



# MÜHENDİSLİKTE POPÜLER YAKLAŞIMLAR

Editör: Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ



**MÜHENDİSLİKTE  
POPÜLER YAKLAŞIMLAR**

**Editör**

**Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ**



**MÜHENDİSLİKTE POPÜLER YAKLAŞIMLAR**  
**Editör: Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ**

**Genel Yayın Yönetmeni:** Berkan Balpetek  
**Kapak ve Sayfa Tasarımı:** Duvar Design  
**Baskı:** HAZİRAN 2024  
**Yayıncı Sertifika No:** 49837  
**ISBN:** 978-625-6069-27-5

© 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)

## İÇİNDEKİLER

### Bölüm 1 .....4

**Tilt Motorlu İnsansız Hava Araçlarının Tasarımında  
Aileron İnovasyonu: Analiz ve Geliştirme**  
*Beytullah BOZALİ, Abil HUSEYNOV, Ali ÖZTÜRK*

### Bölüm 2 .....21

**Makine Öğrenmesi Tabanlı EKG İzleme Sistemi ile  
Kalp Hastalıklarının Erken Teşhisi**  
*Beytullah BOZALİ, Tutku KAYA*

### Bölüm 3 .....45

**Yumuşak Sediment Deformasyonu**  
*Calibe KOÇ TAŞGIN*

### Bölüm 4 .....61

**3B Beton Baskı: İnşaat Mühendisliği Perspektifinden Yenilikler**  
*Nazım Çağatay DEMİRAL, Cenk KARAKURT*

### Bölüm 5 .....86

**Yenilikçi Teknolojik Uygulamalar ve Fonksiyonel Gıdaların Geleceği**  
*Zeynep KİLCİ, Nilay KORKMAZ*

### Bölüm 6 .....105

**Bitüm Modifikasyonunda Güncel Yaklaşımlar: Nanokil Örneği**  
*Hande VAROL MOROVA*

## **Bölüm 1**

### **Tilt Motorlu İnsansız Hava Araçlarının Tasarımında Aileron İnovasyonu: Analiz ve Geliştirme**

**Beytullah BOZALİ<sup>1</sup>**  
**Abil HUSEYNOV<sup>2</sup>**  
**Ali ÖZTÜRK<sup>3</sup>**

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr.; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü.  
beytullahbozali@duzce.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3633-5780

<sup>2</sup> Öğrenci; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü.  
ebil.huseynov.2000@gmail.com ORCID No: 0009-0006-6508-9175

<sup>3</sup> Prof. Dr.; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü.  
aliozturk@duzce.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3609-3603

## ÖZET

İnsansız hava araçları (İHA) alanında önemli bir gelişme olan tilt motorlu bir aracın tasarımını ve geliştirilmesini ele almaktadır. Tilt motorlu İHA'lar, dikey iniş kalkış yetenekleri sayesinde özellikle engebeli arazilerde kullanım için ideal olup bu özellikleriyle öne çıkmaktadır. Proje kapsamında, aileronların tamamen kaldırılması ve yerine ön rotorların uçuş sırasında birbirine zıt olarak açıldırılmasıyla bir inovasyon yapılmıştır. İHA tasarımında XFLR5 programında analizleri ile yapılmış ve elde edilen veriler doğrultusunda Solidworks ortamında çizimler yapılarak mekanik uyumluluk sağlanmıştır. Ayrıca elde edilen veriler kapsamında statik dayanım ve akış analizleri yapılmıştır. Montaj kısmında sorunsuz bir uyum elde edilmiş ve elektronik kontrolcü olarak Arduino Uno kullanılmıştır. Bu süreçte uygun pinler belirlenmiş ve sisteme uygun kodlar yazılmıştır. Çalışma, ağırlık tasarrufu sağlayan ek kablo ve servoların kullanımıyla maliyet azaltılmıştır. Ayrıca, aileronların tasarımındaki boşlukların kapatılmasıyla daha homojen bir hava akışı sağlanmış ve aileron alıklarının kanat yapısına entegre edilmesiyle kanat dayanımı artırılmıştır. Bu sayede, daha basit bir tasarımı ve daha az arıza olasılığını teşvik ederken, aynı zamanda aileronların doğasından kaynaklanan asimetrik güç dağılımı sorununu çözmektedir. Bu çalışma sayesinde, İHA teknolojisinin gelişimine katkıda bulunarak, özellikle dikey iniş kalkış yeteneği olan tilt motorlu araçların tasarımında yeni bir yaklaşım sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İHA, DİHA, Ardino, VTOL, İHA Tasarımı, Sonlu Elemanlar Metodu, Uçak Kanadı

## 1. GİRİŞ

İHA'lar, pilot veya yolcu taşımayan, göreve uygun ekipmanlarla donatılmış ve uzaktan kumanda ile veya otonom olarak hareket edebilen hava araçlarıdır. Günümüzde İHA'lar, çeşitli alanlarda kullanılarak hayatımızı kolaylaştırmaktadır. Uçan makinelerin tarihi oldukça eskidir. Wright kardeşlerin ilk uçuşundan sadece 13 yıl sonra, 1916 yılında Archibald Montgomery Low tarafından ilk insansız hava aracı geliştirildi. Bu gelişme, havacılıkta yeni bir çağa öncülük etti ve İHA'lar günümüzde birçok farklı alanda önemli roller üstlenmektedir. Birinci Dünya Savaşı, İHA'ların geliştirilmesinde kritik bir dönüm noktası oldu. Savaş sırasında, casusluk ve keşif faaliyetleri için radyo kontrollü uçaklar kullanıldı (Pearson, 1969). Bu ilk nesil İHA'lar, günümüzdekilerle kıyaslandığında çok daha ilkel ve uçuş menzilleri oldukça sınırlıydı. Savaş sonrası dönemde, İHA'ların geliştirilmesine devam edildi. 1950'ler ve 1960'larda daha gelişmiş İHA'lar tasarlandı ve üretildi; bu İHA'lar Vietnam Savaşı gibi askeri çatışmalarda kullanılmıştır. 1980'ler ve 1990'larda, mikroelektronik ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, daha küçük, daha hafif ve daha yetenekli İHA'lar geliştirilmişti (Hassan et al., 2017). Günümüzde İHA'lar, askeri, ticari ve sivil amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır (Dağ et al., 2022; Murat & Öztürk, 2024). Askeri İHA'lar, keşif, gözetleme, saldırı ve kamikaze görevleri için kullanılmaktadır. Ticari İHA'lar ise tarım, harita yapımı, paket teslimatı ve arama kurtarma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sivil İHA'lar ise polislik, itfaiyecilik ve çevre izleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. Türkiye'de İHA kullanımı 1980'lere kadar uzanmaktadır. Türk Silahlı Kuvvetleri, 1989 yılında ilk kez Megitt BANSHEE modelini kullanmaya başladı. Bu İHA, ilkel bir jet tahrik sistemine sahip olan sabit kanatlı bir hedef drone olarak tasarlanmıştır. Günümüzde bu model, halen hedef ve kamikaze görevlerinde kullanılmaktadır (Elmas & Alkan, 2023). 2000'li yıllardan itibaren Türkiye, İHA üretimine önemli bir önem vermeye başlamıştır. Baykar Makina ve TAI gibi firmalar tarafından geliştirilen İHA'lar hem Türk Silahlı Kuvvetleri hem de uluslararası pazarlarda önemli bir konuma gelmiştir. İHA'lar, tarımda ilaçlama, gübreleme, sulama, tohumlama ve hasat tahmini gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Akkamış & Çalışkan, 2020). Döner kanatlı İHA'lar, pervanelerin sağladığı itiş ve türbülans sayesinde ilaçlamanın verimli ve homojen bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, bulut tohumlama yöntemi ile uygun iklim koşullarının sağlanması da İHA'lar yakın gelecekte kazandırılması beklenen özellikler arasındadır. İHA'lar, haritalamada radar, LiDAR ve spektrometre sensörleri sayesinde yükseklik, şekil, kayaç ve toprak yapısı gibi verileri hızlı, pratik ve maliyet etkin bir şekilde elde etmeyi sağlar. Bu teknoloji, haritalama ve arazi planlama çalışmalarının daha kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır (Coşkun, 2012).

