 nm aralığına çıkmıştır. Nanofiber membranlarda ise %30 deniz yosunu içeren örneklerde çaplar 40-700 nm arasında değişirken, %50 yükü 100-850 nm olmuştur. Termal analizler, PLA ve deniz yosunu karışımının camsı geçiş ve erime sıcaklıklarında farklı değişimlere yol açtığını göstermektedir. %30 deniz yosunu içeren PLA, camsı geçiş ve erime sıcaklıklarında sırasıyla 61°C ve 149.5°C değerlerini gösterirken, %50 deniz yosunu içeren PLA'da bu değerler 62.2°C ve 151.9°C'ye yükselmiştir. Mekanik testler, %30 deniz yosunu içeren PLA'nın daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Dogbone çekme testlerinde, %30 deniz yosunu içeren numune 72.453 MPa mukavemete sahipken, %50 deniz yosunu içeren örneğin mukavemeti 68.249 MPa olmuştur. Nanofiber membranlarda ise %30 deniz yosunu içeren örnek 1.621 MPa, %50 yüklü numune ise 0.971 MPa mukavemet göstermiştir. Biyolojik testlerde, %30 deniz yosunu içeren PLA'nın hücre canlılık oranı %96 iken, %50 deniz yosunu içeren PLA'nın canlılık oranı %92'ye düşmüştür. Bu bulgular, PLA ve deniz yosunu karışımının biyobozunur özelliklerini artırabileceğini ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyebileceğini ortaya koymaktadır. PLA ve deniz yosunu biyokompozitleri, biyoplastiklerin çevreye duyarlı alternatifler olarak kullanımını teşvik etmekte ve endüstriyel uygulamalarda potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Bu biyoplastikler, mikroplastik kirliliğini engelleyerek, çevresel sürdürülebilirliği artırmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Anuar, H., Nur Fatin Izzati, A. B., Sharifah Nurul Inani, S. M., Siti Nur E'zzati, M. A., Siti Munirah Salimah, A. B., Ali, F. B., & Manshor, M. R. (2017). Impregnation of cinnamon essential oil into plasticised polylactic acid biocomposite film for active food packaging. *Journal of Packaging Technology and Research*, 1, 149-156.
- Arrieta, M. P., de Dicastillo, C. L., Garrido, L., Roa, K., & Galotto, M. J. (2018). Electrospun PVA fibers loaded with antioxidant fillers extracted from *Durvillaea antarctica* algae and their effect on plasticized PLA bionanocomposites. *European Polymer Journal*, 103, 145-157.
- Bayak, C. (2022). *ÇEvre ve Sürdürülebilirlik Bağlamında Prix Pictet Fotoğraf ödülleri* (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey)).
- Chong, E. W. N., Jafarzadeh, S., Paridah, M. T., Gopakumar, D. A., Tajarudin, H. A., Thomas, S., & Abdul Khalil, H. P. S. (2019). Enhancement in the physico-mechanical functions of seaweed biopolymer film via embedding fillers for plasticulture application—a comparison with conventional biodegradable mulch film. *Polymers*, 11(2), 210.
- Doh, H., Dunno, K. D., & Whiteside, W. S. (2020). Preparation of novel seaweed nanocomposite film from brown seaweeds *Laminaria japonica* and *Sargassum natans*. *Food hydrocolloids*, 105, 105744.
- El Semary, N., Alsu hail, M., Al Amer, K., & AlNaim, A. (2022). Applications of algae for environmental sustainability: Novel bioplastic formulation method from marine green alga. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1047284.
- Freile-Peegrín, Y., & Madera-Santana, T. J. (2017). Biodegradable polymer blends and composites from seaweeds. *Handbook of Composites from Renewable Materials*, 1(8), 419-438.
- Ilhan, E., Ulag, S., Sahin, A., Yilmaz, B. K., Ekren, N., Kilic, O., ... & Gunduz, O. (2021). Fabrication of tissue-engineered tympanic membrane patches using 3D-Printing technology. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 114, 104219.
- Kia, M. V., Ehsani, M., Hosseini, S. E., & Asadi, G. H. (2024). Fabrication and characterization of transparent nanocomposite films based on poly (lactic acid)/polyethylene glycol reinforced with nano glass flake. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127473.
- Krishnan, L., Ravi, N., Mondal, A. K., Aktar, F., Kumar, M., Ralph, P. J., & Kuzhiumparambil, U. (2024). Seaweed-based polysaccharides-Review of extraction, characterization, and bioplastic application. *Green Chemistry*.
- Kumar, R., Verma, A., Shome, A., Sinha, R., Sinha, S., Jha, P. K., ... & Vara Prasad, P. V. (2021). Impacts of plastic pollution on ecosystem services,

- sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. *Sustainability*, 13(17), 9963.
- Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. (2022). An overview of the alternative use of seaweeds to produce safe and sustainable bio-packaging. *Applied Sciences*, 12(6), 3123.
- Luo, C. J., Stoyanov, S. D., Stride, E., Pelan, E., & Edirisinghe, M. (2012). Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence. *Chemical Society Reviews*, 41(13), 4708-4735.
- Muthusamy, M. S., & Pramasivam, S. (2019). Bioplastics—an eco-friendly alternative to petrochemical plastics. *Current world environment*, 14(1), 49.
- Negrete-Bolagay, D., & Guerrero, V. H. (2024). Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics: Perspectives from Formulation, Processing, and Performance. *Polymers*, 16(18), 2561.
- Othman, N. A., Kamarol Zani, N. A. A., Ramli, N. A., Mohd Azman, N. A., Adam, F., Abu Bakar, N. F., & Rehan, M. (2024). A Mechanistic Study of the Synthesis of Sustainable Carrageenan-Polylactic Acid Biocomposite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-15.
- Perera, K. Y., Sharma, S., Pradhan, D., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). Seaweed polysaccharide in food contact materials (active packaging, intelligent packaging, edible films, and coatings). *Foods*, 10(9), 2088.
- Rodríguez-Núñez, J. R., Domínguez-López, A., Domínguez-López, C., Quintana Owen, P., López-Cervantes, J., Sánchez-Machado, D. I., ... & Madera Santana, T. J. (2017). Evaluation of physicochemical and antifungal properties of polylactic acid–thermoplastic starch–chitosan biocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56(1), 44-54.
- Qiang, X., Song, Y., Niu, J., Gu, W., Wang, X., Wu, S., ... & Wang, G. (2024). Fabrication and characterizations of biodegradable films based on polysaccharide from *Pyropia yezoensis* waste with antioxidant and antibacterial activities. *Journal of Applied Phycology*, 1-14.
- URL1 <https://imgroupofresearchers.com/the-devastating-impact-of-micro-plastics-on-human-health-and-marine-life/>
- URL2: <https://www.dunya.com/surdurulebilir-dunya/denizdeki-yosun-karadaki-mahsulun-verimini-artirabilir-haberi-719826>
- URL 3: <https://blog.3dortgen.com/etiket/karbon-notr/?print=print-search>
- URL4: <https://limaextrusion.com/tr/projects/granul-ekstruzyon-paralel-cift-vidali-ekstruder/>
- UREL 5: <https://www.centexbel.be/nl/pilotplatformen/elektrospinning>



## 9. Bölüm

# YARA ÖRTÜCÜ UYGULAMALARA YÖNELİK BİTKİLERİN ÖNEMİ, BİTKİ ETKEN MADDE AYRIŞTIRMA, NANOTEKNOLOJİK ELEKTROEĞİRME VE GELECEK PERSPEKTİFİ

İdris KAYNAK<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Dr.Öğr.Üyesi; Uşak Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Ve Metal Teknolojileri Bölümü Kaynak Teknolojisi Programı. idris.kaynak@usak.edu.tr ORCID No: 0000-0002-8278-9230

## ÖZET

Yara iyileştirme süreci, biyolojik etkenlerin ve tedavi yöntemlerinin bir araya gelerek dokuların onarımını sağladığı karmaşık bir mekanizmadır. Bitkiler, bu süreçte içerdiği biyolojik olarak aktif bileşiklerle önemli bir rol oynar. Antioksidan, antibakteriyel ve anti-inflamatuar özellikler taşıyan bitki etken maddeleri, yara iyileşmesinde hızlandırıcı etki gösterir. Bu bileşiklerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bitkilerden doğru yöntemlerle ayrıştırılması gerekmektedir. Süperkritik ekstraksiyon gibi modern yöntemler, bitkisel etken maddelerin yüksek saflıkta ve verimlilikle elde edilmesini sağlar. Çevre dostu ve etkili bir alternatif sunan bu yöntem, ısıl hassas bileşenlerin korunmasına olanak tanır. Nanoteknoloji, özellikle elektroğirme tekniğiyle yara iyileştirme alanında önemli gelişmeler vaat etmektedir. Polimerik nanoliflerin kullanımı, etken maddelerin kontrollü salınımını sağlayarak iyileşme sürecini hızlandırır ve yara örtücülerin etkinliğini artırır. Elektroğirme parametreleri, polimerin türü ve çözünürlük özellikleri, nanoliflerin biyoyumluluğu ve etkinliği üzerinde doğrudan etki yapar. Gelecekte, nanoteknolojik uygulamalar ve sürdürülebilir ekstraksiyon yöntemleri birleşerek, daha verimli, çevre dostu ve hedeflenmiş tedavi sistemlerinin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu alandaki araştırmalar, yara iyileştirme tedavilerinde yeni dönüm noktaları yaratacak ve klinik uygulamalarda daha etkili çözümler sunacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Yara İyileşmesi, Bitkisel Etken Maddeler, Süperkritik Ekstraksiyon, Elektroğirme, Polimerik Nanolifler

## 1. GİRİŞ

Yaralar, cilt bütünlüğünün ve altındaki dokuların fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkilerle zarar görmesi sonucu oluşan tıbbi durumlardır. İyileşme süreçleri ve klinik yönetimleri, yaranın türüne ve şiddetine göre büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Yaralar genellikle akut, kronik, enfekte ve derin yaralar olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir yara türü, farklı biyolojik süreçler, tedavi yaklaşımları ve klinik zorluklar gerektirmektedir.

Akut yaralar, ani bir travma veya cerrahi işlem sonucu oluşan, genellikle kısa sürede iyileşme gösteren yaralardır. Kesikler, sıyrıklar, yanıklar veya cerrahi insizyonlar gibi durumlar bu kategoriye girmektedir. Akut yaralar, inflamasyon, proliferasyon ve yeniden modelleme gibi standart iyileşme evrelerini takip etmektedir. Uygun bir şekilde tedavi edildiğinde komplikasyon riski düşüktür ve çoğu durumda iz bırakmadan iyileşmektedir.

Kronik yaralar, uzun süre iyileşmeyen ve genellikle tekrarlayan bir yapıya sahip yaralardır. Bu yaralar, genellikle dolaşım bozuklukları, diyabet veya bağışıklık sistemi yetersizlikleri gibi altta yatan sağlık sorunlarından kaynaklanmaktadır. Diyabetik ayak ülserleri, bası yaraları (dekübitüs ülserleri) ve venöz bacak ülserleri en yaygın örneklerdir. Kronik yaralar genellikle iyileşme sürecinin inflamatuvar fazında takılı kalır ve bu da enfeksiyon, doku nekrozu ve diğer komplikasyonlara yol açabilmektedir.

Enfekte yaralar, bakteriyel, fungal veya viral mikroorganizmaların yaranın içine girerek enfeksiyon oluşturduğu durumlardır. Enfeksiyon, yaranın iyileşme sürecini geciktirir ve çevre dokulara veya tüm vücuda yayılma riski taşımaktadır. Kızarıklık, şişlik, ağrı, ısı artışı ve kötü kokulu drenaj gibi belirtiler enfekte yaraların ayırt edici özelliklerindedir. Uygun antibiyotik tedavisi, antiseptik uygulamalar ve yaranın düzenli temizlenmesi, enfekte yaraların tedavisinde kritik öneme sahip olmaktadır.

Derin yaralar, sadece cilt yüzeyini değil, altındaki kas, tendon, kemik ve diğer dokuları da etkileyen yaralardır. Bu tür yaralar genellikle şiddetli travma, cerrahi prosedürler veya ciddi enfeksiyonlar sonucunda oluşmaktadır. Derin yaralar, yüksek enfeksiyon riski taşır ve iyileşme süreçleri genellikle daha uzun ve karmaşıktır. Ciddi durumlarda doku kaybını önlemek ve iyileşme sürecini hızlandırmak için rejeneratif tedavi yöntemleri ve cerrahi müdahaleler gerekebilmektedir.

Yara tedavisi, insanlık tarihi kadar eski bir tıbbi uygulama olup, kültürler arası bilgi paylaşımı ve deneyimle şekillenmiştir. Geleneksel yara tedavileri, modern bilimin ve teknolojinin henüz gelişmediği dönemlerde, yaraların enfekte olmasını önlemek, iyileşme sürecini hızlandırmak ve hastanın genel sağlığını korumak amacıyla uygulanmıştır. Bu yöntemler, bitkisel özler, doğal malzemeler ve

manuel tekniklerin uyumlu bir şekilde bir araya getirildiği tedavi yaklaşımlarını içermektedir (Schneider vd., 2007). Yaralı bölge görüntüsü Şekil 1’de gösterilmektedir (<https://tektiklabilgielinde.saglik.gov.tr/yaralanmalarda-ilk-yardim/yara-nedir.html>).



Şekil 1: Yaralı bölge görüntüsü (<https://tektiklabilgielinde.saglik.gov.tr/yaralanmalarda-ilk-yardim/yara-nedir.html>).

Tarihi kayıtlar, dünyanın dört bir yanında farklı medeniyetlerin kendi çevresel kaynaklarını kullanarak yara tedavisi geliştirdiğini göstermektedir. Eski Mısır’da bal ve keten bezi yaraların örtülmesinde kullanılırken, Antik Çin’de bitkisel merhemler ve akupunktur gibi yöntemler benimsenmiştir. Anadolu’dan Hindistan’a, Afrika’dan Amerika yerlilerine kadar birçok topluluk, doğadan elde ettikleri bitki, yağ ve mineralleri tedavi süreçlerine entegre etmiştir (Oumeish, 1998).

Geleneksel yöntemlerin çoğu, modern tıbbın temellerini atmış, bazıları ise günümüzde bile popülerliğini koruyarak yara tedavisinde tamamlayıcı ve alternatif yaklaşımlar arasında yer almıştır. Bal, Aloe Vera, Çay Ağacı Yağı, Lavanta Yağı ve Propolis gibi doğal ürünler, sadece enfeksiyon önleyici özellikleriyle değil, aynı zamanda dokuları yenileme ve iyileşme sürecini hızlandırma potansiyelleriyle de dikkat çekmektedir.

Geleneksel yara tedavilerinde bitkisel ve doğal ürünler, biyolojik olarak aktif bileşenleri sayesinde yara iyileşmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu doğal ürünler, yalnızca enfeksiyonun önlenmesinde değil, aynı zamanda hücre yenilenmesini hızlandırma, inflamasyonu azaltma ve yara çevresindeki dokuları koruma gibi çeşitli faydalar sağlamaktadır. Bu bağlamda, Aloe Vera, Çay Ağacı Yağı, Lavanta Yağı, Manuka Balı, Propolis, Calendula Ekstresi ve Arnika Ekstresi, yara tedavisinde sıkça kullanılan etkili doğal bileşenlerdir.

Aloe vera, yara iyileştirme alanında yüzyıllardır kullanılan bir bitkidir. İçeriğinde bulunan polisakkaritler, glikoproteinler ve salisilik asit gibi biyoaktif



bileşenler sayesinde anti-inflamatuar, antimikrobiyal ve nemlendirici özelliklere sahip olmaktadır. Aloe Vera jeli, fibroblast proliferasyonunu artırarak kollajen üretimini teşvik eder ve bu da yara iyileşmesini hızlandırmaktadır. Ayrıca, yara çevresindeki hücrelerin oksijenlenmesini artırarak doku rejenerasyonunu desteklemektedir. Özellikle yanık tedavisinde, nemli bir ortam sağlayarak iyileşme sürecini kolaylaştırmaktadır.

Avustralya'ya özgü bir bitki olan Çay Ağacı'nın yağı, güçlü antimikrobiyal ve antifungal özellikleriyle bilinmektedir. Terpinen-4-ol ve  $\alpha$ -terpineol gibi aktif bileşenleri, bakteri ve mantar üremesini engelleyerek enfekte yaraların temizlenmesine yardımcı olmaktadır. Çay Ağacı Yağı, aynı zamanda anti-inflamatuar etkileriyle iltihaplanmayı azaltır ve yara çevresindeki ağrıyı hafifletmektedir. Yüzeysel kesikler, sıyrıklar ve küçük enfekte yaralar için oldukça etkilidir.

Lavanta yağı, yara iyileştirme sürecinde hem antimikrobiyal hem de sakinleştirici özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Linalool ve linalil asetat gibi bileşenler, bakteriyel enfeksiyonları önlerken, yara çevresindeki kan dolaşımını artırarak hücre yenilenmesini teşvik etmektedir. Lavanta yağı'nın ağrı kesici etkileri, özellikle yara çevresindeki rahatsızlığı azaltmada faydalıdır. Yanık yaralarında kullanıldığında, yaranın daha hızlı kapanmasını sağlar ve iz oluşumunu en aza indirmektedir.

Manuka balı, Yeni Zelanda'ya özgü Manuka ağacından elde edilir ve yara tedavisinde benzersiz antimikrobiyal özelliklere sahip olmaktadır. Metilglioksal (MGO) ve hidrojen peroksit içeriği, bakteriyel enfeksiyonları önler ve yara üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturarak nemli bir iyileşme ortamı sağlamaktadır. Manuka Balı, özellikle diyabetik ayak ülserleri ve kronik yaraların tedavisinde etkili olup, epitelizasyon sürecini hızlandırmaktadır. Aynı zamanda yara çevresindeki inflamasyonu azaltarak ağrıyı hafifletmektedir.

Propolis, arıların bitkilerden topladığı reçinemsi bir madde olup, doğal bir antibiyotik olarak tanınmaktadır. Flavonoidler, fenolik bileşikler ve terpenoidler gibi aktif maddeler içeren Propolis, güçlü antimikrobiyal ve antioksidan özelliklere sahip olmaktadır. Propolis, yara enfeksiyonlarını önlemenin yanı sıra fibroblast aktivitesini artırarak yara dokusunun yenilenmesini desteklemektedir. Özellikle açık yaralarda ve enfekte bölgelerde kullanılabilir.

Calendula (Aynısefa), yara iyileşmesinde anti-inflamatuar ve epitelizasyonu hızlandırıcı etkileriyle bilinmektedir. İçeriğinde bulunan flavonoidler, karotenoidler ve triterpenoidler, hücre yenilenmesini teşvik ederek yaranın daha hızlı kapanmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, doku nemini koruyarak kuruluşun neden olduğu komplikasyonları önlemektedir. Calendula ekstresi, sıyrıklar, yanıklar ve yüzeysel yaralarda etkili bir doğal çözümdür.

Arnika bitkisi, yara çevresindeki şişlik ve morlukların giderilmesinde geleneksel olarak kullanılmıştır. Seskiterpen laktonlar ve flavonoidler içeren Arnika ekstresi, inflamasyonu azaltır ve kan dolaşımını artırarak doku yenilenmesine katkı sağlamaktadır. Yaralanma sonrası hematomların hızlı çözülmesine yardımcı olur ve yara çevresindeki ağrıyı hafifletmektedir. Arnika ekstresi, genellikle küçük travmatik yaralar ve yumuşak doku hasarlarında kullanılmaktadır.

Aloe vera, çay ağacı yağı, lavanta yağı, manuka balı, propolis, calendula ekstresi ve arnika ekstresi gibi doğal ürünler, yara tedavisinde hem geleneksel hem de modern uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu ürünler, antimikrobiyal, anti-inflamatuar, nemlendirici ve doku yenileyici özellikleri sayesinde, farklı yara tiplerinde hızlı ve etkili iyileşme sağlamaktadır. Doğal kaynakların bu eşsiz faydaları, yara bakımında bütünsel bir yaklaşım sunarak hem hastaların iyileşme sürecini kolaylaştırır hem de komplikasyonları önlemeye yardımcı olmaktadır (Jacobsen, 2016; Schulman & Dean, 2006; Shah & Mudassar, 2019).

Bitkilerden etken madde elde etme işlemi, birçok farklı yöntemi içermektedir. Bu yöntemlerin seçimi, kullanılan bitkisel materyalin türüne, elde edilmek istenen bileşiğin özelliklerine ve ekstraksiyonun hedeflenen verimliliğine bağlıdır. Başlıca etken madde ayırıştırma yöntemleri şunlardır:

Geleneksel bir yöntem olan sıcak su ekstraksiyonunda, bitki materyali kaynar suyla işlenerek, içeriğindeki etken maddeler çözücü yardımıyla çözündürülür. Bu yöntem, özellikle suya çözünebilir bileşiklerin ekstraksiyonunda etkilidir ancak bazı ısıl olarak hassas bileşiklerin bozulma riski taşımaktadır.

Bu yöntem, sıcak suya göre daha düşük sıcaklıklarda, genellikle oda sıcaklığında uygulanan bir ekstraksiyon türüdür. Su, bitkilerden aktif bileşenlerin çözücüsü olarak kullanılmaktadır. Bitkilerin suyla olan etkileşimi sayesinde bazı doğal bileşikler çıkarılabilir, ancak bu yöntem genellikle daha az verimlidir.

Alkol, bitkilerden aktif bileşiklerin ekstrakte edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir çözücüdür. Alkol, özellikle alkaloid, flavonoid ve diğer fenolik bileşenlerin çözücüsü olarak etkilidir. Etil alkol genellikle en yaygın kullanılan çözücüdür çünkü toksik olmayan ve genellikle kolayca buharlaştırılabilen bir çözücüdür (Xi, vd., 2023).

Süperkritik ekstraksiyon, sıvı ve gaz arasında özel bir durum olan süperkritik halde bulunan bir maddeyi kullanarak bitkilerden etken madde ayırıştırma işlemini gerçekleştiren ileri düzey bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle uçucu ve ısıl olarak hassas bileşiklerin, çevre dostu ve verimli bir şekilde ekstrakte edilmesine olanak sağlamaktadır.

Süperkritik CO<sub>2</sub> ekstraksiyonu, bitkilerden etken madde elde etme işlemlerinde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Karbon dioksit, süperkritik halde iken çok iyi bir çözücü olma özelliği taşımaktadır. Bu yöntemle, uçucu yağlar, flavonoidler ve fenolik bileşikler gibi önemli aktif maddeler çıkarılabilmektedir.

Süperkritik ekstraksiyon (SFE), sıvı ve gaz fazları arasındaki özel süperkritik durumu kullanan bir ekstraksiyon yöntemidir. Bu süreç, bir maddeyi kritik sıcaklık ve basınç koşullarında işleyerek, çözücünün hem gaz hem de sıvı özelliklerini birleştiren bir fazda bulunmasını sağlamaktadır. Süperkritik halde, çözücüler sıvının çözücülük gücüne sahipken, gazın yayılma yeteneğini de kazanmaktadır. Bu sayede süperkritik çözücüler, çok düşük viskoziteye sahip olup, daha küçük porlardan geçerek ve daha etkili bir şekilde etken maddeleri çözerek, yüksek verimlilikle ekstraksiyon yapılmasını sağlamaktadır.

Her çözgenin, kritik sıcaklık (T<sub>c</sub>) ve kritik basınç (P<sub>c</sub>) diye bilinen iki temel parametre ile belirlenen bir süperkritik hali vardır. Süperkritik ekstraksiyon için en yaygın kullanılan çözücü, karbon dioksittir (CO<sub>2</sub>), çünkü CO<sub>2</sub>'nin kritik sıcaklığı ve basıncı, çevre dostu ve ekonomik bir ekstraksiyon çözümü sağlamaktadır. Karbon dioksit, sıvı ve gaz fazları arasında geçiş yapabileceği bu özel koşullara getirildiğinde, etken maddeleri bitkilerden verimli bir şekilde çıkarabilmektedir.

Süperkritik CO<sub>2</sub>, ekstraksiyon sırasında çevre dostu bir çözücü olarak çalışmaktadır. Karbon dioksit, bitki materyaline uygulanacak uygun sıcaklık ve basınç altında sıvıdan gaz fazına geçer ve bitkisel bileşenleri çözündürür. Süperkritik CO<sub>2</sub>'nin sağladığı çözünürlük, özellikle uçucu yağlar, fenolik bileşikler ve antioksidanlar gibi bileşiklerin ayrıştırılmasında oldukça etkilidir. Bu yöntem, alkol veya diğer geleneksel çözücülerle karşılaştırıldığında, toksik olmayan ve daha çevre dostu bir alternatiftir.

Süperkritik ekstraksiyon için kullanılan cihazlar genellikle üç ana bileşenden oluşur: bir çözücü tankı, bir reaktör (veya ekstraktör) ve bir ayrıştırma ünitesi. Çözücü tankı, sıvı CO<sub>2</sub>'nin depolandığı bölmedir. Bu CO<sub>2</sub>, yüksek basınç altında reaktöre gönderilmektedir. Reaktörde, kritik sıcaklık ve basınç koşulları sağlanarak çözücünün süperkritik hale gelmesi sağlanmaktadır. Ardından, bitki materyali ile bu süperkritik çözücü etkileşime girer ve aktif bileşiklerin çözünmesi sağlanmaktadır. Son olarak, ayrıştırma ünitesinde çözücünün geri kazanılması ve etken maddelerin saflaştırılması işlemi gerçekleştirilmektedir.

Süperkritik ekstraksiyon, geleneksel ekstraksiyon yöntemlerine göre daha yüksek verimlilik sunmaktadır. Süperkritik çözücüler, bitkisel bileşenleri daha hızlı ve verimli bir şekilde çözerek yüksek saflıkta etken madde elde edilmesini sağlamaktadır.

Bu yöntem, geleneksel çözücüler gibi toksik kimyasalların kullanılmasını gerektirmez. Ayrıca, kullanılan çözücülerin geri kazanılabilir olması çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır.

Süperkritik ekstraksiyon, özellikle yüksek ısı hassasiyete sahip bileşiklerin ayrıştırılması için idealdir. Bu yöntem, bileşenlerin yapısını bozmadan, düşük sıcaklıkta etken maddeleri çıkarabilmektedir.

Süperkritik ekstraksiyon, uçucu yağlar, antioksidanlar, flavonoidler ve diğer biyolojik olarak aktif bileşiklerin saflaştırılması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ilaç, gıda takviyeleri, kozmetik ve parfüm endüstrilerinde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Süperkritik ekstraksiyon, bitkilerden etken madde ayırıştırma işlemlerinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntem, yüksek verimlilik, çevre dostu olma, ısı olarak hassas bileşenleri koruma gibi avantajlar sunarak, bitkisel ürünlerin etkinliğini artırmak ve biyolojik aktif bileşiklerin daha saf ve verimli bir şekilde elde edilmesini sağlamak için güçlü bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Pourmortazavi & Hajimirsadeghi, 2007).

Biyopolimerler, biyolojik olarak uyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilir özelliklere sahip doğal veya sentetik polimerlerdir. Bu malzemeler, vücut ile uyumlu yapıları sayesinde doku mühendisliği, ilaç taşıma sistemleri ve yara tedavisi gibi birçok biyomedikal uygulamada geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Biyopolimerlerin kimyasal yapısı, fiziksel özellikleri ve biyolojik aktiviteleri, yara iyileşme sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle hidrofilik ve hidrofobik özelliklere sahip biyopolimerler, yara bakım ürünlerinin tasarımında dikkat çeken malzemelerdir.

Yara tedavisinde kullanılan biyopolimerler, genellikle hidrofilik ve hidrofobik özellikleri ile sınıflandırılmaktadır. Hidrofilik polimerler, suyu çekme ve nemli bir ortam sağlama kapasiteleri ile yara yüzeyini korurken, hidrofobik polimerler bariyer oluşturma, mekanik dayanıklılık sağlama ve kontrollü salınım sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu özellikler, biyopolimerlerin yara iyileşmesinde doku rejenerasyonu, enfeksiyon kontrolü ve ilaç salınımını düzenleme gibi süreçlere katkıda bulunmasını sağlamaktadır.

Polivinil alkol (PVA), sentetik bir hidrofilik biyopolimerdir ve biyoyumlu yapısı sayesinde yara tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PVA'nın kimyasal yapısı, suyu kolayca emme kapasitesine sahip hidrofilik gruplar içermektedir. Bu özellik, yarada nemli bir ortam sağlayarak epitelizasyonu hızlandırır ve iyileşme sürecini optimize etmektedir.

PVA'nın yara iyileştirme üzerindeki etkileri şunlardır: Yara yüzeyini nemli tutarak kuruluk nedeniyle oluşabilecek hücre ölümünü engellemektedir. PVA esaslı yara örtüleri, enfeksiyonu önlemek için koruyucu bir tabaka

oluşturmaktadır. PVA, yara üzerinde terapötik ajanların kontrollü ve sürekli salınımını sağlamaktadır.

PVA, elektroçirme yöntemiyle nanolif formunda üretildiğinde, hücrelerin tutunmasını ve proliferasyonunu teşvik ederek doku yenilenmesini desteklemektedir. Bu nedenle, PVA tabanlı yara bantları, hem akut hem de kronik yaraların tedavisinde etkilidir.

Polikaprolakton (PCL), biyobozunur bir hidrofobik polimerdir ve doku mühendisliği ile yara tedavisinde önemli bir yer tutmaktadır. PCL, uzun zincirli hidrofobik yapısıyla yavaş bozunma özelliğine sahiptir ve bu da uzun vadeli yara tedavileri için avantaj sağlamaktadır.

PCL'nin yara iyileştirme üzerindeki etkileri şunlardır: PCL, yara bandının yapısal bütünlüğünü koruyarak yara bölgesine fiziksel koruma sağlamaktadır. Yavaş bozunarak uzun süreli tedavi gerektiren yaralar için ideal bir malzeme sunmaktadır. Hidrofobik yapısı sayesinde yağda çözünen ilaçların kontrollü bir şekilde salınmasını gerçekleştirmektedir.

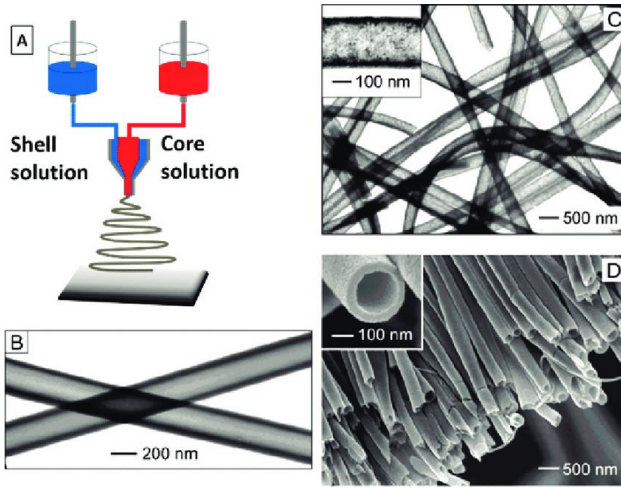
PCL, elektroçirme yöntemiyle nanolifler halinde üretildiğinde, hücre yönelimini ve doku yenilenmesini teşvik eden bir iskele yapısı oluşturmaktadır. Bu özelliği, özellikle derin ve kronik yaraların tedavisinde etkili olmasını sağlamaktadır.

Biyopolimerler, yara iyileşme sürecinin her aşamasında aktif bir rol oynamaktadır. Hidrofilik polimerler, nemli ortam yaratarak inflamasyon sürecini düzenlerken, hidrofobik polimerler enfeksiyonun önlenmesine ve uzun vadeli destek sağlamaya yardımcı olmaktadır. PVA ve PCL gibi biyopolimerlerin kombine kullanımı, yara iyileşmesini hızlandıran, enfeksiyon riskini azaltan ve hücre yenilenmesini teşvik eden inovatif yara bandı tasarımlarının geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Biyopolimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru şekilde optimize edilmesi, yara tedavisinde etkinliği artırarak hasta konforunu ve iyileşme hızını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu özellikleri ile biyopolimerler, hem geleneksel hem de modern yara tedavisi yaklaşımlarında vazgeçilmez birer bileşen olarak ön plana çıkmaktadır (Van de Velde & Kiekens, 2022).

Nanoteknoloji, özellikle biyomedikal alanlarda son yıllarda büyük bir devrim yaratmıştır. Nanolifler, bu teknolojinin en dikkat çeken ürünlerinden biridir ve yara iyileşmesi gibi önemli biyolojik süreçlerin iyileştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır. Nanolifler, çok küçük boyutları, yüksek yüzey alanları ve biyolojik uyumlulukları sayesinde, yara iyileşmesi gibi tıbbi süreçlerde kullanılan yeni nesil malzemeler olarak ön plana çıkmaktadır. Nanoliflerin üretimi ise, farklı tekniklerle gerçekleştirilir ve her bir teknik, üretilen liflerin özelliklerini, fonksiyonlarını ve biyolojik etkileşimlerini farklı şekilde şekillendirmektedir.

Elektrospinning, nanolif üretiminde en yaygın kullanılan tekniktir. Bu yöntemde, bir çözeltilen veya eriyikten elektriksel bir alan uygulayarak nanometre boyutlarında lifler üretilmektedir. Bu teknik, yüksek yüzey alanı, ince çaplı lifler ve kontrollü yapılar üretmeye olanak tanımaktadır. Ayrıca, bu liflerin biyolojik sistemlere uyumu ve biyolojik moleküllerle işlevsel hale getirilmesi daha kolaydır. Elektrospinning, yara iyileşmesi için önemli olan hücre yapışma özellikleri ve biyolojik etkileşimleri sağlamak için kullanılabilir. Coaxial nozul görüntüsü Şekil 2'de yer almaktadır ([https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers\\_fig3\\_323624449](https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers_fig3_323624449)).



**Şekil 2:** Coaxial nozul görüntüsü ([https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers\\_fig3\\_323624449](https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers_fig3_323624449)).