Askeri sanayide ise İHA'lar, keşif, gözetleme, saldırı, kamikaze ve hava savunma sistemi yer belirleme gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Askeri İHA'lar, savaş alanında askerlere kritik bilgiler sağlayarak ve düşman hedeflerini imha ederek önemli roller üstlenmektedir.

Bu çalışma, tilt motorlu İHA'ların dikey iniş kalkış yeteneklerini geliştirerek engebeli arazilerde kullanım için ideal bir çözüm sunmaktadır. Aileronların kaldırılması ve ön rotorların açıldırılması ile yapılan inovasyon, daha homojen hava akışı ve kanat dayanımı sağlayarak tasarım basitliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. XFLR5 ve Solidworks programlarıyla yapılan analizler ve statik dayanım çalışmaları, mekanik uyumluluğu ve sistem bütünlüğünü sağlamıştır. Bu çalışma, İHA teknolojisine önemli bir katkı yaparak, tilt motorlu araçların tasarımında yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

## **2. MATERYAL VE METOD**

Bu proje kapsamında araştırılan ve geliştirilecek olan dikey iniş ve kalkış yapabilen insansız hava aracı (DİHA), bir baz model olarak tasarlanmıştır (Dağ et al., 2022). DİHA, iniş pisti gereksinimi olmadan çeşitli arazilerde görev yapabileme yeteneğine sahiptir (Murat & Öztürk, 2024). Tasarım sürecinde öncelikle XFLR5 programında aerodinamik analizler gerçekleştirilmiş, ardından SolidWorks ortamında detaylı çizimler yapılarak mekanik uyumluluk sağlanmıştır (Deperrois, 2010; Pro, 2024). Elde edilen veriler doğrultusunda statik dayanım ve akış analizleri yapılmış, sonuçlar optimize edilerek nihai tasarım oluşturulmuştur. Montaj aşamasında, parçaların sorunsuz bir şekilde birleştirilmesi sağlanmış ve elektronik kontrol sistemi olarak Arduino Uno tercih edilmiştir. Kontrolcü için uygun pinler belirlenmiş ve sistemin gereksinimlerine uygun kodlar yazılmıştır. İHA'nın maliyetini düşürmek ve ağırlığını azaltmak amacıyla ek kablolar ve servolar kullanılmıştır. Aileron tasarımındaki boşlukların kapatılması, daha homojen bir hava akışı sağlarken, aileron alıklarının kanat yapısına entegrasyonu kanat dayanımını artırmıştır.

### **2.1. İHA Sınıflandırması**

İHA'lar, motor ve tahrik sistemleri yapılarına ve uygulama alanlarına göre dört ana gruba ayrılabilir. Sabit kanatlı İHA'lar, ileriye doğru verilen bir kuvveti kanatlar aracılığıyla kaldırma kuvvetine dönüştürerek havalanan, uzun menzilli uçuşlar için ideal olan İHA'lardır. Tilt motorlu İHA'lar, gövde yapısı ve seyir sırasındaki davranışları sabit kanatlı İHA'lara benzerken, dikey kalkış ve iniş yeteneği sayesinde pist gereksiniminden bağımsızdırlar. Bu özelliği, dikey kalkış ve iniş (VTOL) sistemlerine sahip olmalarına borçludur. Döner kanatlı İHA'lar ise, rotorlarındaki pervaneleri hızlı bir şekilde döndürerek kaldırma kuvveti oluşturan,



dar alanlarda manevra kabiliyeti sağlayan ve dikey kalkış ve iniş imkanına sahip olan İHA'lardır. Hibrit İHA'lar ise, dikeyde ve yatayda rotolara sahip olup, hem dikey kalkış ve iniş yeteneği hem de uzun menzilli uçuş imkanını bir arada sunarlar. Bu sınıflandırma, İHA teknolojisinin farklı uygulama gereksinimlerine uygun çözümler sunmasına olanak tanırken, her bir sınıfın avantajları ve dezavantajları mevcuttur (Önen et al., 2014).

## **2.2. Mevzuat Durumu ve İHA Sınıflandırması**

İnsansız hava araçları (İHA'lar), Türk Sivil Havacılık Kanunu'nun 2920 sayılı hükümlerine dayanarak düzenlenmiş olan "İnsansız Hava Aracı Sistemleri Talimatı-SHT-İHA" ile genel olarak düzenlenirken, belirli İHA tipleri mevzuat dışında tutulmaktadır. Bu mevzuat dışı İHA tipleri şunlardır:

- a. Devlet insansız hava araçları,
- b. Yalnızca kapalı alanlarda kullanılan İHA'lar ve sistemleri,
- c. Yere veya herhangi bir platforma bağlı olan insansız balon ve benzeri sistemler,
- d. Azami kalkış ağırlığı 500 gramdan daha az olan İHA'lar (Kahveci & Can, 2017).

Bu proje kapsamında tasarlanacak İHA'nın azami kalkış ağırlığı 500 gramdan ağır olması nedeniyle, SHT-İHA kaydı yapılarak mevzuata uygun hale getirilecektir. Bu düzenlemeler, İHA'ların kullanımını kontrol altına alarak güvenlik ve hava trafik yönetimi açısından önemli bir rol oynamaktadır.

## **2.3. Projenin Temel Amaçları ve Önemi**

Bu projenin temel hedefleri arasında, hafif ve verimli bir DİHA tasarımı geliştirmek ve çok yönlü bir DİHA platformu oluşturmak yer alıyor. Tasarım iyileştirmeleriyle hava aracının ağırlığının azaltılması ve sürtünme katsayısının düşürülmesi amaçlanıyor. Bu, DİHA'nın minimum havada kalma süresini 10 dakika ve üzerine çıkarmayı hedefliyor.

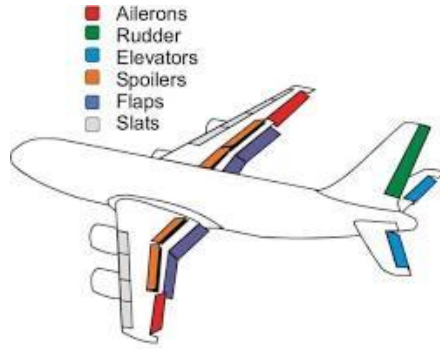
Projenin beklenen faydaları arasında, askeri ve sivil alanlarda DİHA kullanımının yaygınlaşması, farklı görevlerde kullanılabilecek çok yönlü bir DİHA platformunun oluşturulması, otonom uçuş yeteneği ile insan müdahalesine gerek kalmadan görevlerin yerine getirilmesi ve yerli, milli üretim kapasitesinin oluşturulması yer alıyor.

Bu projenin önemi, DİHA'ların günümüzde birçok alanda önemli bir rol oynamasıyla doğrudan bağlantılıdır. Bu teknolojinin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla birlikte DİHA'ların kullanım alanlarının genişlemesi beklenmektedir. Geliştirilecek

olan milli ve çok yönlü DIHA platformu, ülkemizin bu teknolojide öncü bir ülke konumuna gelmesine katkıda bulunacaktır.