3D baskı teknolojisi, nanolif üretiminde son yıllarda popüler hale gelmiştir. FDM, polimerlerin katmanlar halinde birleştirilerek üç boyutlu yapılar oluşturulmasını sağlamaktadır. Nanolifler, 3D baskı teknikleriyle birleştirilerek daha işlevsel yapılar elde edilebilmektedir. Bu yöntem, özellikle yara örtüleri ve biyomedikal implantlar gibi uygulamalarda kullanılır, çünkü üç boyutlu yapılar, yara iyileşme süreçlerini hızlandıran doku mühendisliği uygulamaları için son derece uygundur.

Sol-jel yöntemi, sıvı bir çözeltiyi jel haline getirmek için kullanılan bir kimyasal işlemdir. Nanoliflerin üretiminde, metal oksit veya polimerik materyallerin çözeltileri kullanılarak ince lifler elde edilmektedir. Bu lifler, biyolojik dokularla etkileşime girerek yara iyileşmesini destekleyecek özelliklere sahip olabilmektedir. Bu teknikle üretilen nanolifler, biyolojik malzemelerle

uyumlu, biyolojik olarak parçalanabilir ve hücre büyümesini teşvik edici özelliklere sahip olabilmektedir.

Melt blowing, yüksek sıcaklıkta polimerlerin eriyip ince lifler halinde üflendiği bir üretim yöntemidir. Bu teknik, genellikle filtreleme veya bariyer malzemeleri üretmek için kullanılsa da, yara iyileşmesi alanında da potansiyel taşımaktadır. Nanolifler, yara örtülerinde ve diğer biyomedikal ürünlerde, yara bölgesine antibakteriyel ve anti-inflamatuar özellikler sağlayacak şekilde kullanılabilir.

Bu yöntem, bir çözeltinin bir substrat üzerine uygulanarak nanoliflerin oluşturulmasını sağlamaktadır. Polimer çözeltileri veya nanopartiküller içeren çözeltiler kullanılarak, biyomedikal ürünlere nanolif kaplamalar eklenebilmektedir. Bu yöntem, yara iyileşmesi sürecini hızlandırabilecek antibakteriyel ve biyolojik uyumlu yüzeyler elde etmek için uygundur.

Nanoliflerin yüzey özelliklerini değiştirmek, onların biyolojik etkileşimlerini geliştirmek için yaygın bir tekniktir. Yüzey modifikasyonları, nanoliflerin biyolojik ortamla uyumlu hale gelmesini sağlar, bu da yara iyileşmesi süreçlerini desteklemektedir. Nanoliflerin yüzeyine biyolojik moleküller, büyüme faktörleri veya ilaçlar bağlanabilir, böylece yara iyileşmesini hızlandıran ve enfeksiyonları önleyen fonksiyonlar eklenebilmektedir.

Nanolifler, yara iyileşmesini desteklemek için birçok mekanizma üzerinden etki göstermektedir. Bu etkileşimler arasında antibakteriyel özellikler, hücre proliferasyonunu destekleme, anti-inflamatuar etkiler ve kontrollü ilaç salımı yer almaktadır. Nanolifler, yara bölgesinde ideal bir mikro ortam oluşturarak, dokuların yenilenmesine yardımcı olabilir ve iyileşme sürecini hızlandırabilmektedir. Ayrıca, bu lifler, yara bölgesindeki hücrelerin etkinliğini artırarak, yeni doku oluşumunu teşvik edebilmektedir. Nanoliflerin üretim teknikleri, yara iyileşmesi için umut verici çözümler sunmaktadır. Farklı üretim yöntemleri, nanoliflerin biyolojik sistemlerle uyumunu ve işlevselliğini artırabilir, bu da onları yara iyileşmesi gibi hassas biyomedikal uygulamalarda çok değerli hale getirmektedir.

Nanolif üretiminde en yaygın ve etkili yöntemlerden biri olan elektrospinning, özellikle yara iyileştirme gibi biyomedikal uygulamalarda önemli bir yer tutmaktadır. Bu teknik, çözeltiden elektriksel bir alan aracılığıyla nanometre boyutlarında liflerin üretildiği bir süreç olmaktadır. Elektrospinning, polimerlerin ince lifler halinde üretimi için ideal bir yöntem sunar çünkü yüksek yüzey alanı, esneklik ve biyolojik uyumluluk gibi özellikler sağlayarak, yara iyileşmesi için gereken fonksiyonel özellikleri taşımaktadır. Ancak, elektrospinning işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi ve yara iyileştirme gibi tıbbi uygulamalarda etkili olabilmesi için, üretim parametrelerinin ve kullanılan malzemelerin doğru

bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Bitkilerden süperkritik ekstraksiyon ile etken madde ayrıştırma, etken madde içeren yara örtülerinin koaksiyel nozul içeren elektroğirme tekniği çalışma görüntüsü Şekil 2’de yer almaktadır.



**Şekil 2:** Bitkilerden süperkritik ekstraksiyon ile etken madde ayrıştırma, etken madde içeren yara örtülerinin koaksiyel nozul içeren elektroğirme tekniği çalışma görüntüsü

Elektrospinning sürecinde elde edilecek nanoliflerin kalitesi, kullanılan çözücünün tipi ve polimerin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, aşağıdaki faktörlerin her biri, nanoliflerin üretimi ve özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir:

Polimer çözeltisinin viskozitesi, elektrospinning sürecinin en kritik parametrelerinden biridir. Viskozite, çözeltinin akışkanlık özelliklerini belirler ve liflerin düzgün bir şekilde üretilip üretilmediğini etkiler. Yüksek viskoziteli çözeltiler, daha kalın liflerin üretilmesine neden olabilirken, düşük viskoziteli çözeltiler, ince ve tutarlı nanoliflerin üretimini zorlaştırabilir. Yara iyileşmesi gibi uygulamalar için, çözeltinin uygun viskoziteye sahip olması, liflerin stabilitesini ve biyolojik uyumluluğunu artırır.

Çözeltinin pH değeri, polimerin çözünürlük özelliklerini ve liflerin yüzey özelliklerini etkileyebilmektedir. Polimerin pH aralığı, çözücünün ve polimerin kimyasal özellikleriyle uyumlu olmalıdır. Ayrıca, pH değerinin yara iyileşmesini destekleyen özelliklere sahip olmasına dikkat edilmelidir; örneğin, antibakteriyel veya anti-inflamatuar özelliklerin sağlanmasında pH'nın rolü büyüktür.

Elektrospinning süreci, elektriksel bir alan oluşturularak nanoliflerin çekilmesini sağlamaktadır. Polimer çözeltisinin elektriksel iletkenliği, bu sürecin



etkinliğini doğrudan etkilemektedir. İyi bir elektriksel iletkenliğe sahip bir çözeltilinin, düzgün ve homojen lifler oluşturması daha kolaydır. Yara iyileşmesinde kullanılacak liflerde, elektriksel iletkenlik, hücre etkileşimlerini destekleyecek şekilde ayarlanmalıdır.

Kullanılan çözücünün, polimerle uyumlu olması ve liflerin stabil bir şekilde üretilmesini sağlaması gerekmektedir. Çözücü, aynı zamanda biyolojik uyumluluk açısından önemlidir; yara iyileşmesi gibi hassas bir süreçte, kullanılan çözücünün toksik olmaması gereklidir. Ayrıca, çözücünün hızlı buharlaşması ve liflerin sertleşmesi, elektrospinning sürecinin etkinliğini artırabilmektedir.

Polimerin moleküler ağırlığı, üretilen liflerin morfolojisini ve mekanik özelliklerini etkileyen bir faktördür. Yüksek moleküler ağırlıklı polimerler, daha güçlü ve esnek lifler üretirken, düşük moleküler ağırlıklı polimerler daha ince ve ince yapılı lifler verebilmektedir. Yara iyileşmesi için, polimerin doğru moleküler ağırlığa sahip olması, iyileşme sürecine uygun yapıyı oluşturmasına yardımcı olmaktadır.

Elektrospinning süreci sırasında, birçok parametre nanoliflerin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu parametrelerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi, yara iyileşmesi gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılacak ideal nanoliflerin üretilmesi için çok önemlidir.

Elektrospinningde uygulanan voltaj, çözeltiden liflerin çekilmesini sağlamaktadır. Voltajın yüksek olması, daha ince ve uzun nanoliflerin üretimi için gereklidir. Ancak, çok yüksek voltajlar, çözeltilinin damlamasına veya liflerin dengesiz şekilde üretilmesine yol açabilmektedir. Yara iyileşmesi gibi uygulamalarda, liflerin düzgün ve homojen olması gerektiğinden, voltajın optimize edilmesi gerekmektedir.

Çalışma mesafesi, spinnet ile kolektör arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Bu mesafe, liflerin çekilme hızını ve liflerin morfolojik özelliklerini etkilemektedir. Yara iyileşmesi için, liflerin mikro yapısının yara bölgesine uygun şekilde oluşturulması önemlidir, bu yüzden çalışma mesafesi doğru bir şekilde ayarlanmalıdır.

Kollektörün dönme hızı, üretilen liflerin düzenli bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanımaktadır. Dönme hızı, liflerin yoğunluğunu ve yönelimini etkilemektedir. Yara iyileşmesi için, liflerin düzgün bir şekilde yerleştirilmesi, iyileşme sürecini hızlandıran bir mikro ortam oluşturmaktadır.

Besleme debisi, polimer çözeltilisinin ne kadar hızla besleme mekanizmasına gönderileceğini belirlemektedir. Yüksek besleme debisi, daha kalın liflerin üretilmesine neden olabilirken, düşük debi ise ince ve homojen liflerin elde edilmesini sağlamaktadır. Yara iyileşmesi için, homojen ve mikro yapı açısından dengeli lifler elde edilmelidir.

Elektrospinning sürecindeki nem oranı, çözeltilinin viskozitesini ve liflerin dayanıklılığını etkileyebilmektedir. Yüksek nem, liflerin daha düzgün bir şekilde oluşmasını sağlayabilirken, düşük nem, liflerin kurummasına ve çatlamasına neden olabilmektedir. Yara iyileşmesi için, nem seviyesinin uygun bir seviyede tutulması, liflerin biyolojik uyumluluğunu artırmaktadır.

Elektrospinning tekniği, yara iyileşmesi için ideal nanoliflerin üretilmesi adına birçok avantaj sunmaktadır. Üretilen nanoliflerin, biyolojik uyumlulukları, hücre etkileşimini destekleyici özellikleri ve yara bölgesindeki iyileşme sürecini hızlandırıcı etkileri, doğru parametrelerin kullanımı ile mümkün olmaktadır. Nanoliflerin işlevselliği, sadece fiziksel özelliklere değil, aynı zamanda biyolojik aktiviteye de dayalıdır. Nanolifler antibakteriyel ajanlar, büyüme faktörleri veya diğer tedavi edici bileşiklerle fonksiyonelleştirilebilir, bu da yara iyileşmesinin hızlanmasına ve komplikasyonların önlenmesine yardımcı olabilmektedir.

Elektrospinning tekniğiyle yara iyileştirme için ideal ürünlerin üretilmesi, doğru fiziksel ve çalışma parametrelerinin titizlikle optimize edilmesiyle mümkündür. Bu parametrelerin her biri, nanoliflerin morfolojisini, biyolojik uyumluluğunu ve iyileşme süreçlerini doğrudan etkileyerek, yaraların daha hızlı ve etkili bir şekilde iyileşmesini sağlamaktadır (Subbiah vd., 2005; Teo & Ramakrishna, 2006; Lukáš vd., 2006; Ibrahim & Klingner, 2020).

## 2. SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

Bitkilerden etken madde ayrıştırma yöntemleri, farmasötik, kozmetik ve tıbbi alanda oldukça önemli bir yere sahiptir. Bitkiler, içerdikleri bioaktif bileşiklerle farklı sağlık sorunlarına yönelik tedavi seçenekleri sunar. Bitkisel etken maddelerin verimli bir şekilde ayrıştırılması, bu bileşiklerin etkinliğini artırmak ve uygulama alanlarını genişletmek için önemlidir. Süperkritik ekstraksiyon, özellikle çevre dostu özellikleri, yüksek verimliliği ve ısı hassas bileşenlerin korunması gibi avantajları ile öne çıkmaktadır. Geleneksel çözücülerle yapılan ekstraksiyon yöntemlerine kıyasla, süperkritik ekstraksiyon sayesinde daha yüksek saflıkta ve etkili bileşenler elde edilebilir.

Yara iyileştirme süreci, özellikle biyolojik aktif bileşiklerin kontrollü salımını sağlayabilen yenilikçi materyallerin kullanımını gerektirir. Polimer bazlı biyomateryaller, yara iyileştirme alanında biyoyuumluluğu, biyobozunabilirliği ve etken madde taşıma kapasitesini optimize eden sistemler sunmaktadır. Elektroçirme, nanoliflerin üretilmesinde önemli bir yöntem olarak yara iyileştirme süreçlerinde önemli bir rol oynar. Nanolifler, yara iyileşmesini hızlandırmak için gerekli olan etken maddelerin kontrollü ve hedeflenmiş salımını sağlar. Polimerik nanoliflerin elektrospinning yöntemiyle üretilmesi,

yara iyileşmesini hızlandıran, biyolojik olarak aktif bileşenlerin düzgün bir şekilde dağıtılmasını sağlayan bir sistem sunar.

Yara iyileştirme amaçlı kullanılan polimerik biyomateryaller, özellikle biyoyumlu ve biyobozunur özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu materyallerin üretimi sırasında polimerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, yaralı bölgedeki doku etkileşimini ve iyileşme sürecini doğrudan etkiler. Elektroeğirme (electrospinning) yöntemi ile üretilen nanolifler, yara iyileştirmede, özellikle etken madde taşıma ve kontrollü salım açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Nanoliflerin yüzey alanı yüksek olduğundan, etken maddeler için geniş bir taşıma kapasitesi sunar, bu da iyileşme sürecini hızlandırır.

Elektroeğirme sürecinde, kullanılan polimerin özellikleri ve elektrot parametreleri son derece önemlidir. Polimer türü, moleküler ağırlığı, çözücünün tipi ve viskozitesi, elektrospinning parametreleri (voltaj, mesafe, besleme hızı, kolektör hızı, nem oranı vb.) nanoliflerin yapısını ve fonksiyonunu doğrudan etkiler. Bu parametreler doğru şekilde ayarlandığında, yara iyileşmesini hızlandıracak uygun nanolifler elde edilebilir.

Özellikle voltaj parametresi, nanoliflerin çapını ve yapısını etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Yüksek voltaj, daha ince liflerin üretimini sağlarken, düşük voltaj daha kalın liflerin üretilmesine yol açabilir. Çalışma mesafesi, liflerin düzgün bir şekilde toplanabilmesi için önemlidir ve genellikle 10 cm ile 20 cm arasında ayarlanır. Besleme hızı, çözücünün akış hızını kontrol eder ve bu parametre, liflerin homojenliğini doğrudan etkiler. Ayrıca, kolektör dönme hızı da liflerin yönlendirilmesinde ve şekil kazanmasında rol oynar. Nanoliflerin düzgün yapılarının elde edilmesinde bu parametrelerin doğru ayarlanması kritik öneme sahiptir.

Polimer seçimi, nanoliflerin biyoyumluluğu, biyobozunabilirliği ve etken madde taşıma kapasitesini doğrudan etkileyen temel bir faktördür. Yara iyileştirici uygulamalar için kullanılan polimerler, genellikle biyobozunur özellikte olmalı, vücutta istenmeyen reaksiyonlara yol açmamalıdır. Polilaktik asit (PLA), poliglikolik asit (PGA), polikaprolakton (PCL) gibi biyopolimerler, yara iyileştirici ürünlerde sıklıkla tercih edilir. Bu polimerler, biyolojik olarak bozunabilen özellikleri sayesinde, yara bölgesinde uzun süre kalabilir ve iyileşme sürecini destekler. Ayrıca, polimerin moleküler ağırlığı, nanoliflerin özelliklerini etkileyen bir diğer önemli parametredir. Düşük moleküler ağırlıklı polimerler, daha ince liflerin üretimini sağlar, bu da yara iyileşmesi için daha uygun olabilir. Moleküler ağırlığı yüksek polimerler ise daha kalın liflerin üretimine yol açar, bu da farklı bir uygulama alanı yaratabilir.

Nanoteknoloji ve elektrospinning yöntemi, yara iyileştirme alanında büyük bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekte, yara iyileşmesini hızlandıran, antibakteriyel

özellikler gösteren ve etken madde salımını optimize eden biyomateryallerin üretimi daha da yaygınlaşacaktır. Özellikle biyoteknoloji ve nanoteknolojinin birleşimiyle, yara iyileştirici polimerlerin ve nanoliflerin tasarımı, daha hedeflenmiş ve etkili tedavi seçenekleri sunacaktır.

Gelecekte, polimerik nanoliflerin, etken maddelerin kontrollü ve gerektiği zaman salınımını sağlayan “akıllı” özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu akıllı sistemler, pH, sıcaklık ve elektriksel sinyallere tepki vererek, iyileşme sürecini daha etkin bir şekilde yönlendirebilir. Ayrıca, daha biyoyumlu ve daha düşük maliyetli polimerler geliştirilmesi, bu ürünlerin daha geniş bir pazarda kullanımını mümkün kılacaktır. Polimerik nanoliflerin yalnızca biyolojik olarak aktif bileşenlerin taşıyıcısı olmanın ötesinde, aynı zamanda antibakteriyel, antiinflamatuvar veya yara iyileşmesini hızlandırıcı etkiler gösterecek şekilde tasarlanması beklenmektedir. Bu çok fonksiyonlu yara örtüleri, yara bölgesindeki enfeksiyonları önleyebilir, iyileşme sürecini hızlandırabilir ve cilt hasarını en aza indirebilir.

Gelecekte, çevre dostu çözücüler kullanılarak üretilen biyopolimerler ve nanolifler daha fazla tercih edilecektir. Bu sürdürülebilir üretim yöntemleri, biyoteknolojik ve çevre bilincine dayalı araştırmalarla daha da geliştirilecektir. Aynı zamanda, etken madde ayrıştırma yöntemlerinin de çevre dostu çözücülerle optimize edilmesi, ekolojik dengeyi koruma açısından önemli bir adım olacaktır. Yara iyileştirici ürünlerde polimer bazlı nanoliflerin kullanımı, tedavi süreçlerini büyük ölçüde iyileştirebilir. Süperkritik ekstraksiyon gibi ileri ekstraksiyon yöntemlerinin kullanılması, etken maddelerin verimli bir şekilde ayrıştırılmasını sağlar ve bu maddelerin biyolojik etkinliklerinin artırılmasına olanak tanır. Teknolojik gelişmelerle, daha verimli, biyolojik olarak uyumlu ve hedeflenmiş tedavi sistemlerinin ortaya çıkması, yara iyileştirme alanında önemli yeniliklerin habercisidir.

## KAYNAKLAR

- Ibrahim, H. M., & Klingner, A. (2020). A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. *Polymer Testing*, 90, 106647.
- Jacobsen, S. (2016). Topical Wound Treatments and Wound-Care Products. *Equine wound management*, 75-103.
- Lukáš, D., Sarkar, A., Martinová, L., Vodsed'álková, K., Lubasová, D., Chaloupek, J., ... & Komárek, M. (2009). Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century). *Textile progress*, 41(2), 59-140.
- Oumeish, O. Y. (1998). The philosophical, cultural, and historical aspects of complementary, alternative, unconventional, and integrative medicine in the Old World. *Archives of Dermatology*, 134(11), 1373-1386.
- Pourmortazavi, S. M., & Hajimirsadeghi, S. S. (2007). Supercritical fluid extraction in plant essential and volatile oil analysis. *Journal of chromatography A*, 1163(1-2), 2-24.
- Schneider, L. A., Korber, A., Grabbe, S., & Dissemmond, J. (2007). Influence of pH on wound-healing: a new perspective for wound-therapy?. *Archives of dermatological research*, 298(9), 413-420.
- Schulman, R., & Dean, C. (2006). *Solve it with Supplements: The Best Herbal and Nutritional Supplements to Help Prevent and Heal More Than 100 Common Health Problems*. Rodale Books.
- Shah, A., & Mudassar, S. (2019). Nutraceutical-Based Pharmacological Intervention in the Management of Liver Diseases. *Nutraceuticals and Natural Product Derivatives: Disease Prevention and Drug Discovery*; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 375-394.
- Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., & Ramkumar, S. S. (2005). Electrospinning of nanofibers. *Journal of applied polymer science*, 96(2), 557-569.
- Teo, W. E., & Ramakrishna, S. (2006). A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology*, 17(14), R89.
- Xi, J., Zhou, X., Wang, Y., & Wei, S. (2023). Short-chain alcohol/salt-based aqueous two-phase system as a novel solvent for extraction of plant active ingredients: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 74-84.
- Van de Velde, K., & Kiekens, P. (2002). Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. *Polymer testing*, 21(4), 433-442.
- URL1 : <https://tektiklabilgielinde.saglik.gov.tr/yaralanmalarda-ilk-yardim/yara-nedir.html>).

URL2: ([https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers\\_fig3\\_323624449](https://www.researchgate.net/figure/Core-shell-nanofibers-obtained-by-coaxial-electrospinning-A-and-hollow-nanofibers_fig3_323624449)).

## 10. Bölüm

# GÖRÜNTÜ STEGANOĞRAFİSİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

**Songül KARAKUŞ<sup>1</sup>**

**Fırat ARTUĞER<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup>Dr. Öğr. Üyesi; Bitlis Eren Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.  
skaracus@beu.edu.tr ORCID No: 0000-0003-1999-0203

<sup>2</sup>Dr. Öğr. Üyesi; Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.  
firatartuger@munzur.edu.tr ORCID No: 0000-0002-4096-0458

## ÖZET

Günümüzde gelişen dijital teknolojilerin mesafeleri ortadan kaldırmasıyla birlikte veriye erişim de oldukça kolaylaşmıştır. Bu durum bir taraftan insanların hayatlarını kolaylaştırırken diğer taraftan da kötü niyetli kişiler tarafından çeşitli güvenlik sorunlarını da ortaya çıkarmıştır. O nedenle çeşitli güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir. Alınabilecek bu önlemler günümüzde şifreleme ve gizleme yöntemleri olarak bilinmektedir. Bu çalışmada bir veri gizleme yöntemi olan görüntü steganografi hakkında bilgiler verilerek; bu alanda kullanılan bazı yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu çalışma ile bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara genel bir fikir verebileceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Görüntü steganografi, veri gizleme, uzamsal alan, frekans alan.



## 1. Giriş

Steganografi Yunanca “steganos” ve “graphein” kelimelerinden türetilmiştir ve “örtülü yazı” anlamına gelmektedir. Steganografi, veriyi bir örtü nesnesine gizleyerek gönderme sanatı olarak bilinmektedir. Steganografinin temel amacı, bir mesajı, göndericiden alıcıya ulaşana kadar, dışarıdan bakıldığında zararsız veya masum görünen bir nesneye gizleyerek, üçüncü şahısların ya da saldırganların dikkatini çekmeyecek bir şekilde iletmektir[1,2]. Yani mesajın gizlendiğinin fark edilmemesini sağlamaktır.

Steganografinin kökenleri çok eski zamanlara uzanmaktadır. Bu alandaki ilk bilinen örneklerden biri, Pers Kralı Demaratus’un, Yunanistan’a yaklaşan bir saldırı tehlikesini bildirmek amacıyla tahta bir tabletin üzerine mesaj kazıyıp, tabletin üstünü balmumu ile kapatıp alıcıya göndermesidir. Alıcı, balmumu kaplı tableti ısıtarak balmumunu eritmiş ve gizli bilgiyi ortaya çıkarmıştır. Şekil 1’de, balmumu ile kaplanmış bir tahta tablet örneği görülmektedir[3,4].



Şekil 1. Üzeri balmumu ile kaplanmış tahta tablet

Tarihte bilinen en yaygın örneklerden biri de bir kölenin kafa derisine mesaj gizlemektir. Eski Yunan’da bir kölenin saçları kazındıktan sonra kafa derisine mesaj dövme şeklinde işlenerek kölenin saçlarının uzaması beklenmiştir. Saçları uzadıktan sonra köle mesajın alıcısına gönderilmiştir. Alıcı taraf kölenin saçlarını traş ederek gizlenen mesajı elde etmiştir[3]. Böylece alıcı dışındaki diğer kişilerin dikkatlerinin çekilmesinin önüne geçilmiştir. Şekil 2’de kafa derisine mesaj yazılan köle örneği yer almaktadır.



**Şekil 2.** Kafa derisine mesaj yazılan köle örneği[4]

Başka bir örnek vermek gerekirse ikinci dünya savaşı sırasında da Alman bir casus şifreli bir telegraf göndermiştir. Şekil 3’te bu şifreli telegrafın örneği yer almaktadır.

“Apparently neutral’s protest is thoroughly discounted and ignored. Isman hard hit. Blockade issue affects pretext for embargo on by-product, ejecting suets and vegetable oils.”

**Şekil 3.** Şifreli telegraf[3]

Şekil 3’te verilen telegraftaki her kelimenin ikinci harfleri bir araya getirildiğinde ise gizlenen mesaj tespit edilmiştir. Gizlenen mesaj Şekil 4’te verilmiştir.

“Pershing sails from NY June 1”

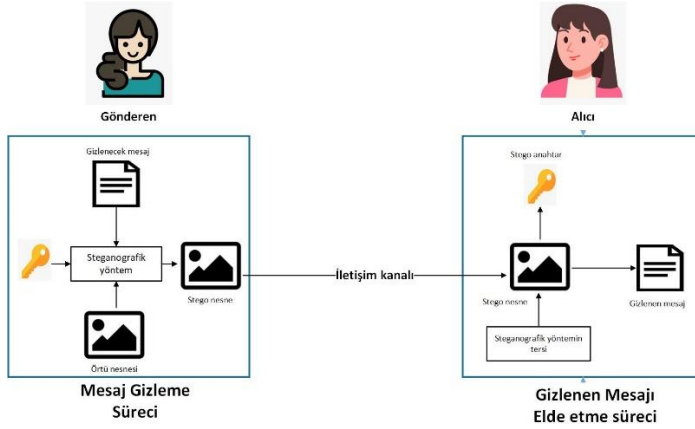
**Şekil 4.** Gizli mesajın yer aldığı telegraftan elde edilen mesaj

Son bir örnek vermek gerekirse de Çinliler de meyve sepetini gizli bir şekilde iletişim kurabilmek amacıyla kullanmışlardır. Burada meyve sepetinde yer alan meyvelerin yerleşim düzeni belirli bir anlam taşımaktadır[5].

Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere steganografi çeşitli örtü nesnelere kullanılarak bu örtü nesnelere içerisine 3. şahısların ya da saldırganların dikkatini çekmeyecek bir şekilde mesajın gizlenmesidir. Steganografide görüntü, ses, video vb. gibi farklı örtü nesnelere kullanılmaktadır. Kullanılan örtü nesnesine göre steganografi farklı isimler adı altında sınıflandırılmaktadır. Ayrıca gizlenecek olan mesaj açık bir metin olabileceği gibi şifrelenmiş bir metin ya da resim de olabilmektedir.

Veri gizlemenin ana hedefi, verilerin üçüncü şahıslar ya da saldırganlar tarafından erişilmeden, bozulmadan veya değiştirilmeden güvenli bir biçimde göndericiden alıcıya ulaşmasını sağlamaktır. Steganografi, uzun bir geçmişe

sahip olmasına rağmen, gelişen teknoloji ve yeni yöntemlerle hala geçerliliğini korumaktadır. Sağlık kurumlarında[6], diplomaside[7], bankalarda[6,8], askeri ve istihbarat kurumlarında[6,7] ve çeşitli kurumlarda[8] kullanılmaktadır. Şekil 5'te steganografi sistemine yer verilmiştir.



Şekil 5. Steganografi sistemi

Şekil 5'te de görüldüğü üzere bir steganografi sistemi gizlenecek mesaj, örtü nesnesi, stego anahtar, steganografik yöntem, stego nesne ve steganografik yöntemin tersi olmak üzere altı bileşenden oluşmaktadır.

**Gizlenecek mesaj:** Bir örtü nesnesi aracılığıyla alıcıya iletilmek istenen mesaj/ bilgidir.

**Örtü nesnesi:** Gizlenecek olan mesajın yer aldığı taşıyıcı ortamdır.

**Stego anahtar:** Gizlenecek olan mesaj/bilginin hem gizlenmesi hem de elde edilmesi için alıcı ve gönderici tarafında bilinmesi gereken özel bir parametredir.

**Steganografik yöntem:** Örtü nesnesine gizlenecek olan mesaj ve stego anahtarını yerleştirmek için kullanılan algoritmadır.

**Stego nesne:** Örtü nesnesine gizlenecek mesaj, stego anahtar ve steganografik yöntem kullanılarak gizlendikten sonra elde edilen örtü nesnesinin değiştirilmiş halidir.

**Steganografik yöntemin tersi:** Stego nesneden gizlenen mesajı ortaya çıkarmak için kullanılan yöntemdir. Genel olarak gizleme aşamasında kullanılan yöntemin tersi alınarak gizlenen mesaj elde edilmektedir.

## 2. Görüntü Steganografi Yöntemleri

Görüntü steganografisi görüntülerin örtü nesnesi olarak kullanıldığı bir steganografi türüdür ve literatürde çeşitli görüntü steganografi yöntemleri yer almaktadır. Bu yöntemler, genel olarak iki grupta ele alınmaktadır. Bunlar uzamsal alanda kullanılan yöntemler ve frekans alanda kullanılan yöntemlerdir[9,10]. Uzamsal alan yöntemlerinde gizlenecek mesaj doğrudan görüntüye yerleştirilirken[11-16], frekans alan yöntemlerinde ise, gizlenecek mesaj genellikle görüntünün yüksek frekanslı katsayılarına[17-20] gizlenmektedir.

### 2.1. Uzamsal Alanda Kullanılan Yöntemler

Uzamsal alanda en yaygın kullanılan yöntemlerin başında en önemsiz bite ekleme yöntemi gelmektedir. Diğer yöntemler ise piksel değer farklılıkları yöntemi, histogram kaydırma tabanlı yöntem, kenar tabanlı veri gizleme yöntemi ve palet tabanlı yöntemdir.

#### 2.1.1. En Önemsiz Bite Ekleme Yöntemi:

İmgeler, piksellerden oluşan dijital yapılar olup, her pikselin byte'ının en düşük anlamlı bitleri (EÖB) son bitleridir. Bu steganografi tekniğinde, görüntüdeki piksellerin byte'larının son bitleri değiştirilerek gizli mesajlar entegre edilmektedir[21]. Gizlenmesi istenen verinin bitleri, sırasıyla her pikselin her byte'ının son bitine eklenmektedir, yani her pikselin son biti, gizli bilginin bir kısmıyla değiştirilmektedir. Bu sayede, örtü görüntüsünde meydana gelen değişiklikler, gözle görülemeyecek kadar küçük olabilecektir[22]. Bu yaygın ve basit yöntem[23], görüntüye gizli veriyi baştan sona sıralı bir şekilde eklemenin yanı sıra, rastgele seçilen piksellere de gizleme yapma imkanı sunmaktadır. Bu rastgele seçim, genellikle bir rastgele sayı üretici kullanılarak belirlenmektedir[24]. Bir örnek vermek gerekirse; gizlenecek mesaj '11010110' şeklinde olsun. Görüntünün ilgili piksel değerleri ise,

01010100	11110100	10110110	00101011
10011101	10110010	01100101	11001101

olsun. Gizlenecek mesaj ilgili görüntünün EÖB'sine sıralı bir şekilde gizlendiğinde şu şekilde olacaktır.

0101010 <b>1</b>	1111010 <b>1</b>	1011011 <b>0</b>	0010101 <b>1</b>
1001110 <b>0</b>	1011001 <b>1</b>	0110010 <b>1</b>	1100110 <b>0</b>

Mesaj gizlendikten sonra değişikliğe uğrayan bitler kırmızı renkte gösterilmiştir.

#### 2.1.2. Piksel Değer Farklılıkları Yöntemi:

Wu ve Tsai tarafından 2003 yılında geliştirilen bu yöntem, gri tonlamalı iki ardışık piksel arasındaki farkı kullanarak veri gizlemeyi sağlamaktadır[25]. Bu yöntemde, örtü görüntüsü önce üst üste binmeyen bloklara ayrılmakta ve her blokta iki komşu pikselin farkı hesaplanmaktadır. Farkın büyük olduğu bölgelerde, daha fazla veri gizlenebilmektedir. Bu yöntemde, doğrudan piksel değerlerini değiştirmek yerine, iki komşu piksel arasındaki farklar manipüle edilerek gizlenecek veri yerleştirilmektedir. Gizlenebilecek veri miktarı, görüntünün yapısına ve pikselin kenar veya düz alanda bulunmasına göre değişmektedir. Kenarlardaki pikseller arasındaki fark daha fazla olduğundan, buralara veri gizlemek düz alanlara göre daha verimli olmaktadır[26]. Ayrıca, görüntünün kenar kısımlarında yapılan değişiklikler, insan gözü tarafından genellikle fark edilmemektedir[27].

### **2.1.3. Histogram Kaydırma Tabanlı Yöntem:**

Bu yöntemde, gizlenecek veri örtü görüntüsünün histogram yapısı dikkate alınarak gizlenmektedir[27]. Zira, veri gizlendiği tespit edilecekse, genellikle görüntünün histogramı analiz edilmektedir. Ancak bu yöntemde histogram üzerinde yapılan değişiklikler, görüntüdeki veri gizlendiğini gösterecek belirgin bir iz bırakmamaktadır. Bu sayede histogram incelendiğinde gizli verinin varlığı anlaşılmamaktadır.

### **2.1.4. Kenar Tabanlı Yöntem:**

Bu yöntemde gizlenecek veri görüntünün kenar kısımlarına gizlenmektedir. Kenar bölgesinde pikseller arasındaki fark daha belirgin olduğu için kenar bölgesine yapılan veri gizleme düz alana yapılan veri gizlemeye göre daha az dikkat çekmektedir.