#### 2.4. Hava Aracı Hakkında Genel Terimler

Aileronlar, uçağın dönme hareketini gerçekleştiren ön kanat kontrol yüzeyleridir. Bu yüzeyler, uçağın kendi ekseninde (burun-kuyruk ekseninde) dairesel bir hareket yapmasını sağlar. Bu dönme hareketi, uçak elevatörleriyle birlikte kullanılarak daha kontrollü ve rahat bir dönüş sağlar. Aileronların çalışma mantığı şu şekildedir: Uçağın yatış yönündeki (roll) aileronlar yukarı kalkar, yatış yönüne ters aileronlar ise aşağı doğru açılır. Bu durumda, ters yönde açılan iki aileron arasında farklı hava basınçları oluşur. Yüksek basınç, aşağı açılan aileronun altında, düşük basınç ise yukarı kalkan aileronun üstünde oluşur. Bu farklı basınçlar neticesinde, aileronların oluşturduğu aerodinamik kuvvetler uçağın dönüş hareketini başlatır ve sürdürür (Kurt & Ün, 2015).



Şekil 1: Hava aracı kontrol yüzeyleri

Hava aracının dönüşü çembersel bir harekettir ve çemberin dışında kalan kanat  $((2(\pi)*\Delta r) / t)$  kadar hızlı yol alır ve bu hız ek kaldırma kuvveti olarak eşit açıda açılan aileronlar üzerinde değişken dengesiz yük oluşturur. Bu durum, aileronların asimetric olarak kullanılmasıyla kısmen çözülmüş olsa da hala tam olarak giderilememiştir. Dikey stabilize ile, uçağın yatay ekseninde (sağa ve sola) denge sağlamaya yardımcı olur. Bu stabilizasyon genellikle kuyruğun sonundaki kanatçıklar aracılığıyla sağlanır. Dikey stabilize, kuyruğun alt kısmında bulunur ve dikey dümen adı verilen bir kontrol yüzeyine sahiptir. Dikey dümen, dikey stabilizeye bağlı hareketli bir kontrol yüzeyidir. Görevi, uçağın yatay eksenindeki hareketlerini kontrol etmektir. Pilot, pedalları kullanarak dikey dümeni kontrol eder ve bu sayede uçağın burnunu sağa veya sola yönlendirir. Yatay stabilize ile, genellikle dikey stabilizeye dik bir çift yatay kanat olarak tasarlanmıştır. Bu kanatlar, uçağın dikeydeki stabilitesinden sorumludur ve uçağın burnunun yukarı

veya aşağı y6nl6 hareketlerini engeller. Elevat6rler, yatay stabilizeye bağlı kontrol y6zeyleridir ve uğağın yunuslama hareketini kontrol ederler. Pilot, joystick'i kullanarak elevat6rleri kontrol eder ve bu sayede uğağın burnunu yukarı veya aşağı kaldırır. Yardımcı kanatlar arasında flaplar ve slotlar bulunur. Flaplar, kanat geometrisini değiştirerek farklı hızlarda istenilen kaldırma kuvvetini sağlar ve tamamen açılarak uğağın durmasını sağlar. Slotlar ise kanatların 6n kenarında bulunan ve kanat akışının kopmasını engelleyen ağıklıklardır. Slotlar, kanatların stall ağısını geciktirerek uğağın daha d6ř6k hızlarda da uğmasını sağlar. Dihedral, kanatların ufuk çizgisine g6re aldđđ ağıdır. Pozitif dihedral açısı, kanatların yukarı doğru ağılmasını ifade eder ve uğağın d6n6şlerde stabilitesini artırır (Deperrois, 2010).

## 2.5. Mekanik tasarım

XFLR programı, dikey uğuştan yatay uğuşa kısa s6rede ve d6ř6k hızda geçebilecek potansiyel kanat geometrilerini ("airfoiller") belirlemek için kullanılmıştır (Akdoğan & S6l6, 2023; Murat & 6zt6rk, 2024). Bu aşamada, yaygın olarak kullanılan NACA standartları tercih edilmiş ve Reynolds (Re) sayısı 100.000 olarak alınmıştır (Akdoğan & S6l6, 2023; 6nen et al., 2014).

Seçilen potansiyel airfoiller arasında NACA 23012, NACA 2412, NACA 2415 ve NACA 4412 bulunmaktadır. Bu aşamada, tasarımın olabildiğince aerodinamik ve havada iyi tutunmasını sağlamak amacıyla ana unsur, kaldırma katsayısı (Cl) ile s6r6klenme katsayısı (Cd) oranının maksimize edilmesidir. Bu nedenle, XFLR programı kullanılarak her bir airfoil için Cl/Cd oranı hesaplanmış ve farklı hızlarda performansı karşılaştırılmıştır (Murat & 6zt6rk, 2024).

Analizler sonucunda, NACA 4412 airfoilin en y6ksek Cl/Cd oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu airfoilin seçilme nedenleri şunlardır:

- Y6ksek Cl/Cd oranı, havada daha iyi tutunma sağlar ve s6r6klenmeyi azaltır.
- D6ř6k hızlarda bile y6ksek kaldırma kuvveti 6retebilir.
- Geniş bir hız aralığında stabil performans g6sterir.

NACA 4412 airfoilin seçilmesiyle birlikte, kanat tasarımı 6zerinde çalışmalara başlanacaktır. Bu tasarım s6reci, seçilen airfoilin 6zelliklerini g6z 6n6nde bulundurarak aerodinamik performansı optimize etmek ve istenilen uçuş performansını sağlamak için gerçekleştirilecektir.

## 2.6. Kanat Tasarımı

Airfoil Seçimi, NACA 4412 airfoil, CL/Cd oranının ve alfa açısının grafiğe bakıldığında en verimli seçim olarak belirlenmiştir. Bu airfoil, en yüksek kaldırma katsayısına (Cl) ve en düşük sürüklenme katsayısına (Cd) sahip olduğundan, DİHA'nın daha az enerji harcayarak daha fazla yük taşımasını sağlayacaktır (Önen et al., 2014).

Kanat-Gövde Birleştirme Açısı, kanadın gövdeye birleştirilme açısı, Cl'nin maksimum ve kararlı olduğu noktaya göre belirlenir. Grafikten bu değer 8 derece olarak okunmaktadır. Bu açı, DİHA'nın hem yatay uçuşta hem de dikey kalkış ve iniş sırasında stabil kalmasını sağlayacaktır.

Kanat Alanı Hesaplama, kaldıracak toplam ağırlık, motorların toplam kaldırma kapasitesine eşittir. Kullanılan motorlar şunlardır:

- DLS yapımı D2836 1500kv x 2 adet – 2300 g — 22.563 N
- DLS yapımı D2836 1120 kv x 1 adet — 1130g – 10.9872 N

Toplam Ağırlık, 3430g yani 33.55 N kaldırma kuvvetine sahiptir. Kanat alanı hesaplama formülü denklem (1)'de verilmektedir (Uzun, 2018).

$$Fl=0.5* Cl*S*V^2 \quad (1)$$

Denklem (1)'de Fl kaldırma kuvveti (N) ,Cl Kaldırma katsayısı, V Hız(M/S), S: Alan, Yük 33.55 N = Fl, Cl Grafikten 1.4, V 15 m/s (yatay uçuşa geçme hızı), Kanat Alanı (Ak) 0.213 m<sup>2</sup> olarak ifade edilmektedir.

Kanat Geometrisi:

- Kanat Uzunluğu: 1250 mm
- Kanat Kalınlığı: 180 mm

Bu boyutlar, 0.225 m<sup>2</sup> kanat alanı ve 3 derecelik dihedral açısı sağlayacak şekilde seçilmiştir. Dihedral açısı, uçağın dönüşlerde daha stabil olmasını sağlayacaktır.