### **2.1.5. Palet Tabanlı Yöntem:**

Bu yöntem, ilk kez Fridrich tarafından önerilmiştir[28] ve genellikle 8 bit gri tonlamalı veya 24 bit renkli görüntülerde kullanılan EÖB yöntemine benzer bir yaklaşım göstermektedir. Bu yöntemde başlangıç olarak, paletteki renkler parlaklıklarına göre sıralanmaktadır. Ardından, sıralanan renklerin indekslerinin EÖB'sine gizlenmek istenen mesaj yerleştirilmektedir[29,30].

Yukarıda bahsedilen bu yöntemler uzamsal alanda en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin dışında kod tabanlı, haritalama tabanlı vb. çeşitli yöntemler de yer almaktadır.

## **2.2. Frekans Alanda Kullanılan Yöntemler**

Gizlenmesi gereken veri, örtü görüntüsünün uzamsal alandan frekans alanına dönüştürülmesinin ardından, elde edilen frekans katsayılarına yerleştirilmektedir[19,29,31]. Frekans alanında, büyüklük ve faz olmak üzere iki ana bileşen bulunmaktadır. Büyüklük bileşeni, görüntüdeki frekans içeriğini temsil ederken, faz bileşeni dönüşüm işlemlerinde uzamsal alana geri dönüşümde kullanılmaktadır[29]. Veri gizlendikten sonra, elde edilen stego görüntüsünü elde edebilmek için frekans alanındaki veriler tekrar uzamsal alana dönüştürülmektedir. Frekans alanında kullanılan steganografi yöntemleri arasında Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD), Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD), Tamsayı Dalgacık Dönüşümü (TDD) gibi yöntemler bulunmaktadır[30]. Bu yöntemler arasındaki fark, dönüşüm aşamasında uygulanan matematiksel formüllerde yatmaktadır[32].

### **2.2.1. Ayrık Kosinüs Dönüşümü Yöntemi:**

Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD) yöntemi, bir görüntüyü görsel kaliteye bağlı olarak farklı parçalara ayırmaktadır[33]. Adından da anlaşılacağı üzere, yalnızca kosinüs terimlerinden yararlanılarak hem sinyal hem de görüntülere uygulanabilmektedir. Bir sinyali uzamsal alandan frekans alanına dönüştürmek için 1 boyutlu AKD kullanılırken, frekans alanından uzamsal alana dönüşüm için 1 boyutlu ters AKD kullanılmaktadır. Görüntüyü ise uzamsal alandan frekans alanına aktarmak amacıyla 2 boyutlu AKD uygulanırken, frekans alandan uzamsal alana dönüşüm için ise 2 boyutlu ters AKD kullanılmaktadır[34].

### **2.2.2. Ayrık Dalgacık Dönüşümü Yöntemi:**

Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) yöntemi, dalgacık katsayılarının hesaplanmasında tüm olası ölçeklerin göz önünde bulundurulmasının, gereksiz yere fazla veri üretmesine ve işlem yükünü artırmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla, ölçek ve kaydırma parametrelerinin yalnızca 2'nin katları şeklinde seçilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, dalgacık katsayılarının hesaplanmasında daha verimli bir yöntem olarak ADD olarak adlandırılmaktadır[35,36]. ADD ile bir görüntü uzamsal alandan frekans alanına dönüştürülürken, görüntü dört ana bileşene ayrılmaktadır: LL, LH, HL ve HH. Burada, LL düşük frekanslı bileşeni, LH dikey orta frekanslı, HL yatay orta frekanslı ve HH yüksek frekanslı bileşeni temsil etmektedir[37].

### **2.2.3. Tamsayı Dalgacık Dönüşümü Yöntemi:**

Tamsayı Dalgacık Dönüşümü (TDD) yönteminde, dalgacık katsayıları başlangıçta kayan nokta değerleri olarak elde edilmektedir. Fakat bu değerler

yeniden yapılandırma aşamasında yuvarlama veya kesilme işlemleri ile düzeltilmeye çalışıldığında, veri kayıpları meydana gelebilmektedir[38]. Görüntüler, piksellerden oluşan verilerden meydana gelmektedir ve her bir pikselin değeri de tam sayıdır. Veri gizlendiğinde, bu pikseller üzerinde yapılan değişiklikler de yine tam sayılı değerlere dayanmaktadır. Ancak, dalgacık dönüşümü uygulandığında, elde edilen katsayılar kayan nokta değerlerine dönüşecektir. Ters dönüşüm yapıldığında ise kayan noktalı değerlerin yuvarlanması veya kesilmesi, bilgi kayıplarına yol açabilmekte ve bu da veri bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu tür kayıpları önlemek amacıyla TDD geliştirilmiştir. TDD yönteminde, elde edilen katsayılar tam sayılar olduğundan, herhangi bir bilgi kaybı meydana gelmeyecek ve böylece dönüşüm tamamen tersinir olacaktır[39].

TDD, lifting şeması ve basit kesme yöntemleriyle uygulanmaktadır[40]. Lifting tekniğiyle gerçekleştirilen TDD, tamamen tersine çevrilebilir bir yapıya sahiptir. Bunun nedeni, katsayıların sonlu tamsayılarla ifade edilmesi, bu sayede yeniden yapılandırma işleminin mümkün olmasını sağlamasıdır[41].

Frekans alanında kullanılan yöntemlerden yukarıda bahsedilenler dışında farklı dönüşüm yöntemleri de bulunmaktadır.

### 3. Görüntü Steganografisinde Kullanılan Görsel Analiz Metrikleri

Görüntülere veri gizleme yapıldıktan sonra görüntüler üzerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Buradaki amaç bu değişikliğin üçüncü şahıslar/saldırganlar tarafından fark edilmemesini sağlamaktır. Bu nedenle bunu analiz edebilmek için görüntüler üzerinde bazı metrikler kullanılmaktadır. Aşağıda bu metriklere ve nasıl hesaplandıklarına yer verilmiştir.

Ortalama Karese Hata (Mean Squared Error-MSE) metriği ile stego görüntüdeki bozulmayı ölçmek amacıyla orijinal görüntü ve stego görüntü arasındaki kümülatif karesel hata hesaplanmaktadır. Elde edilen MSE değeri ne kadar az ise stego görüntüdeki bozulma da o kadar az olmaktadır[42]. MSE'yi hesaplayabilmek için Denklem 1 kullanılmaktadır.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (C(x, y) - S(x, y))^2 \quad (1)$$

Denklem 1'deki M ve N görüntünün boyutlarını, C(x, y) örtü görüntüsünü, S(x, y) ise stego görüntüyü ifade etmektedir.

Orijinal görüntü ile stego görüntü arasındaki kaliteyi ölçebilmek için de Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal-to-Noise Ratio-PSNR) metriği kullanılmaktadır[42]. Denklem 2'de PSNR formülü görülmektedir.

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE} \right) \quad (2)$$

PSNR metriği dB cinsinden ölçülmektedir ve Denklem 2'de de görüldüğü üzere MSE metriği ile ters orantılıdır[43]. PSNR değerinin 30 dB'in altında olması durumunda görüntüdeki bozulma oranı fazla olacağı ve veri gizlendiği fark edileceği için kabul edilmezken; 30 dB ile 40 dB arası değerler kabul edilebilir durumdadır. 40 dB ve üzerindeki değerler ise oldukça iyidir[44].

Görüntünün kalitesi tek başına yeterli olamayabilmektedir. Bu durumda da orijinal görüntü ve stego görüntüdeki parlaklık, kontrast ve yapıya bakmak gerekmektedir[45]. Bunun için de Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçüsü (Structural Similarity Index Measure-SSIM) metriği devreye girmektedir. 0 ile 1 arasında değerler alan SSIM'de değerler 1'e ne kadar yakınsa o kadar orijinal görüntüye benzediği anlamına gelmektedir[46]. Denklem 3'te SSIM'nin hesaplamasına dair formülasyon yer almaktadır.

$$SSIM(CI, SI) = \frac{(2\mu_{CI}\mu_{SI}+c1)(2\sigma_{CISI}+c2)}{(\mu_{CI}^2+\mu_{SI}^2+c1)(\sigma_{CI}^2+\sigma_{SI}^2+c2)} \quad (3)$$

Görüntüler üzerindeki korelasyonda azalma, bozulma ve kontrastı değerlendirebilmek için Evrensel Görüntü Kalite İndeksi (Universal Image Quality Index-UQI) kullanılmaktadır[47]. Denklem 4'te bu metriğe ait formüle yer verilmiştir.



$$UQI(CI, SI) = \frac{4\mu_{CI}\mu_{SI}2\sigma_{CISI}}{(\mu_{CI}^2 + \mu_{SI}^2)(\sigma_{CI}^2 + \sigma_{SI}^2)} \quad (4)$$

-1 ile 1 arasında değerler alan UQI metriğinde birbirine çok benzeyen iki görüntünün değerinin 1'e yakın olması gerekmektedir[46].

Denklem 3 ve Denklem 4'teki  $CI$ ,  $SI$ ,  $\mu_{CI}$ ,  $\mu_{SI}$ ,  $\sigma_{CI}^2$ ,  $\sigma_{SI}^2$  ve  $\sigma_{CISI}$  parametreleri sırasıyla örtü görüntüsü, stego görüntü, örtü görüntüsünün ortalaması, stego görüntüsünün ortalaması, örtü görüntüsünün varyansı, stego görüntüsünün varyansı ve örtü görüntüsü ve stego görüntüsünün kovaryansı anlamına gelmektedir. Ayrıca Denklem 3 ve Denklem 4'te yer alan  $c_1$  ve  $c_2$  değerleri de  $c_1=(k_1L)^2$  ve  $c_2=(k_2L)^2$  formülü ile hesaplanmaktadır. Burada  $k_1$  ve  $k_2$ 'nin varsayılan değeri sırasıyla 0,01 ve 0,03'tür.  $L$  parametresi ise görüntüdeki piksellerin dinamik aralığını ifade etmektedir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Eski çağlardan beri insanlar veri güvenliğini sağlayabilmek amacıyla veri gizleme yöntemlerini farklı şekillerde kullanmışlardır. Kafa derisine mesaj yazılan köle, üzeri balmumu ile kaplanan tahta tablet vb. bu örneklerden sadece birkaçıdır. Günümüzde gelişen dijital teknolojilerle birlikte veriye erişim çok daha kolaylaştığı için şifreleme ve gizleme gibi çeşitli güvenlik önlemlerinin alınması gerekmektedir. Bir veri gizleme yöntemi olan steganografi yöntemi de günümüzde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Steganografi yönteminde taşıyıcı ortama göre bir isim verilmektedir. Günümüzde dijital görüntüler oldukça fazladır. Bu nedenle de görüntünün kullanıldığı steganografi çalışmaları da oldukça yaygındır. Taşıyıcı ortamın görüntü olduğu steganografi türüne görüntü steganografi denilmektedir. Görüntü steganografi yöntemi bir görüntünün içerisine dışarıdan bakıldığında fark edilemeyecek bir şekilde veri gizleme yöntemidir. Görüntü steganografisinde görüntüye verinin doğrudan gizlendiği uzamsal alanda kullanılan yöntemler ve görüntüyü alt bantlarına ayırdıktan sonra gizleme yapılan frekans alanda kullanılan yöntemler bulunmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde veri gizleme yöntemleri güvenlik açısından oldukça önemlidir. Özellikle de dijital görüntülerin oldukça fazla olmasından dolayı bu alanda yapılan çalışmaların artırılmasının oldukça önemli olabileceği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Din, R., Mahmuddin, M. ve Qasim, A.J. (2019). Review on Steganography Methods in Multi-Media Domain, *International Journal of Engineering & Technology*, cilt 8(1.7), ss. 288-292
- [2] Kumar, M. (2011). *Steganography and Steganalysis of Joint Picture Expert Group (JPEG) Images*, Doktora Tezi, Florida Üniversitesi
- [3] Dereli, Ç. (2010). *Dilbilimsel Steganografi Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [4] Tiwary, A., Gupta, A.K. ve Tiwari, R.K. (2019). Different Image Steganography Techniques: An Overview, *International Journal of Computer Engineering and Applications*, cilt XI (IX), ss. 1-13
- [5] Şahin, A. (2007). *Görüntü Steganografide Kullanılan Yeni Metodlar ve Bu Metodların Güvenilirlikleri*, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [6] Alyousuf, F.Q.A., Din, R. ve Qasim, A.J. (2020). Analysis Review on Spatial and Transform Domain Technique in Digital Steganography, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, cilt 9(2), ss. 373-381
- [7] Petitcolas, F.A.P., Anderson, R.J. ve Kuhn, M.G. (1999). Information Hiding- A Survey, *Proceedings of the IEEE*, cilt 87(7), ss. 1062-1078
- [8] Singh, A., Chauhan, M. ve Shukla, S. (2018). Comparison of LSB and proposed modified DWT algorithm for image steganography, *International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN2018)*, Hindistan
- [9] Rahman, S., Uddin, J., Zakarya, M., Hussain, H., Khan, A. A., Ahmed, A., ve Haleem, M. (2023). A comprehensive study of digital image steganographic techniques. *IEEE Access*, 11, 6770-6791.
- [10] Khalaf, A. M., ve Lakhtaria, K. (2024, February). A review of steganography techniques. In *AIP Conference Proceedings* (cilt 3051, sayı 1). AIP Publishing.
- [11] Chan, C.-K. ve Cheng, L.M. (2004). Hiding Data in Images by Simple LSB Substitution, *Pattern Recognition*, cilt 37, ss. 469-474
- [12] Sravanthi, G.S., Devi, B.S., Riyazoddin, S.M. ve Reddy, M.J. (2012). A Spatial Domain Image Steganography Technique Based on Plane Bit Substitution Method, *Global Journal of Computer Science and Technology Graphics & Vision*, cilt 12(15), ss. 1-8
- [13] Chutani, S. ve Goyal, H. (2012). LSB Embedding in Spatial Domain- A Review of Improved Techniques, *International Journal of Computers & Technology*, cilt 3(1), ss. 153-157

- [14] Tseng, H.-W. ve Leng, H.S. (2013). A Steganographic Method Based on Pixel-Value Differencing and the Perfect Square Number, *Journal of Applied Mathematics*, Makale ID: 189706
- [15] Wang, C.-M., Wu, N.-I., Tsai, C.-S. ve Hwang, M.-S. (2008). A High Quality Steganographic Method with Pixel-Value Differencing and Modulus Function, *The Journal of System and Software*, cilt 81, ss. 150-158
- [16] Wu, D.-C. ve Tsai, W.-H. (2003). A Steganographic Method for Images by Pixel-Value Differencing, *Pattern Recognition Letters*, cilt 24, ss. 1613-1626
- [17] Mazumder, J.A. ve Hemachandra, K. (2019). Image steganography using the fusion of quantum computation and wavelet transformation, *Third International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC 2019)*, Hindistan
- [18] Setiadi, D.R.I.M., Rachmawanto, E.H. ve Sari, C.A. (2017). Secure Image Steganography Algorithm Based on DCT with OTP Encryption, *Journal of Applied Intelligent System*, cilt 2(1), ss. 1-11
- [19] Bhattacharyya, S. ve Sanyal, G. (2010). Data Hiding in Images in Discrete Wavelet Domain Using PMM, *International Journal of Computer and Information Engineering*, cilt 4(8), ss. 1276-1284
- [20] Atta, R. ve Ghanbari, M. (2018). A High Payload Steganography Mechanism Based on Wavelet Packet Transformation and Neutrosophic Set, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, cilt 53, ss. 42-54
- [21] Jain, N., Meshram, S. ve Dubey, S. (2012). Image Steganography Using LSB and Edge-Detection Technique, *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, cilt 2(3), ss. 217-222
- [22] Gutub, A. ve Al-Shaarani, F. (2020). Efficient Implementation of Multi-image Secret Hiding Based on LSB and DWT Steganography Comparisons, *Arabian Journal for Science and Engineering*
- [23] Oudah, M.K., Abed, A.N., Khudhair, R.S. ve Kaleefah, S.M. (2020). Improvement of Image Steganography Using Discrete Wavelet Transform, *Engineering and Technology Journal*, cilt 38 (1), ss. 83-87
- [24] Öztürk, E., Şahin Mesut, A. ve Mesut, A. (2011). LSB ekleme yönteminde bilgi gizleme için tek renk kanal kullanımının güvenliğe etkileri, *IV. Ağ ve Bilgi Güvenliği Sempozyumu*, Ankara
- [25] Wu, D.-C. Ve Tsai, W.-H. (2003). A Steganographic Method for Images by Pixel-Value Differencing, *Pattern Recognition Letters*, cilt 24(9-10), ss. 1613-1626

- [26] Subhedar, M. S. Ve Mankar, V.H. (2014). Current Status and Key Issues in Image Steganography: A Survey, *Computer Science Review*, cilt 13, ss. 95-113
- [27] Razavi, N. (2017). *LSB Steganografi Yönteminde Yüksek Kapasiteli Veri Gizleme*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [28] Fridrich, J. Ve Du, R. (1999). Secure steganographic methods for palette images, *Third International Workshop (IH'99)*, Almanya
- [29] Valıbaylı, T. (2020). *Web Güvenlik Dahilinde Steganografi Kullanımı ve Kullanıcı Giriş Sisteminde Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- [30] Tiwari, A., Yadav, S.R. ve Mittal, N.K. (2014). A Review on Different Image Steganography Techniques, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, cilt 3(7), ss. 121-124
- [31] Hussain, M., Abdul Wahab, A.W., Javed, N. ve Jung, K.-H. (2016). Hybrid Data Hiding Scheme Using Right-Most Digit Replacement and Adaptive Least Significant Bit for Digital Images, *Symmetry*, cilt 8(41), ss. 1-21
- [32] Takaoğlu, F. (2016). *DWT ve DCT Steganografide Performans Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [33] <https://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/Multimedia/node231.html> (Erişim tarihi: 1 Aralık 2024)
- [34] Khayam, S.A. (2003). *The Discrete Cosine Transform (DCT): Theory and Application*, Michigan State University, 114, ss. 1-31
- [35] Berdibek, M. (2009). *Güç Sistemlerinde Güç Kalitesinin Ayırık Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [36] Karakoç, A. O. (2010). *Kalman Filtresi ve Ayırık Dalgacık Dönüşümü Tekniği Kullanılarak EKG İşaretlerinin Üzerindeki Gürültülerin Temizlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [37] Abdirashid, A. M., Solak, S., ve Sahu, A. K. (2022). Data Hiding Based on Frequency Domain Image Steganography. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt 42, ss. 71-76.
- [37] Zhang, H. ve Hu, L. (2019). A Data Hiding Scheme Based on Multidirectional Line Encoding and Integer Wavelet Transform, *Signal Processing : Image Communication*, cilt 78, ss. 331-344
- [39] Calderbank, A.R., Daubechies, I., Sweldens, W. ve Yeo, B.-L. (1998). Wavelet Transforms That Map Integers to Integers, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, cilt 5, ss. 332-369

- [40] Prabakaran, G. (2019). A New Blind Image Steganography Based on Integer Wavelet Transform, *International Journal of Information and Computing Science*, cilt 6(6), ss. 510-519
- [41] Lin, C., Zhang, B. ve Zheng, Y.F. (2000). Packed Integer Wavelet Transform Constructed by Lifting Scheme, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, cilt 10(8), ss. 1496-1501
- [42] Hussein, Q.M. (2020). New Metrics for Steganography Algorithm Quality, *International Journal of Advanced Science and Technology*, cilt 29(02), ss. 2092-2098
- [43] Joshi, K., Yadav, R. ve Allwadhi, S. (2016). PSNR and MSE based investigation of LSB, International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT), New Delhi, Hindistan
- [44] Pradhan, A., Sahu, A.K., Swain, G. ve Sekhar, K.R. (2016). Performance evaluation parameters of image steganography techniques, International Conference on Research Advances in Integrated Navigation Systems (RAINS 2016), Doddaballapur, Bangalore, India
- [45] Alyousuf, F.Q.A., Din, R. ve Quasim, A.J. (2020). Analysis Review on Spatial and Transform Domain Technique in Digital Steganography, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, cilt 9(2), ss. 373-381
- [46] Abd El-Latif, A.A., Abd-El-Atty, B. ve Vegenas-Andraca, S.E. (2019). A Novel Image Steganography Tecnique Based on Quantum Substitution Boxes, *Optics and Laser Technology*, cilt 116, ss. 92-102
- [47] Karakış, R. (2015). *Epileptik MRG ve EEG Verileri İçin Bulanık Mantık Tabanlı Steganografi Uygulaması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü

## 11.Bölüm

### DOKU MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARI İÇİN ELEKTROEĞİRME TEKNOLOJİSİ

Zişan Buse YARALI ÇEVİK<sup>\*1</sup>

---

<sup>1</sup> Biyomedikal Test, Kalibrasyon Uygulama ve Araştırma Merkezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

E-mail: [Ziysanbuse.yarali@ikcu.edu.tr](mailto:Ziysanbuse.yarali@ikcu.edu.tr)

\* Sorumlu Yazar

## 1. Doku Mühendisliği

Doku mühendisliği, ilk kez 1993 yılında Science dergisinde "Doku mühendisliği" başlıklı bir makalede Robert Langer ve Joseph Vacanti tarafından "Doku fonksiyonunu onaran, sürdüren veya iyileştiren biyolojik ikamelerin geliştirilmesine yönelik mühendislik ve yaşam bilimlerinin ilkelerini uygulayan disiplinler arası bir alan" olarak tanımlanmıştır (1, 2). Doku mühendisliğinin temel amacı, doku benzeri yapılar oluşturmak için canlı hücreleri, biyoyumlu malzemeleri ve uygun biyokimyasalları (örneğin; büyüme faktörleri) ve fiziksel (örneğin; döngüsel mekanik yükleme) faktörleri kullanarak doku ihtiyacının karşılanması ya da rejenerasyonunu sağlamaktır (2, 3). Ayrıca doku mühendisliği, sağlıklı olmayan dokuların in vitro olarak modellenmesini ve bu dokulara özgü yenilikçi yaklaşımlarla güncel tedavi yollarının geliştirilmesini de hedeflemektedir (3, 4).

Dokular veya organlar, geleneksel farmasötik tedavilerin artık uygulanamayacağı kadar ciddi şekilde hastalandığında veya kanser, konjenital anomali veya travma nedeniyle dokular harap olmuş dokuların veya organların yeniden inşası için yapay organlar veya organ nakli ilk tercih olmaktadır (5, 6). Günümüzde donör yetersizliği, nakil edilen doku uyumsuzluğu ve immun yanıt oluşumu gibi nedenlerle yapay organlara talep oldukça artmıştır (6). Doku mühendisliği ile kayda değer ilerlemeler geliştirilse de daha iyi biyoyumluluk ve biyoışlevsellik için mevcut çalışmalar devam etmektedir. Bu sebeple, doku mühendisliğiyle geliştirilen ürünlere ilgi giderek artmaktadır.

Doku mühendisliği, hücre çoğalması ve bağlanması için daha uygun bir ortam oluşturabilmeyi de amaçlamaktadır. Böylelikle in vitro da potansiyel olarak küçük ölçekteki çalışmalarla in vivo ortamda alınacak hücrenel ya da dokusal cevapların ipuçları da elde edilmektedir. Bu sebeple doku mühendisliğinde, doğal hücreler arası matrisi (ECM) nano ölçekte taklit etmek için yeni biyomateryal üretimi hedeflenmektedir (7). Bu biyomateryallerin üretiminde hedeflenen doku rejenerasyonu ve in vivo sistemlerin taklit edilmesi elektroöğirme teknolojisi ile sağlanabilmektedir. Dolayısıyla, elektroöğirme teknolojisi küresel ölçekte önemli bir in vitro teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2. Elektroöğirme Yöntemi

Elektroöğirme yöntemi ilk kez 1600'lü yıllarda William Gilbert tarafından ortaya çıkarılmıştır. 1990'lı yıllarda Darrell Reneker ve Gregory Rutledge tarafından modern bir hale dönüştürülmüştür (7). 2000 'li yıllarda kompozit nanofiberlerin üretimi sağlanmış ve 2010 'lu yıllarda elektroöğirme teknolojisinde kullanılmak üzere şırınga uçları gibi endüstriyel ürünler ortaya çıkmıştır (8).



Temel ve basit bir prensiple çalışan elektroğirme yöntemi, çeşitli mikro veya nanolifli malzemelerin oluşturulmasında kullanılan bir yöntemdir (9). Çok yönlü, basit ve uygun maliyetli bir yöntem olması nedeniyle biyomedikal alanda önemli gelişmelere katkıda bulunmaktadır. Ayrıca bir çok farklı yüzey oluşturmak için de kullanılabilir (10). Elektroğirme yöntemi, tünden gelim (top-down) yaklaşımını kullanarak organik ve inorganik polimerlerin nanoçapta fiberlerin üretimini sağlamaktadır (9, 11). Bu yöntem, aralığı 2 nm 'den mikrometrelere kadar değişen farklı boyutlarda fiberlerin üretimine imkan vermektedir (12).

### **2.1 Elektroğirme Teknolojisinin Amacı**

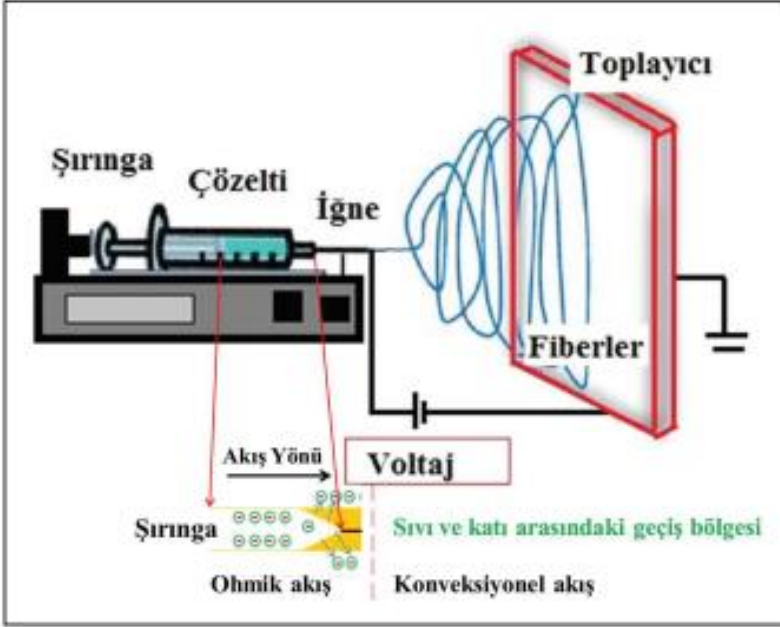
Hücrelerin belli bir yüzeyde tutunması, büyümesi, göç etmesi, çoğalması, veya farklılaşması için doku mühendisliğinde kullanılan matris, hücre davranışlarının anlaşılmasında kritik rol oynamaktadır (9, 13, 14). Söz konusu matrislerin yapısı, elektroğirme adı verilen bir teknoloji ile modifiye edilebildiği gibi hücrelerin doku mühendisliğinde hedef alınan dokuya yönelik hücre davranışlarını da etkileyebilmektedir (9). Elektroğirme teknolojisi ile doku iskelesinin oluşturulması, hücresel davranışların ifade edilmesi veya yönlendirilmesi, doku rejenerasyon kapasitesinin incelenmesi ve in vitro ortamda modellenebilen hastalıkların tedavilerine yönelik metodolojilerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Elektroğirmenin erişilebilirliği ve çok yönlülüğü, birçok sentetik veya doğal malzemeden yüksek yüzey/hacim oranına, gözenekliliğe ve mekanik özelliklere sahip çeşitli fonksiyonel nanolifli yapıların üretilmesine olanak sağlamaktadır (7, 9). Bu nedenle, nano seviyede yapıların üretimine aracılık edebilen elektroğirme, birçok bilim insanı tarafından ilgi görmektedir (9). Normal fiber yapılarına göre daha küçük gözeneklere ve daha yüksek yüzey alanına sahip olan elektroğirme yöntemiyle elde edilen fiberler, nanokataliz, doku mühendisliği iskeleleri, koruyucu giysiler, filtreleme, kimyasal sensörler, biyomedikal, farmasötik, optik elektronik, sağlık, biyoteknoloji, savunma, çevre mühendisliği ve güvenlik gibi çeşitli alanlarda başarıyla uygulanmaktadır (12, 15). Akademik yanında endüstride ve polimer kimyası, malzeme bilimi, biyomedikal mühendisliği ve birçok interdisipliner alanda da elektroğirme teknolojisi kullanılabilir (11). Örneğin, malzemelerin biyoyumluluğunun artırılması için ECM 'den türetilen hidrojellerin elektroğirme teknolojisi ile fiber üretimleri biyomedikal uygulamalarda geniş bir yer tutmaktadır (16).

### **2.2 Elektroğirme Yönteminin Temel Prensipleri**

Basitçe elektroğirme yöntemi, güçlü bir elektrik alanına dayanan polimer bazlı bir sıvıdan sürekli mikro/nanofiberlerin oluşumunu ifade etmektedir (Şekil 1.) (9, 17). Elektroğirme teknolojisi ile üretilen nanofiberler son derece yüksek

yüze-y-hacim oranı, ayarlanabilir, gözeneklilik, çok çeşitli boyut ve şekillere uyum sağlayabilme ve özelliklerinden istenen sonuçları elde etmek için nanolif bileşimini kontrol etme yeteneği gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır (12, 15). Son derece ince fiberlerin üretimi sağlanmakla beraber elektroğirme yöntemi bir çok alanda da işlevsel olarak kullanılmaktadır. Yüklü bir polimer çözeltisi üzerindeki yüzey gerilimini yenmek için, önemli bir itici elektrik kuvveti sağlayacak onlarca voltajı gerekmektedir (9, 11).



Şekil 1. Elektroğirmenin temel elemanları (17).

Elektroğirme mekanik olarak üç ana bileşeni bulunmaktadır: şırınga pompası, topraklanmış toplayıcı ve yüksek voltajlı güç kaynağıdır (7, 8, 11). Elektroğirmede şırınga pompası, kullanılan solüsyona, bir iğne aracılığıyla kontrollü bir akış hızına zorlamak için kullanılır (7). Elektroğirmede kullanılan solüsyon, yüzey geriliminin bir sonucu olarak asılı bir damlacık oluşturmak üzere şırınga pompası tarafından baskı vasıtasıyla elektriksel alana tabi tutulur. Elektroğirmede kullanılan solüsyona yüksek voltaj uygulandığında solüsyona bir yük indüklenir (18). Söz konusu yükler arasında itici bir etkileşim olmaktadır (7). Solüsyondaki elektriksel kuvvetler yüzey gerilimi ile dengelendiğinde Taylor konisi oluşur (8, 11, 18). Elektriksel kuvvetler kullanılan solüsyonun yüzey geriliminden büyük olduğunda yüklü bir fiber jet Taylor konisinden fırlatılır ve topraklanmış bir toplayıcıya doğru hızlanır (7). Böylece toplayıcıda biriken

fiberler, özellikle doku mühendisliği uygulamaları için hücrelerin tutunma ve yaşaması için bir alan oluşturur.

### **2.3 Elektroğirme Yönteminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar**

Elektroğirme yönteminde kullanılan parametreler oldukça önemlidir çünkü bu yöntemle elde edilen nanofiberlerin yapıları doku mühendisliğinde kullanılacak hücresel davranışları da belirlemektedir (7). Elektroğirmede kullanılacak solüsyonun parametreleri arasında viskozite, iletkenlik, moleküler ağırlık ve yüzey gerilimi yer alır (12). Ayrıca uygulanan elektrik alan, şırınga ucundan toplayıcıya kadar olan mesafe, uygulama süresi ve kullanılan solüsyonun akış hızı da elektroğirmede kritik öneme sahip başka parametrelerdir (7, 12, 18). Bu parametrelerin her biri, elektroğirme sonucunda elde edilen fiberlerin morfolojisini de önemli ölçüde etkilemektedir ve bu parametrelerin uygun şekilde kullanılmasıyla istenilen morfoloji ve çaplarda nano lifler elde edilebilmektedir (10). Ek olarak, kullanılan fiberlerin üzerlerinde biriktiği toplayıcı türü de elde edilecek nanofiberlerin morfolojilerini değiştirecektir. Örneğin, dönen bir toplayıcı kullanılırsa daha hızlı nanofiberler elde edilirken, sabit bir toplayıcı kullanıldığında rastgele bir nanofiber yerleşimi gözlemlemek mümkün olacaktır (19). Rastgele dağılan nanofiberlere göre hızlı nanofiberlerin daha iyi mekanik dayanıklılığa sahip olduğu gözlemlenmiştir (19-21). Elbette bu parametreler, doku mühendisliği kapsamında hedeflenen hücre ve doku tipine ve doku mekanik özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir (21). Bu oryantasyonlar, hücrelerin yüzeye yapışması, çoğalması ve farklılaşması için önemlilik arz etmektedir (22).

Elektroğirme teknolojisinde kullanılan solüsyonlar, genellikle organik solüsyonlar olsa da inorganik solüsyonlar da kullanılabilir (8, 12). Elektroğirme ile elde edilen fiberlerin yapısı, morfolojisi kullanılan solüsyonun cinsine, moleküler ağırlığına, solüsyonun viskozitesine, solüsyon hazırlanırken kullanılan çözücünün cinsine, miktarına, işlem parametrelerine ve ortam koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (8, 23, 24). Hatta kullanılan solüsyondaki iyonların varlığı, yokluğu da solüsyonun iletkenliğini değiştireceğinden fiber oluşum kapasitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir (8). Ayrıca yüksek veya düşük nem de fiber üretimini önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Elektroğirme tekniğinde oluşan nem, su moleküllerine bağlı olarak, üretilen fiberler ile toplayıcı arasında güçlü ya da zayıf bağ kurulumuna neden olabilmektedir.