## 2.7. Denge Merkezi

Tasarımda, basınç ve denge merkezinin kuyruğa yakın, ağırlık merkezinin ise ön tarafa daha yakın olması sağlanmalıdır. Dikey iniş kalkış yapabilen DİHA'larda, ağırlık merkezinin hem önde (yatay uçuş için) hem de tüm motor kuvvetlerinin vektörel kesişiminde bulunması gerekir.

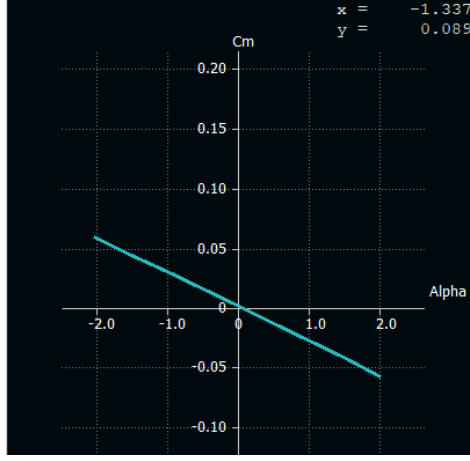
Dinamik Aerodinamik Merkez, Veriler doğrultusunda kanat açıları ve boyutları XFRL'a yerleştirildikten sonra, dinamik aerodinamik merkezinin açığa oran grafiği 0 noktasını pozitifden negatife doğru kesmesi sağlanmalıdır (Deperrois, 2010). Bu, uçağın dengesi için gereklidir.

### **3. PROJENİN ÇALIŞTIRILMASI VE ALINAN SONUÇLAR**

Yukarıda açıklanan adımlar izlenerek, dikey iniş kalkış yapabilen bir DİHA için kanat tasarımı titizlikle tamamlanmıştır. Bu tasarım süreci, aerodinamik verimliliği ve dengeyi optimize etmek amacıyla özenle seçilmiş parametreler ve geometriler içermektedir. Kanat tasarımı, belirlenen kaldırma ve sürüklenme katsayılarına sahip en uygun airfoil seçimiyle başlamıştır. Bu seçim, NACA 4412 airfoilin analiz sonuçlarına dayanmaktadır, ki bu airfoilin en yüksek Cl/Cd oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra, kanat-gövde birleştirme açısı, Cl'nin maksimum ve kararlı olduğu noktaya göre belirlenmiş ve bu açı, uçağın hem yatay uçuşta hem de dikey kalkış ve iniş sırasında stabil kalmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Kanat geometrisi, belirli bir kanat uzunluğu ve kalınlığı ile belirlenmiştir. Bu geometri, 0.225 m<sup>2</sup> kanat alanı ve 3 derecelik dihedral açısı sağlayacak şekilde seçilmiştir. Dihedral açısı, uçağın dönüşlerde daha stabil olmasını sağlar. Dinamik aerodinamik merkezin belirlenmesi ise, kanat açıları ve boyutları XFRL programında analiz edilerek gerçekleştirilmiştir. Dinamik aerodinamik merkezin açığa oran grafiğinin 0 noktasını pozitiften negatife doğru kesmesi sağlanmıştır, bu da uçağın dengesi için kritik bir faktördür. Tüm bu adımlar, DİHA'nın aerodinamik performansını optimize etmek ve istenen uçuş karakteristiklerini sağlamak amacıyla bilimsel bir temelde gerçekleştirilmiştir.

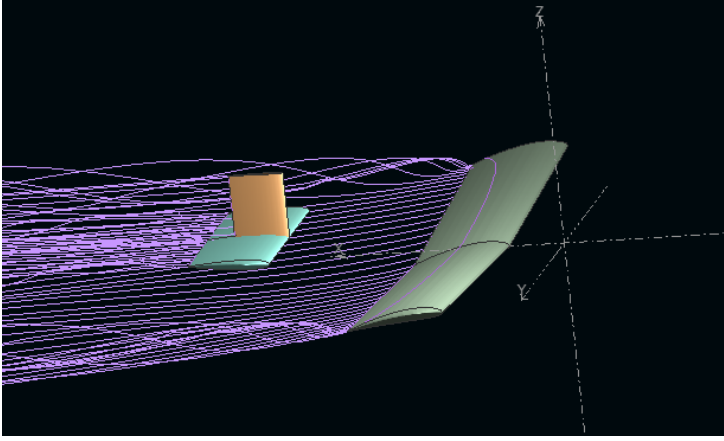
#### **3.1. Aerodinamik Analiz**

Cm/ $\alpha$  grafiği, deneme-yanılma yöntemiyle en optimize edilmiştir. Bu grafik, uçağın yatay ve dikey stabilitesini yansıtmaktadır. Optimizasyon süreci, uçağın hem yatay uçuşta hem de dikey kalkış ve iniş sırasında stabil kalmasını sağlamak üzere, Şekil 2'de görülen Cm/ $\alpha$  eğimini ayarlamak suretiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2:  $C_m/\alpha$  Grafik gösterimi

### 3.2. Gövde Aerodinamiği



Şekil 3: XFLR5 ile CFD analizi

Şekil 3'te gösterilen gövde aerodinamiği, kanatlar kadar etkileşime girmediği için genellikle simülasyonlarda ek bir yük olarak göz ardı edilir. Bu durumun nedeni, gövdenin kanatlara göre daha küçük bir yüzey alanına sahip olması ve bu nedenle aerodinamik kuvvetler üzerinde daha az etkiye sahip olmasıdır.

Azami Seyir Hızı Hesaplama:

Adım 1: Sürüklenme Katsayısını Okumak  $C_d/\alpha$  grafiğinden uçağın yatay uçuştaki sürüklenme katsayısı ( $C_d$ ) 0.07 olarak belirlenmiştir. Bu değer, uçağın hava direncini temsil etmektedir (Murat & Öztürk, 2024).

Adım 2: Kaldırma Kuvvetini Hesaplamak Kaldırma kuvveti ( $F_l$ ), Denklem (2)'ile hesaplanır.

$$F_l = 1/2 * \rho * V^2 * S * C_l \quad (2)$$

Denklem (2), belirli bir hızda ve kanatın verimli bir şekilde kaldırma üretebilmesi için gereken kaldırma kuvvetini hesaplamak için kullanılır. Denklem (2)'de  $F_l$  kaldırma kuvveti (N),  $C_l$  Kaldırma katsayısı,  $V$  Hız(m/s),  $\rho$  Hava yoğunluğu,  $S$ (alan),  $\rho$ : Hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ) =  $1.225 \text{ kg/m}^3$  (standart deniz seviyesi değeri),  $V$ : Uçuş hızı (m/s),  $S$  Kanat alanı ( $\text{m}^2$ ) =  $0.225 \text{ m}^2$  (hesaplanmıştır),  $C_l$  Kaldırma katsayısı = 1.4 (hesaplanmıştır)

Yatay uçuşta, kaldırma kuvveti uçağın  $F_l$  ağırlığına eşittir.

$$F_l = W = 33.55 \text{ N (hesaplanmıştır)}$$

Adım 3: Azami Seyir Hızını Hesaplamak

Azami seyir hızı ( $V_{\text{max}}$ ), Denklem (3) ile hesaplanır:

$$V_{\text{max}} = \sqrt{(2 * W / (\rho * S * C_d))} \quad (3)$$

Denklem (3), uçağın motor gücünün hava direncine eşit olduğu hızı verir.

Hesaplama:

$$V_{\text{max}}^2 = (2 * 33.55 \text{ N} / (1.225 \text{ kg/m}^3 * 0.225 \text{ m}^2 * 0.07))$$

$$V_{\text{max}} = 20.7 \text{ m/s}$$

Azami Seyir Hızı: 20.7 m/s

İHA'nın ağırlığının toplam 2 kg'dan düşük olduğu göz önünde bulundurulur ise farklı pil veya yük kombinasyonları ile 10 dakika ile 1 saat arası havada kalabilir.

### 3.3. Kuyruk Yerleştirilmesi

Proje tasarımı, yatay stabiliz kanattan gelen bozulumlu hava akışından etkilenmemesi amacıyla 40 mm yukarı yerleştirildiği görülmektedir. Bu yerleştirme, uçağın yatay uçuş sırasında stabil kalmasını sağlamaktadır. Ağırlık merkezi, iki motor kuvvetinin vektörel kesişim noktasına yakın bir konumda seçilmiştir. Bunun nedeni, dikey kalkış esnasında motor kuvvetlerinin DİHA'ya stabil bir etki yapmasını sağlamaktır. Bu yerleşim sayesinde, DİHA kalkış sırasında dengeli bir şekilde yükselebilmektedir.



**Şekil 4:** İHA'nın yekûn görünüm renderi alınmış önizlemesi

Şekil 4'te İHA'nın tüm görünümünün render alınmış ön izlenir görünür verilmektedir. Bu tasarım kararları, uçağın aerodinamik performansını ve uçuş stabilitesini optimize ettiği görülmektedir.

### **3.4. Yenilikçi Yaklaşım**

Bu projede tilt motor kullanılmasının temel sebebi, geleneksel sabit kanatlı ve dikey kalkış ve iniş (VTOL) İHA'lara kıyasla birçok avantaj sunmasıdır. Bu avantajlar şunlardır:

**Daha Düşük Bakım Gereksinimi:** Tilt motorlar, daha az sayıda hareketli parçaya sahip olmaları nedeniyle daha az bakım gerektirir. Bu da arıza riskini ve onarım maliyetlerini düşürür.

**Daha Düşük Sürtünme Katsayısı:** Tilt motorlar, kanatlarda bulunan aileronlar gibi kontrol yüzeylerine ihtiyaç duymazlar. Bu da sürtünmeyi azaltarak daha verimli bir uçuş sağlar.

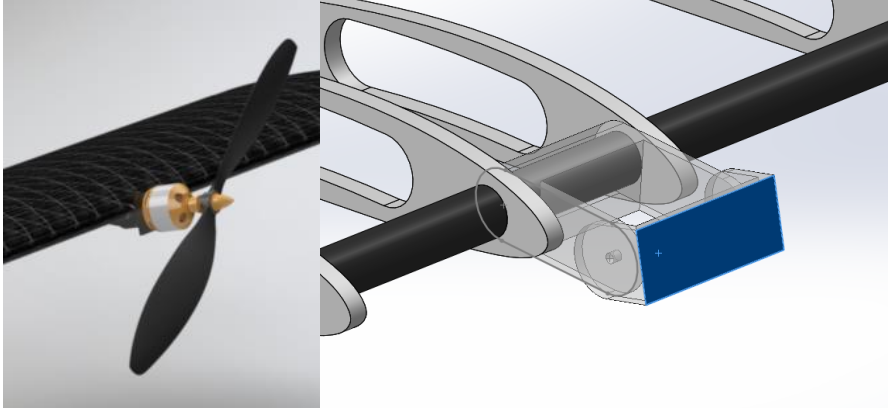
**Daha Hafif ve Daha Ucuz Tasarım:** Tilt motorlar, aileronlar ve ek motorlar gibi ilave bileşenlere ihtiyaç duymadıkları için daha hafif ve daha ucuz bir tasarıma olanak tanır.

Bu projede, tilt motorlu İHA tasarımı için yeni yöntem kullanılmaktadır. Ön kanat kontrol yüzeylerinin kaldırılması, geleneksel kontrol yüzeylerinin kaldırılması hem aerodinamik verimliliği artırmakta hem de yapısal ağırlığı



azaltılmaktadır. Bu yöntem, tilt motorların sağladığı yönlendirme yetenekleri sayesinde mümkün kılınmaktadır.

Bu yöntemler, tilt motorlu İHA tasarımının performansını ve maliyet etkinliğini artırmak amacıyla yenilikçi bir yaklaşımla uygulanmıştır. Şekil 5'te Motorların zıt ekseninde dönebilmesini sağlayan tilt mekanizmasının gösterimi verilmektedir.



Şekil 5: Motorların zıt ekseninde dönebilmesini sağlayan tilt mekanizma

Geleneksel sabit kanatlı İHA'larda yatay hareket, aileronlar kullanılarak sağlanmaktadır. Ancak bu projede, aileronlar tamamen kaldırılarak yatay hareket, ön iki rotorun uçuş esnasında birbirine zıt olarak açılarak sağlanacaktır. Bu yöntemin sunduğu avantajlar şunlardır:

**Ağırlık Tasarrufu:** Aileronların kontrolü için kullanılan ek kablo ve servoların kaldırılmasıyla önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlanır.

**Maliyet Azalması:** Aileronların üretim ve montaj maliyetleri ortadan kalkar, bu da toplam maliyeti düşürür.

**Daha Homojen Hava Akışı:** Aileronların tasarımındaki boşlukların kapatılmasıyla daha homojen bir hava akışı elde edilir, bu da aerodinamik verimliliği artırır.

**Artan Kanat Dayanımı:** Aileron yuvalarının kanat yapısına dahil edilmesiyle kanat dayanımı artırılır, böylece yapısal bütünlük güçlendirilir.

**Daha Basit Tasarım ve Daha Az Arıza:** Aileronların olmaması, daha basit bir tasarım ve daha az arıza riski anlamına gelir. Bu, bakım ve operasyonel maliyetleri de düşürür.

**Asimetrik Güç Dağılımı Sorununun Çözümü:** Aileronların doğası gereği yarattığı asimetrik güç dağılımı, bu yöntemle ortadan kaldırılarak daha dengeli bir uçuş sağlanır. Bu avantajlar, tilt motorlu İHA tasarımında aileronların kaldırılmasının teknik ve operasyonel faydalarını ortaya koymaktadır. Bu yenilikçi

yaklaşım, İHA'nın performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

### **3.5. Ağırlık Merkezi ve Dengeleme**

Sabit kanatlı hava araçlarında, ağırlık merkezi (CoG) uçağın ana yük taşıyıcısı olan kanatlara yakın konumlandırılmalıdır. Bu, uçuş sırasında stabiliteyi sağlamak için hayati öneme sahiptir. Kuyruk ile CoG arasındaki mesafe, kanat ile CoG arasındaki mesafeden daha fazladır. Bu mesafe farkı, tilt motorlu hava araçlarında, kanat ve kuyrukta kullanılan motorların aynı güçte seçilmesi durumunda denge problemlerine yol açabilir. Güçlü motorlar, kuyrukta ek ağırlık oluşturarak CoG'yi arkaya kaydıracak ve tam güçte kullanılamayacaktır. Bu durum, uçağın dikey kalkış esnasında öne doğru düşmesine neden olabilir.

Bu projede, ön kanattaki iki motor ana kaldırma gücünü sağlarken, arka motor daha zayıf seçilmiştir. Bu tercih, daha stabil bir dengeleme sağlamakta ve dikey kalkış sırasında uçağın dengesini artırmaktadır. Ön kanat motorlarının güçlü olması, gerekli kaldırma kuvvetini üretirken, zayıf kuyruk motoru CoG'yi optimal konumda tutarak dengeyi korur. Bu yaklaşım, tilt motorlu İHA'ların tasarımında stabiliteyi artırırken, maliyetleri ve ağırlığı azaltmayı hedeflemektedir. Uygulanan bu yöntem, uçuş performansını ve güvenilirliğini optimize etmek için önemlidir.