Elektroğirme teknolojisinde kullanılan solüsyonlar doğal polimerlerden oluşabildiği gibi sentetik polimerlerden de oluşabilmektedir. Doğal polimerler, bitkisel veya hayvansal kaynaklı olurken mikroorganizmalardan da elde edilebilirler (10). Doğal malzemelerden, farklı biyomedikal uygulamalar,

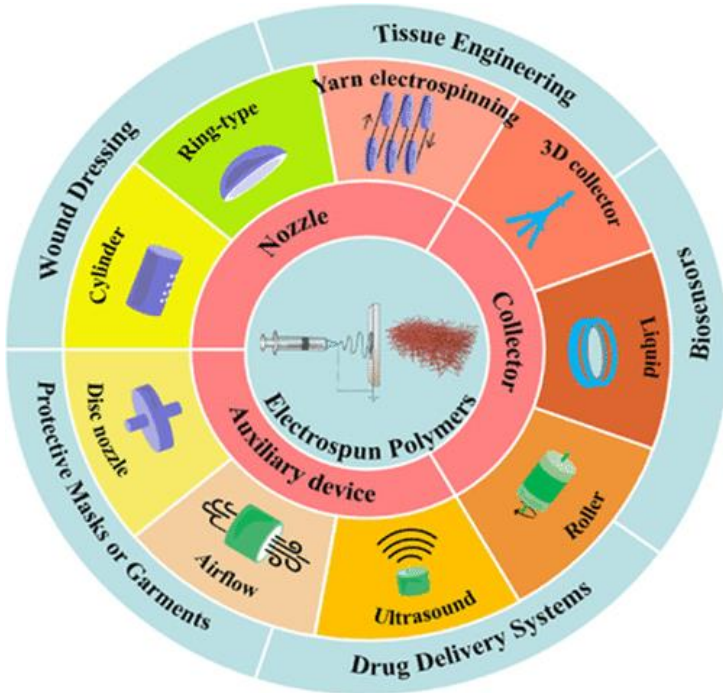
filtrasyon ve gıda ambalajı için uygun elektroğirilmiş nanofiberler geliştirilebilmektedir (25). Doğal polimerlerin seçilmesindeki temel amaç, ECM 'i doğal olarak taklit ederek en yüksek düzeyde biyouyumluluk elde etmektir. Genellikle kullanılan doğal polimerler; kitosan, alginat, and selüloz, kollajen ve jelatin olabilmektedir. Ancak doğal polimerlerin düşük stabilitesi sebebiyle doku mühendisliğinde kullanımı sınırlanmaktadır (25, 26). Bu sebeple sentetik polimerlerle karıştırılarak kullanımları, stabilitenin korunmasını sağladığı gibi daha iyi mekanik dayanım özelliklerine sahip oldukları da gözlemlenmiştir (25). Sentetik polimerler, doğada hazır halde bulunmayan, doğal polimerlere göre daha yüksek biyouyumluluğa ve daha iyi biyobozunurluğa sahip yapılardır (26). Başarılı şekilde elektroğirme yapılabilen bazı sentetik polimerler şunlardır: polistiren (PS), poli(vinil klorür), poli(laktik asit) (PLA), polikaprolakton (PCL), poli(laktik-ko-glikolik asit) (PLGA) (25, 27). Hem doğal hem de sentetik polimerlerin bir arada elektroğirme teknolojisinde kullanıldığı solüsyonlar da gün geçtikçe doku mühendisliği alanına önemli katkılar sağlamaya devam etmektedir. Örneğin; Liu ve ark. periodontal hastalıkların tedavisi için periodontal doku rejenerasyonunun sağlanmasını hedeflemiştir (28). Bu hedef doğrultusunda, magnezyum oksit nanoparçacıklarını elektroğirme teknolojisi kullanarak elde ettiği poly(L-lactic acid) (PLA)/jelatin nanofiberlerine dahil ederek geliştirdiği nanofiberlerin daha iyi mekanik destek sağladığını ve daha düşük bozunma yeteneğiyle periodontal dokunun rejenerasyon kapasitesini arttırdığını göstermiştir.

Önemli konulardan biri de elektroğirme tekniğinde kullanılan çözeltilerdeki çözücü maddenin etkinliği olabilmektedir (8). Çözücünün elektroğirme sürecini iyi bir şekilde yürütülmesini sağladıktan sonra uzaklaştırılması kolay olmalıdır. Aksi halde işlenen süreç sonunda fiberler arasında kalmasına sebebiyet verebilecektir. Bu durum, oluşturulan doku iskelesinin hücreler üzerindeki davranışlarını da değiştirebilmektedir. Hatta kullanılan çözücünün solüsyondan iyi uzaklaştırılmaması, hücre sitotoksitesine sebebiyet verebilecektir. Bu nedenle elektroğirme teknolojilerinde doku mühendisliği kapsamında kullanılacak malzemeler için biyouyumlu malzemelerin tercih edilmesi gerekmektedir (29).

### **3. Doku Mühendisliğinde Elektroğirme Teknolojisi Uygulamaları**

Elektroğirme teknolojisi kullanılarak üretilen fiberler ile oluşturulan doku iskeleleri, hücrelerin yapışma ve göç gibi davranışlarının tetiklenmesini sağlayabilmektedir (16). Elektroğirme teknolojisi ile üretilen fiberler, yenilikçi yaklaşımla pek çok doku tipine uyum gösterebilmektedir (8, 29). Örneğin, üretilen nanofiberler yüksek yüzey alanı oluşturduğu için hücrelerin daha fazla doku iskelesine tutunumunu sağlayabilmektedir (29). Yapısal olarak iyi organize

olabilen ve çok porlu yapıya sahip fiberler, hücrelerin yüzeye tutunması, yayılması ve üremesi için fırsat oluşturabilmektedir (24, 29).



Şekil 2. Doku mühendisliğinde elektroğirme teknolojisi ile üretilen nanofiberlerin kullanım alanları (29).

Doku mühendisliğinin kapsamında elektroğirme teknolojisi kullanılarak üretilen nanofiberler genel olarak; yara örtülerinin geliştirilmesi, koruyucu maske ve giysilerin üretilmesi, kontrollü ilaç salınımının yapılması, biyosensörler (biyoalgılayıcılar) ile biyobelirteçlerin tespit edilmesi ve doku yenilenmesinin sağlanabilmesi amacıyla kullanılmaktadır (29, 30).

### 3.1 Yara Örtüleri

Porlu fiberler, doğal ECM 'i taklit edebilmektedir bu durum hücrelerin tutunması ve yayılımı için alan oluşturmaktadır (30). Oluşturulan doku iskelesi üzerindeki porlar, homeostaziye sağladığı gibi bir yara alanı üzerinde bakteriyel geçişi de seçebilmektedir (30). Örneğin; Zou ve ark. gerçekleştirdikleri bir çalışmada, yara pansumanı amacıyla aspirin yüklü PLA nanofiberlerinin elastikiyetini ve hidrofiliğini geliştirmek için PLA/Poli(1,8-oktandiol-ko-sitrik asit) (POC) karışımını kullanmışlardır (31). POC 'nin varlığı, yara pansuman uygulamalarında önemli özellikler olan elastikliği, hidrofiliği, biyolojik olarak

parçalanabilirliği ve nano lifli membranın gerilme deformasyonunu önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir. Zhang vd., doku yenilenmesini teşvik etmek için etkili antibakteriyel kapasiteye sahip gümüş (I) metal-organik çerçeveler-PLA nanofiberlerine dayanan, antibiyotik içermeyen bir yara örtüsü geliştirmiştir (29, 31). Zhu ve ark. ise nanofiber membranları elektroğirme yöntemiyle hazırlayarak sıçan yanık modelinde yara örtüsü olarak kullanmıştır (32). Bu yara örtüsünün yanık yarasının iyileşmesini arttırdığını tespit etmiştir. Başka bir çalışma, gentamisin yüklü polivinil alkol ve jelatin (PVA/JEL) nanofiberleri üretmiş ve bu nanofiberlerin gentamisin miktarına bağlı olarak farklı antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirtmiştir (33). Bir diğer çalışma ise, 3 Boyutlu PCL/Kollagen (PC) nanofiber yapılarını kullanarak yüksek su ve şişme kapasitesine sahip yara örtüsü üretmiştir (34). Bu çalışmada, anlamlı ölçüde antibakteriyel özellik gösteren ve biyouyumlu olan nanofiberlerin diyabetik yaralara karşı kullanılabileceği kaydedilmiştir. Bayat vd., ise kitosan nanofiberler üzerinde yürütülmüştür (35). Bu çalışmada, ananastan elde edilen bromelain molekülü, yanık yaralarının tedavisi amacıyla kullanılmıştır. %2 oranın da bromelanin içeren kitosan nanofiberlerinin daha hızlı yara iyileşmesi sağladığı tespit edilmiştir.

Tüm bu çalışmalar ışığında şu sonuç çıkarılmaktadır ki; elektroğirme teknolojisi ile üretilen nanofiberlerin, yara örtüsü olarak kullanım alanı oldukça geniştir. Üretilen malzemeler hem antibakteriyel özellik gösterirken hem de yaradan etkilenen dokudaki hücrelerin adhezyonu ve proliferasyonu artmaktadır. Gelişen teknolojiler sayesinde, elektroğirme teknolojisi ile üretilen yara örtülerinin yara alanlarını daha iyi koruduğunu ve yara açığını daha hızlı kapattığını göstermektedir. Bu da doku mühendisliği kapsamında geliştirilen yara örtülerinin üretilmesinde nanofiberlerin önemli ölçüde katkı sağladığını göstermektedir.

### **3.2 Koruyucu Maske Ve Giysiler**

Elektroğirme teknolojisi ile elde edilen nanofiberlerin mükemmel filtreleme etkinliği, düşük moleküler ağırlığı ve nano ölçekli gözenekliliği gibi avantajları, maske ve giysi olarak kullanımında cazip hale gelmiştir (36). Özellikle COVID-19 pandemisi zamanında elektroğirme teknolojisinin ürünü olan nanofiber maskelere ilgi artmıştır. Örneğin; Xu vd., COVID-19 pandemi süreci için üstün filtreleme yeteneklerine ve ışınımsal ısı dağıtma etkilerine sahip olan, polietilen (PE) dokunmamış kumaşlar üzerine Naylon-6 (PA) nano elyafların elektroğirilmesi yoluyla özel bir tür yüz maskesi tasarlamıştır (29, 36). Lu ve ark. pandemik durumların taleplerini daha verimli bir şekilde karşılayan maskeler oluşturmak için elektroğirme yöntemiyle maliyeti daha az maskeler tasarlamıştır

(29, 37). Ayrıca Lu vd. nin ürettiği maskeler, ticari olarak satılan maskelerden daha iyi bakteri filtrasyonu sağlamıştır (37).

Pandemiden bağımsız olarak doku mühendisliği kapsamında üretilen nanofiber maskeler ve giysiler de günümüzde dikkat çeken bir sektör haline gelmiştir. Örneğin; Gan vd., 'nin gerçekleştirmiş olduğu bir çalışmada çoklu karbon nanotüpler ve gümüş nanoparçacıklarla kaplanmış PLA nanofiber kullanılarak iletken ve antibakteriyel nanofiber yapılar hazırlanmıştır (38). Bu hazırlanan yapı iletkenliği ile ön planda olurken güçlü mekanik özelliklere de sahip hale gelmiştir. Bu da nanofiber yapının parmak, dirsek, diz ve alın gibi farklı vücut dokularının insan hareketlerini hassas bir şekilde tespit etmek için de kullanılabilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, elektroğirme teknolojisi ile üretilen bu nanofiber yapı, gerçek hayatta insan faaliyetlerini izlemek için giyilebilir iletken kumaş olarak büyük umut vaat etmektedir.

Hem pandemi de hem de pandemiden bağımsız olarak, elektroğirme ile üretilen nanofiber yapılar, insan sağlığının korunması, daha konforlu hale gelmesi ve hatta hastalıkların tedavi edilmesi amacıyla dikkat çekmektedir. Bu sebeple nanofiberlerle üretilen maskelerin ve giysilerin günümüz teknolojisiyle uyarlanması popüler hale gelmektedir.

### **3.3 İlaç Salınımı Sistemleri**

İlaçların çözünürlüğünün ayarlanması, biyoyararlanımının artırılması, dağıtım hızının ve yerinin kontrol edilmesi, hastalıkların tedavisi açısından oldukça önemlidir (39). Elektroğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler kontrollü ilaç salınım çalışmalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır (40). Taepaiboonet ark. steroid olmayan molekülleri PVA çözeltisinde birleştirerek nanofiber oluşturup 24 saatte yüksek ilaç kapsülleme (%81–98) ve çeşitli salım yüzdeleri elde etmiştir (29, 41). Sonuç olarak ilaç yüklü PVA nanofibresinin, ilaç yüklü nanofiber olmayan yapılara göre çok daha iyi salım özellikleri gösterdiklerini belirtmişlerdir. Bir diğer çalışmada Verreck et vd., topikal ilaç dağıtımı için hidrofobik poliüretan nanofiberleriyle birleştirilen suda çözünebilir ilaçların kullanımını araştırmıştır ve elektroğirme yönteminin yara iyileşmesi, suda çözünürlüğü zayıf ilaçlar için kontrollü ilaç dağıtım görevi üstlenebilecek yenilikçi bir teknik olduğunu göstermiştir (29, 42). Zhang vd., ise rosiglitazone/poly(3-hydroxybutyric acid-co-3-hydroxyvaleric acid) (RSG/PHBV) membranlarını elektroğirme yöntemiyle üretmiştir (43). Bu membran, fareler üzerinde skar doku oluşturmadan rosiglitazone ilacının salınımını sağlayarak glokoma sahip farelerin daha etkili ve güvenli iyileşmesine katkı sağlamıştır. Bir başka çalışma ise Wu vd., tarafından yürütülmüş olup, bu çalışmada nanoparçacık yüklü PVP nanofiberler üretilmiştir (44). İn vitro çalışmalarda bu ilaçlı nanofiberler, çözünme ortamıyla temas halindeyken

içerdiği ilacı hızlı bir şekilde ve tek seferde serbest bırakabildiğini göstermiştir. Araştırmacılar, bu yapıların ticari olarak temin edilebilen dağılıbilir tabletlere göre çok daha hızlı olduğunu kaydetmiştir. Bir diğer çalışmada ise, kornea dokusu için epigallocatechin gallate (EGCG) yüklü ipek nanofiberler üretilmiştir (45). Bu çalışmadaki amaç kornea dokusuna anti-vasküler özellik kazandırmaktır. Geliştirilen bu doku iskelesiyle 144 saatin üzerinden kontrollü ilaç salınımı sağlanmıştır.

Elektroegirme teknolojisinin kullanım alanı, ilaç salınım sistemlerinde de oldukça yaygın bir yer tutmaktadır çünkü geliştirilen fiberlerin oluşturdukları porlu yapılar arasından ilacın kontrollü şekilde salınımı sağlanabilmektedir.

### 3.4 Biyosensörler

Biyobelirteçlerin tespiti biyoalgılayıcılar/biyosensörler ile yapılabilmektedir. Elektroegirme teknolojisi ile üretilen nanolifler, yüksek hassasiyete, seçiciliğe, stabiliteye ve yeniden üretilebilirliğe sahiptir. Bu durum, biyobelirteçlerin tespiti için onları daha kullanışlı hale getirmektedir (46). Örneğin, piezoelektrik biyosensörler genellikle kalp hızının, nabzın ve uzuv hareketlerinin normal olup olmadığını test etmek için kullanılmaktadır (46). Li vd., kalp atış hızını izlemek için oldukça hassas bir basınç sensörü geliştirmiştir. Bu sensor, kompozit nanofiberlerin her iki tarafına tutturulmuş Cu-Ni kaplamalı ince örgü polyester kumaştan oluşmakta ve akıllı cihazlar kullanılarak gözlemlenebilen nabız ve kalp atış hızı değişikliklerini izleyebilmektedir (46, 47).

Elektrokimyasal biyosensörler ile çeşitli biyomoleküller (enzimler, DNA, mikroorganizmalar, antikorlar vb.) ve elektrokimyasal dönüştürücüler (amperometrik, potansiyometrik, kapasitif ve kondüktometrik) algılanabilmektedir (46). Bu sistemin temel prensibi, hassas bileşenler üzerindeki biyolojik materyaller ile ölçülebilen nesnelereki biyolojik bilgiler arasındaki kimyasal reaksiyonlar yoluyla kimyasal sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştürmektir. Örneğin, Kim vd., glikoz konsantrasyonlarını izleyebilen nanofiber geliştirmiştir (46, 48). Bu nanofiberler, düşük algılama sınırına ve yüksek hassasiyete sahiptir.

Xia vd., nin gerçekleştirmiş olduğu bir çalışmada ise, metaloksitler kullanılarak nitrojen katkılı nanofiberler üretilmiştir (49). Üretilen bu nanofiberler, glikozu, hidrojen peroksiti ( $H_2O_2$ ) ve glutasyonu nano ölçekte ölçebilmektedir. Baek vd., tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise grafen oksit nanofiberlerle altın nanoparçacıkları ve bakır nano yapıları kullanmışlardır (50). Poly(vinyl alcohol) (PVA) ile grafen oksitlerin karıştırılmasıyla elektroegirme teknolojisini kullanan bu çalışmada, bakır nanofiberlere immobilize edilen enzimler sayesinde glikozu ölçen sensörün, altın



nanoparçacıklar kullanılarak iletkenliği, hassasiyeti, ısıl direnci, mekanik ve elektriksel özellikleri ayarlanmıştır.