## **4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada, tilt motorlu insansız hava araçlarının (İHA) tasarım ve geliştirme süreci detaylı bir şekilde ele alınmış ve yenilikçi yaklaşımlar sunulmuştur. Geleneksel sabit kanatlı ve dikey iniş kalkış yetenekli İHA'lara kıyasla önemli avantajlar sağlayan tilt motorlu tasarım, ağırlık tasarrufu, maliyet azaltımı ve aerodinamik verimlilik gibi alanlarda önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Aileronların tamamen kaldırılarak ön rotorların zıt ekseninde dönebilmesiyle sağlanan yatay hareket, bu yenilikçi tasarımın temelini oluşturmaktadır.

Proje kapsamında, kanat tasarımı ve aerodinamik analizler XFLR5 programında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar doğrultusunda SolidWorks ortamında mekanik uyumluluk sağlanmıştır. Elde edilen verilerle yapılan statik dayanım ve akış analizleri, tasarımın mekanik ve aerodinamik olarak optimize edilmesine katkıda bulunmuştur. Montaj aşamasında sorunsuz bir uyum elde edilerek, Arduino Uno ile elektronik kontrol sağlanmıştır. Bu süreçte kullanılan uygun pinler ve yazılan kodlar, sistemin işlevselliğini artırmıştır.

Tilt motorlu İHA tasarımı, aileronların kaldırılması ve ön rotorların birbirine zıt olarak açılmasıyla daha homojen bir hava akışı ve artırılmış kanat dayanımı sunmaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, asimetrik güç dağılımı sorununu ortadan kaldırarak daha dengeli bir uçuş sağlamaktadır. Ayrıca, aileron kontrolü için

gerekli olan ek kablo ve servoların kaldırılmasıyla hem ağırlık tasarrufu hem de maliyet azaltımı sağlanmıştır.

Aerodinamik analizler ve yapılan hesaplamalar sonucunda, belirlenen NACA 4412 airfoil ile optimize edilen kanat tasarımı, yüksek kaldırma-sürüklenme oranı ve stabil uçuş karakteristikleri sunmaktadır. Dinamik aerodinamik merkezin belirlenmesi ve kanat-gövde birleştirme açısının optimize edilmesi, İHA'nın yatay ve dikey uçuş stabilitesini artırmaktadır.

Sonuç olarak, tilt motorlu İHA tasarımı, daha düşük bakım gereksinimi, daha düşük sürtünme katsayısı, daha hafif ve daha ucuz bir yapı sunarak geleneksel tasarımlara göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışma, İHA teknolojisinin gelişimine katkıda bulunarak, dikey iniş kalkış yeteneği olan tilt motorlu araçların tasarımında yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen bulgular ve geliştirilen yöntemler, gelecekte yapılacak çalışmalara temel oluşturacak ve İHA performansını, verimliliğini ve güvenilirliğini artırmak için önemli bir referans olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Akdoğan, T. B., & Sülü, İ. Y. (2023). Eliptik Boşluklarla Tasarlanmış Kompozit Uçak Kanat Kaburgalarının Yapısal Analizi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 191–207.
- Akkamiş, M., & Çalışkan, S. (2020). İnsansız Hava Araçları ve Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 8–16. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/mihad>
- Coşkun, M. Z. (2012). Düşük Maliyetli İHA (İnsansız Hava Aracı) ile Mobil Harita Üretimini Bugünü ve Geleceği. *Electronic Journal of Map Technologies*, 4(2), 11–18. [www.teknolojikarastirmalar.com](http://www.teknolojikarastirmalar.com)
- Dağ, T., Ünler, T., Çopur, E. H., & Çakır, U. (2022). Kentsel Hava Taşımacılığında Kullanılacak Dikey İniş-Kalkış Kabiliyetine Sahip Bir Hava Aracının Kavramsal Tasarımı ve Menzil Hesabı. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(3), 649–664. <https://doi.org/10.36306/konjes.1090492>
- Deperrois. (2010). *About stability analysis using XFLR5*. *ReVision (November)* (Erişim Tarihi:10.04.2024).
- Elmas, E. E., & Alkan, M. (2023). Bir İnsansız Hava Aracı Sisteminin Tasarımı, Benzetimi ve Gerçekleştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 929–940. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1037319>
- Hassan, F., Zolotas, A. C., & Smith, T. (2017). Optimized Ziegler-Nichols based PID control design for tilt suspensions. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10(5), 17–24. <https://doi.org/10.25103/jestr.105.02>
- Kahveci, M., & Can, N. (2017). İnsansız Hava Araçları:Tarihçesi, Tanımı, Dünyada ve Türkiye'deki Yasal Durumu. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 5(4), 511–535. <https://doi.org/10.15317/scitech.2017.109>
- Kurt, A., & Ün, N. (2015). *Uçak Aerodinamiği ve Uçuş Dinamiği*, XYZ Yayınları.
- Murat, M., & Öztürk, F. (2024). Kısa Pistli Uçak Gemilerinden Operasyonel Olarak İHA Kaldırmak İçin Maliyet Etkin Bir Yaklaşım. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 23–30. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1459342>
- Önen, A. S., Şenipek, M., Mutlu, T., Cevher, L., Güngör, O., Kurtuluş, D. F., & Tekinalp, O. (2014). Dikey Kalkış ve İniş Yapabilen İHA'nın Pervane İtki Sistemi Rüzgar Tüneli Testleri. *ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü*, June, 1–7.
- Pearson, L. (1969). Developing the Flying Bomb. *Naval Aviation in World War I*, 70–73. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Developing+the+Flying+Bomb#0>

- Pro, D. (2024).  
[https://www.google.com/search?q=Pro%2C+Deepl.+%E2%80%9CXFLR5+kullanarak+stabilite+analizi&oq=Pro%2C+Deepl.+%E2%80%9CXFLR5+kullanarak+stabilite+analizi+&gs\\_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIJCAEQIRgKKGKABMgkIAhAhGAoYoAEyCQgDECEYChigAdIBCDQxNTNqMGo3qAIAAsAIA&source](https://www.google.com/search?q=Pro%2C+Deepl.+%E2%80%9CXFLR5+kullanarak+stabilite+analizi&oq=Pro%2C+Deepl.+%E2%80%9CXFLR5+kullanarak+stabilite+analizi+&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIJCAEQIRgKKGKABMgkIAhAhGAoYoAEyCQgDECEYChigAdIBCDQxNTNqMGo3qAIAAsAIA&source). (*Erişim Tarihi: 15.03.2024*).
- Uzun, M. (2018). İnsansız hava araçlarının aerodinamik performansının geometrik değişiklikler ile iyileştirilmesi. *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora*, 1–91.

## **Bölüm 2**

### **Makine Öğrenmesi Tabanlı EKG İzleme Sistemi ile Kalp Hastalıklarının Erken Teşhisi**

**Beytullah BOZALI<sup>1</sup>  
Tutku KAYA<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör. Dr.; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü.  
beytullahbozali@duzce.edu.tr ORCID No: 0000-0002-3633-5780

<sup>2</sup> Öğrenci; Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü. ktutku3@gmail.com  
ORCID No: 0009-0008-6227-9234

## ÖZET

Makine öğrenmesi, büyük miktarda veriyi analiz edip bu verilerden anlamlı sonuçlar çıkarabilen algoritmaların bir koleksiyonudur. Bu çalışmada, Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağları kullanılarak elektrokardiyografi (EKG) verilerinin analizi ve kalp hastalıklarının erken teşhisi hedeflenmiştir. AD8232 sensör modülünden elde edilen ham EKG verileri, sinyal işleme teknikleri ile temizlenmiş ve işlenmiştir. Elde edilen verilerden özellik çıkarımı yapılmış ve bu özellikler, LSTM modelleri ile eğitilerek zaman serisi verileri üzerinden gelecekteki olayların tahmini yapılmıştır. Bu süreçte MATLAB yazılımı kullanılarak veri işleme ve modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. EKG sinyallerinden kalp atış hızı ve QRS kompleks genişliği gibi önemli özellikler çıkarılmıştır. Bu çıkarılan özellikler, LSTM ağları ile eğitilmiş ve modellenmiş, ardından yeni EKG verilerinin analizi ve tahmini yapılmıştır. Geliştirilen Nesnelerin interneti (IoT) tabanlı sağlık izleme sistemi, gerçek zamanlı EKG verilerini ThingSpeak bulut hizmetine ileterek MATLAB üzerinde ileri analizler yapılmasını sağlamıştır. Çalışmamız, LSTM ağlarının EKG verilerindeki zamansal bağımlılıkları ve karmaşık paternleri etkili bir şekilde öğrenebildiğini ve bu sayede kardiyovasküler hastalıklar (KVH) ile atriyal fibrilasyon (AF) gibi ritim bozukluklarının erken teşhisini sağlayarak tıbbi müdahalelerin zamanında yapılmasına olanak tanıdığını göstermektedir. Ayrıca, IoT tabanlı sağlık izleme sistemlerinin yapay zekâ ile entegrasyonunun veri iletimi ve toplama konularında önemli avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu sistem, düşük maliyetli ve otomatik bir izleme ve teşhis çözümü sunarak, özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki tıbbi uzmanlık ve ekipman eksikliklerinin giderilmesine katkıda bulunabilir. EKG verilerinin uzun süreli ve verimli bir şekilde toplanmasını sağlayarak, asemptomatik ve epizodik AF gibi ritim bozukluklarının güvenilir bir şekilde tespitine olanak tanımaktadır. LSTM ağlarının adaptif öğrenme kapasitesi sayesinde farklı kalp ritim tipleri ve aritmik olayları tanımlayabilme yeteneği deneysel olarak kanıtlanmıştır. LSTM tabanlı makine öğrenmesi teknikleri, kalp hastalıklarının erken teşhisinde ve kriz anında hızlı müdahale edilmesinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Makine Öğrenmesi, Elektrokardiyografi, IoT, LSTM, Kalp Hastalıkları, ThingSpeak Bulut Hizmeti, Erken Teşhis

## 1. GİRİŞ

Kardiyovasküler Hastalıklar (KVH), 2016 yılında dünya çapında gerçekleşen ölümlerin %31'ini oluşturarak başlıca ölüm nedeni olmuştur ve bu ölümlerin %85'i kalp krizi nedeniyle gerçekleşmiştir. KVH'nin Avrupa ekonomisine yıllık maliyeti 210 milyar € olarak tahmin edilmektedir. Geleneksel KVH teşhis yöntemleri, hastaların tıbbi geçmişi ve klinik muayenelerine dayanmaktadır. Bu yöntemler, hastalıkları belirli tıbbi parametrelerle sınıflandırmak için değerlendirilir. Ancak, geleneksel teşhis yöntemleri büyük ve çeşitli veri kümeleriyle başa çıkmada yetersiz kalmakta ve doğru teşhis için derinlemesine analiz ve tıbbi uzmanlık gerektirmektedir. Bu sorun, özellikle tıbbi uzmanların ve klinik ekipmanların yetersiz olduğu gelişmekte olan ülkelerde daha da belirgin hale gelir. Bu durum, güvenilir, otomatik ve düşük maliyetli bir izleme ve teşhis sistemine olan ihtiyacı artırmaktadır (Ebrahimi et al., 2020). Son istatistiklere göre, kardiyovasküler hastalıklar (KVH) dünya genelinde başlıca ölüm nedenlerinden biridir. Avrupa genelinde yılda 3.9 milyondan fazla ölüme yol açmakta olup, bu tüm ölümlerin %45'ini oluşturduğunu vurgulamışlardır (Wilkins et al., 2017; Zompanti et al., 2021). Yaşlanma ile kardiyovasküler sistemde zayıflama meydana gelmektedir. (Chow et al., 2012; Oh et al., 2018). KVH kaynaklanan ölümlerin çoğu, yetişkinlerde yaygın olan ani kalp durması ve yaşamı tehdit eden bir aritmi türü olan ventriküler fibrilasyona (VF) bağlıdır. Aritmiler, normal kalp ritmindeki düzensiz değişikliklerle karakterize edilir ve erken kalp atışı, atriyal fibrilasyon (AF), bradikaritm ve VF gibi çeşitli türleri vardır. AF, düzensiz kalp hızı ile karakterizedir ve inme riskini artırır. Sağlıklı insanlarda normal kalp hızı dakikada 60-100 arasında seyrederken, AF durumunda kalp hızı dakikada 100'ün üzerine çıkabilir. AF genellikle hipertansiyon gibi altta yatan koşullardan kaynaklanır ve yaşlı nüfusta daha yaygındır, gençlerde nadirdir (Mathunjwa et al., 2021). KVH'lar için EKG, modern tıpta en yaygın bulunan ve rutin olarak uygulanan non-invaziv tanı araçlarından biri olduğunu vurgulamışlardır (Abdioğlu et al., 2021; Li et al., 2020). AF, yetişkinlerde en sık görülen aritmi bozukluklarından biridir. Yeni teknolojiler, makine öğrenimi gibi, doktorlara AF riski yüksek olan hastaları belirlemede yardımcı olabilir ve bu şekilde komplikasyonları azaltarak hasta sonuçlarını iyileştirebilir olduğunu ifade etmişlerdir (Wegner et al., 2022). AF'nin zamanında teşhisi, hayatı tehdit eden komplikasyonlardan kaçınmak için hayati öneme sahiptir, ancak özellikle Paroksizmal AF (PAF) gibi erken evrelerde teşhis etmek oldukça zordur. PAF, genellikle semptomsuz ve epizodik olduğundan geleneksel EKG izleme cihazları tarafından tespit edilemez, bu da zamanında teşhisi engelleyebilir ve eksik bildirimlerle sonuçlanabilir. Bu nedenle, uzun süre EKG verilerini toplayabilen ve yapay zeka ile donatılmış akıllı cihazlar, AF'nin daha etkili bir şekilde teşhis edilmesine yardımcı olabileceğini ifade etmişlerdir (Rizwan et al., 2021). Son



yıllarda, EKG verilerindeki büyük gelişmeler, Dinamik Sınır Ağları (DNN'ler) ve özellikle LSTM gibi algoritmaların kullanımıyla önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu algoritmalar, büyük ölçekli veri setlerinde eğitilerek EKG sinyallerinin gereksinimleri ve model performansı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Son on yılda, derin öğrenme (DÖ) sınıflandırıcılarının birçok farklı alanda, örneğin konuşma tanıma, görüntü sınıflandırma ve doğal dil işleme gibi alanlarda başarıyla kullanıldığı belirtilmektedirler (Liaquat et al., 2020). LSTM ağları, derin öğrenme alanında Recurrent Neural Networks (RNN) ailesinin önemli bir parçasıdır ve uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme konusundaki geleneksel RNN'lerin zorluklarını aşmak için geliştirilmiştir. LSTM ağları, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli ilişkileri ve karmaşık desenleri yakalayabilme yetenekleri ile makine öğrenmesi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu ağlar, hücre durumu ve kapı mekanizmaları aracılığıyla bilgi akışını kontrol eder ve bu sayede geçmiş bilgilerin uzun süre boyunca korunmasını sağladığını vurgulamışlardır (Oh et al., 2018). LSTM'ler, belirli kalp atış döngülerini ve aritmik paternleri etkili bir şekilde öğrenerek EKG sinyallerini sınıflandırmada başarılı olabilirler. Ayrıca, LSTM'ler gürültülü ve düzensiz EKG sinyallerinde önemli bilgileri gürültüden ayırabilir ve adaptif öğrenme kapasiteleri sayesinde farklı kalp ritim tiplerini ve aritmik olayları tanımlayabilir. EKG sinyallerinin sürekli izlenmesi ve analizinin kardiyovasküler hastalıkların teşhisini, tedavisini ve önlenmesini geliştirebileceğini vurgulanmaktadır (Xia et al., 2018).