### **3.5 Doku Yenilenmesi**

Doku mühendisliğinin ana hedeflerinden biri de doku yenilenmesinin sağlanması ve doku yenilemede harekete geçecek hücrelerin bu doğrultuda uyarılmasıdır. Elektroğirme yöntemiyle elde edilen nanofiberlerin, hücrelerin proliferasyonunu sağladığı ve hatta farklılaşma kapasitesine sahip hücrelerin farklılaşmalarını tetiklediği daha önceki yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (7, 29). Bu hususta, üretilen nanofiberlerin biyouyumlu ve biyobozunur olması hedef doku için oldukça avantajlıdır (7). Pant vd., biyomimetik olarak taklit edilmiş vücut sıvısı testlerinde kemik oluşumu potansiyelini gösteren, elektroğirme yoluyla poliamid-6/kalsiyumlaktataminalize yapı iskelesi sentezlemiştir (29, 51). Sonuç olarak, bu yapının kemik biyouyumluluğunu arttırdığını ifade etmiştir.

Xi vd., sinir rejenerasyonuna yardımcı olmak için pH 'a duyarlı immünomodülatör elektroğirme yöntemiyle elde edilmiş nanofiberlerle iskele inşa ettirmiştir (52). Bu nanofiberler, lokal asidik mikroçevreye doğrudan tepki verebilir, inflamatuvar sitokinlerin salınımını engelleyebilir ve mezenkimal kök hücrelerin sinirsel farklılaşmasını destekleyebilir niteliktedir. Böylece akut omurilik hasarının tedavisi için bir alternatif sağlayabileceği öngörülmüştür. Bir başka çalışmada Wang vd., 'nin gerçekleştirdiği bir başka çalışma ise nanofiberleri jelatin, polilizin ve heparin nanopartikülleri ile kaplamıştır (53). Bu kaplama, vasküler ECM tarafından dinamik olarak salgılanan matris metaloproteinaz-2 'ye, uzun süreli adhezyon ve antitrombotik faktörlerin salınmasına yanıt olarak bölünebilmektedir. Ayrıca vasküler endotelizasyonu ve uzun süreli antikoagülasyonu başarılı bir şekilde indükleyebilmektedir. Kim vd., ise %94 gözenekliliğe sahip bir 3 Boyutlu nanofiber fibroin iskelesi geliştirmiştir, bu doku iskelesinin 2 boyutlu yapılarla karşılaştırdığında kemik yenilenmesi için daha iyi hücre yapışması ve çoğalması gösterdiğini bildirmiştir (29, 54). Bir başka çalışmada ise, hidrofilik yapıdaki hidroksiapatit (HA) ile bir biyopolimer olan poli(laktik asit) (PLA) süspanse edilmiş ve bu yapı elektroğirme solüsyonu olarak kullanılmıştır. Bu sayede düzenli ve tekdüze fiber yapılar oluşturulmuştur (55). Bu fiberlerin, kemik doku mühendisliğinde kemik yapımında görev alan hücrelerin çoğalmasını desteklediği ve kemik doku rejenerasyonu açısından oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

## **4. SONUÇ**

Zamanla artan hastalıklarla doku mühendisliğine olan ihtiyaç da artmaktadır. Gelecekte doku mühendisliği kapsamında geliştirilen yapay dokularla, hasarlı ya

da yaralanmış dokuların tedavisinin daha hızlı ve kolay yapılması sağanabilecektir. Donör yetersizliği ya da immün riskin azaltılması da yine doku mühendisliği ile giderilebilecektir. Benzer şekilde yapay dokuların laboratuvarında modellenmesi ile hasarlı dokuların tedavisine yönelik ilaç tasarımları, tedavi yöntemleri ve tedavide aracı ürünlerin üretimi mümkün kılınabilecektir. Bu kapsamda, elektroğirme yöntemiyle elde edilen nanofiberlerin basit bir sistemle üretilmesi ve kontrol edilebilirliğinin olması, doku mühendisliği ürünlerinin geliştirilmesi açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Bu durum, elektroğirme yönteminin bir çok farklı alanda kullanımını da arttırmaktadır. Doku mühendisliğinde hedeflenen; sağlıklı olmayan dokuların in vitro olarak modellenmesi, bu dokulara tedavi yollarının geliştirilmesi ve doku onarımının hızlı yapılmasında elektroğirme teknolojisi de önemli katkı sunmaya devam etmektedir. Hastalıkların tanısına, teşhisine ve tedavisine yönelik bir çok doku mühendisliği çalışması bulunmaktadır. Gelişen teknoloji ile üretilen ürün sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Yara örtüleri, koruyucu maske ve giysiler, ilaç salınım sistemleri, biyosensörler ve doku yenilenmesi kapsamında da birçok ürünü elektroğirme yöntemi günümüze kazandırmıştır. Bu ürünler ışığında, elektroğirme teknolojisi ile insan sağlığına önemli ölçüde katkıda bulunduğu kaydedilmekle beraber gelecekte çığır açıcı ürünlerin gelişmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Langer R, Vacanti JP. Tissue engineering. Science (New York, NY). 1993;260(5110):920-6.
2. Langer R, Vacanti J. Advances in tissue engineering. Journal of pediatric surgery. 2016;51(1):8-12.
3. Berthiaume F, Maguire TJ, Yarmush ML. Tissue Engineering and Regenerative Medicine: History, Progress, and Challenges. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2011;2(1):403-30.
4. Yaralı Çevik ZB, Karaman O, Topaloğlu N. Photobiomodulation therapy at red and near-infrared wavelengths for osteogenic differentiation in the scaffold-free microtissues. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2023;238:112615.
5. Ikada Y. Challenges in tissue engineering. Journal of the Royal Society Interface. 2006;3(10):589-601.
6. Chapekar MS. Tissue engineering: challenges and opportunities. Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials. 2000;53(6):617-20.
7. Zulkifli MZA, Nordin D, Shaari N, Kamarudin SK. Overview of Electrospinning for Tissue Engineering Applications. Polymers. 2023;15(11).
8. Xue J, Wu T, Dai Y, Xia Y. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. Chemical reviews. 2019;119(8):5298-415.
9. Xing J, Zhang M, Liu X, Wang C, Xu N, Xing D. Multi-material electrospinning: from methods to biomedical applications. Materials today Bio. 2023;21:100710.
10. Ahmadi Bonakdar M, Rodrigue D. Electrospinning: Processes, Structures, and Materials. Macromol. 2024;4(1):58-103.
11. Luo CJ, Stoyanov SD, Stride E, Pelan E, Edirisinghe M. Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence. Chemical Society Reviews. 2012;41(13):4708-35.
12. Bhardwaj N, Kundu SC. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. Biotechnology Advances. 2010;28(3):325-47.
13. Yaralı Çevik ZB, Karaman O, Topaloğlu N. Synergistic effects of integrin binding peptide (RGD) and photobiomodulation therapies on bone-like microtissues to enhance osteogenic differentiation. Biomaterials Advances. 2023;149:213392.

14. Yarali ÇEVİK ZB, KÖKEN B, KARAMAN O. The promoter effect of laminin-derived IKVAV peptide on three dimensional HUVEC microtissue. *International Advanced Researches and Engineering Journal*. 2023;7(2):97-102.
15. Liang D, Hsiao BS, Chu B. Functional electrospun nanofibrous scaffolds for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2007;59(14):1392-412.
16. Noro J, Vilaça-Faria H, Reis RL, Pirraco RP. Extracellular matrix-derived materials for tissue engineering and regenerative medicine: A journey from isolation to characterization and application. *Bioactive materials*. 2024;34:494-519.
17. Duygulu NE. Elektro Eğirme Yöntemiyle Nano Boyutlu TiO<sub>2</sub> Parçacık katkılı PLA Nano Fiber Üretimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2020;10(1):7-18.
18. Isaac B, Taylor RM, Reifsnider K. Mechanical and Dielectric Properties of Aligned Electrospun Fibers. *Fibers*. 2021;9(1):4.
19. Guo Z, Xu J, Ding S, Li H, Zhou C, Li L. In vitro evaluation of random and aligned polycaprolactone/gelatin fibers via electrospinning for bone tissue engineering. *Journal of biomaterials science Polymer edition*. 2015;26(15):989-1001.
20. Kijeńska-Gawrońska E, Maliszewski A, Bil M. Evaluation of the Shape Memory Effect of Random and Aligned Electrospun Polyurethane Mats with Different Fibers Diameter. *Polymers*. 2022;14(24).
21. Taufalele PV, VanderBurgh JA, Muñoz A, Zanolli MR, Reinhart-King CA. Fiber alignment drives changes in architectural and mechanical features in collagen matrices. *PLOS ONE*. 2019;14(5):e0216537.
22. Ma J, He X, Jabbari E. Osteogenic Differentiation of Marrow Stromal Cells on Random and Aligned Electrospun Poly(l-lactide) Nanofibers. *Annals of Biomedical Engineering*. 2011;39(1):14-25.
23. Xue J, Xie J, Liu W, Xia Y. Electrospun nanofibers: new concepts, materials, and applications. *Accounts of chemical research*. 2017;50(8):1976-87.
24. Subash A, Naebe M, Wang X, Kandasubramanian B. Fabrication of biodegradable fibrous systems employing electrospinning technology for effluent treatment. *Environmental Science: Advances*. 2023;2(3):368-96.
25. Gautam S, Singh H, Mishra NC. Natural polymer based electrospun systems for wound management. *Natural Polymers in Wound Healing and Repair: Elsevier*; 2022. p. 167-86.

26. Kalluri L, Duan Y, Janorkar AV. Electrospun polymeric nanofibers for dental applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2024;141(15):e55224.
27. Al-Dhahebi AM, Ling J, Krishnan SG, Yousefzadeh M, Elumalai NK, Saheed MSM, et al. Electrospinning research and products: The road and the way forward. *Applied Physics Reviews*. 2022;9(1).
28. Liu X, He X, Jin D, Wu S, Wang H, Yin M, et al. A biodegradable multifunctional nanofibrous membrane for periodontal tissue regeneration. *Acta biomaterialia*. 2020;108:207-22.
29. Borah AR, Hazarika P, Duarah R, Goswami R, Hazarika S. Biodegradable Electrospun Membranes for Sustainable Industrial Applications. *ACS Omega*. 2024.
30. Maleki H, Azimi B, Ismaeilimoghadam S, Danti S. Poly(lactic acid)-Based Electrospun Fibrous Structures for Biomedical Applications. *Applied Sciences*. 2022;12(6):3192.
31. Zou F, Sun X, Wang X. Elastic, hydrophilic and biodegradable poly (1, 8-octanediol-co-citric acid)/polylactic acid nanofibrous membranes for potential wound dressing applications. *Polymer Degradation and Stability*. 2019;166:163-73.
32. Ju HW, Lee OJ, Lee JM, Moon BM, Park HJ, Park YR, et al. Wound healing effect of electrospun silk fibroin nanomatrix in burn-model. *International journal of biological macromolecules*. 2016;85:29-39.
33. CESUR S. GENTAMİSİN YÜKLÜ POLİ (VİNİL ALKOL)/JELATİN NANOFİBERLERİN ELEKTROĞİRME YÖNTEMİYLE YARA ÖRTÜSÜ MALZEMESİ OLARAK ÜRETİLMESİ. *Konya Journal of Engineering Sciences*. 2022;10(4):878-88.
34. Chang T, Yin H, Yu X, Wang L, Fan L, Xin JH, et al. 3D PCL/collagen nanofibrous medical dressing for one-time treatment of diabetic foot ulcers. *Colloids and surfaces B, Biointerfaces*. 2022;214:112480.
35. Bayat S, Amiri N, Pishavar E, Kalalinia F, Movaffagh J, Hashemi M. Bromelain-loaded chitosan nanofibers prepared by electrospinning method for burn wound healing in animal models. *Life sciences*. 2019;229:57-66.
36. Xu Y, Zhang X, Hao X, Teng D, Zhao T, Zeng Y. Micro/nanofibrous nonwovens with high filtration performance and radiative heat dissipation property for personal protective face mask. *Chemical Engineering Journal*. 2021;423:130175.
37. Lu W-C, Chen C-Y, Cho C-J, Venkatesan M, Chiang W-H, Yu Y-Y, et al. Antibacterial Activity and Protection Efficiency of Polyvinyl Butyral

- Nanofibrous Membrane Containing Thymol Prepared through Vertical Electrospinning. *Polymers*. 2021;13(7):1122.
38. Gan L, Geng A, Wu Y, Wang L, Fang X, Xu L, et al. Antibacterial, Flexible, and Conductive Membrane Based on MWCNTs/Ag Coated Electro-Spun PLA Nanofibrous Scaffolds as Wearable Fabric for Body Motion Sensing. *Polymers*. 2020;12(1):120.
  39. Torres-Martinez EJ, Cornejo Bravo JM, Serrano Medina A, Pérez González GL, Villarreal Gómez LJ. A Summary of Electrospun Nanofibers as Drug Delivery System: Drugs Loaded and Biopolymers Used as Matrices. *Current drug delivery*. 2018;15(10):1360-74.
  40. Mei L, Wang Y, Tong A, Guo G. Facile electrospinning of an efficient drug delivery system. *Expert Opinion on Drug Delivery*. 2016;13(5):741-53.
  41. Taepaiboon P, Rungsardthong U, Supaphol P. Drug-loaded electrospun mats of poly(vinyl alcohol) fibres and their release characteristics of four model drugs. *Nanotechnology*. 2006;17(9):2317.
  42. Verreck G, Chun I, Rosenblatt J, Peeters J, Van Dijck A, Mensch J, et al. Incorporation of drugs in an amorphous state into electrospun nanofibers composed of a water-insoluble, nonbiodegradable polymer. *Journal of controlled release*. 2003;92(3):349-60.
  43. Zhang F, Liu K, Pan Z, Cao M, Zhou D, Liu H, et al. Effects of rosiglitazone/PHBV drug delivery system on postoperative fibrosis in rabbit glaucoma filtration surgery model. *Drug Delivery*. 2019;26(1):812-9.
  44. Wu YH, Yu DG, Li HC, Feng DN. Electrospun nanofibers for fast dissolution of naproxen prepared using a coaxial process with ethanol as a shell fluid. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;662:29-32.
  45. Forouzideh N, Nadri S, Fattahi A, Abdolahinia ED, Habibizadeh M, Rostamizadeh K, et al. Epigallocatechin gallate loaded electrospun silk fibroin scaffold with anti-angiogenic properties for corneal tissue engineering. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2020;56:101498.
  46. Ji G, Chen Z, Li H, Awuye DE, Guan M, Zhu Y. Electrospinning-Based Biosensors for Health Monitoring. *Biosensors*. 2022;12(10).
  47. Li X, Chen S, Zhang X, Li J, Liu H, Han N, et al. Poly-l-lactic acid/graphene electrospun composite nanofibers for wearable sensors. *Energy Technology*. 2020;8(5):1901252.

48. Kim GJ, Kim KO. Novel glucose-responsive of the transparent nanofiber hydrogel patches as a wearable biosensor via electrospinning. *Scientific reports*. 2020;10(1):18858.
49. Xia Y, Shi F, Liu R, Zhu H, Liu K, Ren C, et al. In Situ Electrospinning MOF-Derived Highly Dispersed  $\alpha$ -Cobalt Confined in Nitrogen-Doped Carbon Nanofibers Nanozyme for Biomolecule Monitoring. *Analytical Chemistry*. 2024;96(3):1345-53.
50. Baek SH, Roh J, Park CY, Kim MW, Shi R, Kailasa SK, et al. Cu-nanoflower decorated gold nanoparticles-graphene oxide nanofiber as electrochemical biosensor for glucose detection. *Materials Science and Engineering: C*. 2020;107:110273.
51. Pant HR, Risal P, Park CH, Tijing LD, Jeong YJ, Kim CS. Synthesis, characterization, and mineralization of polyamide-6/calcium lactate composite nanofibers for bone tissue engineering. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013;102:152-7.
52. Xi K, Gu Y, Tang J, Chen H, Xu Y, Wu L, et al. Microenvironment-responsive immunoregulatory electrospun fibers for promoting nerve function recovery. *Nature Communications*. 2020;11(1):4504.
53. Wang D, Wang X, Li X, Jiang L, Chang Z, Li Q. Biologically responsive, long-term release nanocoating on an electrospun scaffold for vascular endothelialization and anticoagulation. *Materials Science and Engineering: C*. 2020;107:110212.
54. Liu H, Peng H, Wu Y, Zhang C, Cai Y, Xu G, et al. The promotion of bone regeneration by nanofibrous hydroxyapatite/chitosan scaffolds by effects on integrin-BMP/Smad signaling pathway in BMSCs. *Biomaterials*. 2013;34(18):4404-17.
55. Kim H-W, Lee H-H, Knowles JC. Electrospinning biomedical nanocomposite fibers of hydroxyapatite/poly(lactic acid) for bone regeneration. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2006;79A(3):643-9.