Bu çalışma, kardiyovasküler hastalıkların erken teşhisini ve yönetimini iyileştirmek için LSTM ağları ve IoT tabanlı sağlık izleme sistemlerini bir araya getiren bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle atriyal fibrilasyon gibi ritim bozukluklarının erken teşhisini sağlamak hedeflenmektedir. Geleneksel teşhis yöntemlerinin sınırlılıklarını aşarak, makine öğrenimi algoritmalarının EKG verilerindeki karmaşık paternleri daha etkili bir şekilde öğrenebildiği gösterilmektedir. Bu, tıbbi müdahalenin zamanında yapılmasına ve sağlık hizmetlerine erişimi artırmaya olanak tanır. Ayrıca, IoT tabanlı sağlık izleme sistemlerinin yapay zekâ ile entegrasyonunun gerçek zamanlı veri iletimi ve doğru veri toplama konularında önemli avantajlar sağladığı belirtilmektedir. LSTM ağlarının adaptif öğrenme kapasitesi sayesinde farklı kalp ritim tiplerini tanımlayabilme yeteneği de vurgulanmaktadır. Sonuç olarak, makine öğrenimi ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu, kardiyovasküler sağlık izleme ve teşhisinde yeni bir paradigma sunarak literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

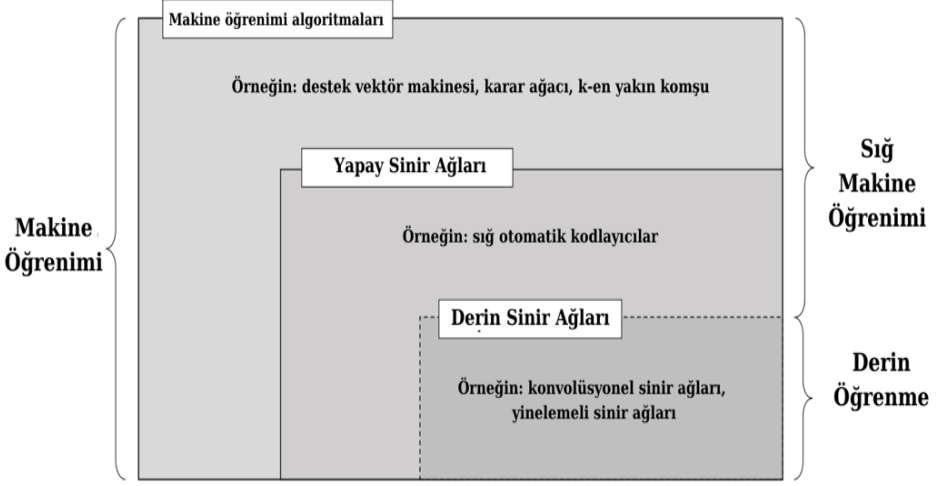
## 2. MATERYAL VE METOD

Makine öğrenimi algoritmalarıyla desteklenen bir sistem mimarisi üzerinde EKG verileri analiz edilerek, hedeflenen hastalıkların erken teşhisini sağlayan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu sistem, AD8232 EKG sensörü ve ESP32 geliştirme kartı gibi bileşenleri kullanarak, Arduino IDE ile tasarlanan kodlar aracılığıyla veri toplama ve analiz süreçlerini yönetmektedir. Ayrıca, LSTM ağları kullanılarak eğitilen model, ThingSpeak bulut hizmeti üzerinden gerçek zamanlı veri iletimi ve analizleri sağlanmıştır. EKG veri seti toplanır ve temizlenir, özellikle AD8232 EKG sensöründen gelen veriler üzerinde çalışılıp ve anlamlı özellikler belirlenmiştir. Model geliştirme ve eğitimi aşamasında, LSTM ağlarıyla bir model oluşturulur ve eğitilir, bu model kardiyovasküler hastalıkları ve ritim bozukluklarını tanımlamak için kullanılmıştır. IoT tabanlı sağlık izleme sisteminin mimarisi tasarlanmış ve ESP32 geliştirme kartı, AD8232 EKG sensörü ve ThingSpeak bulut hizmeti gibi bileşenler entegre edilmiştir. Arduino IDE kullanılarak ESP32 için gerekli kodlar yazılmış, bu kodlar EKG verilerini toplar, işler ve ThingSpeak bulut hizmetine iletir. Toplanan veriler ThingSpeak bulut hizmetine aktarılır ve MATLAB üzerinde ileri analizler için işlenir, LSTM modeli kullanılarak gerçek zamanlı veriler analiz edilir ve kardiyovasküler hastalıkların teşhisi için sonuçlar üretilmiştir.

### 2.1. Makine Öğrenimi

Makine öğrenimi (MÖ), bilgisayarların karmaşık görevleri otomatikleştirmeyi öğrenmelerini sağlayarak, açıkça programlanmadan bu görevleri gerçekleştirmelerini sağlayan bir alanı ifade eder. Verilerdeki örüntüleri ve ilişkileri keşfederek, bu örüntüleri yeni durumlara uygulama yeteneği kazandırır. Basit görevlerde, bilgisayarlar, sorunun çözümü için gereken tüm adımları belirten algoritmalar kullanılarak programlanabilir; bu durumda makine öğrenmesine ihtiyaç duyulmaz. Ancak, daha karmaşık görevlerde, gerekli algoritmaları elle yazmak insanlar için zorlayıcı olabilir. Bu nedenle, pratikte, her adımı insan programcılarının belirlemesi yerine, makinenin kendi algoritmalarını geliştirmesine olanak tanımak daha verimli olabilir (Alpaydin, 2020; Wikipedia, 2024). MÖ, sistemlerin verilerden öğrenmesini ve zamanla daha iyi hale gelmesini sağlayan yapay zekânın bir dalıdır. Sağlık sektöründe, makine öğrenimi algoritmaları, görüntü analizi, hastalık teşhisi, ilaç keşfi ve hasta sonuçlarını tahmin etme gibi görevlerde kullanılabilir. Bilgisayarların büyük veri hacimlerinden öğrenmelerine yardımcı olmak için yapay sinir ağları, makine öğreniminin bir türü olan derin öğrenme (DÖ) içinde kullanılır (Soori et al., 2023). Sağlık sektöründe yapay zekâ (YZ), MÖ ve derin öğrenme DÖ gibi teknolojilerin temel kavramlarını ve bunların birbirinden nasıl ayrıldığını anlamak önemlidir. Yapay zekâ, bilgisayar sistemlerinin insan benzeri zekaya sahip olma yeteneğini ifade ederken, makine öğrenimi, algoritmalar kullanarak verilerden

öğrenme ve zamanla daha iyi hale gelme sürecini tanımlar. Derin öğrenme ise, yapay sinir ağları gibi karmaşık yapıları kullanarak makine öğrenimi problemlerini çözmeyi içeren bir alt dalıdır. Bu terimler arasındaki hiyerarşik ilişki Şekil 1'de verilmektedir (Janiesch et al., 2021).

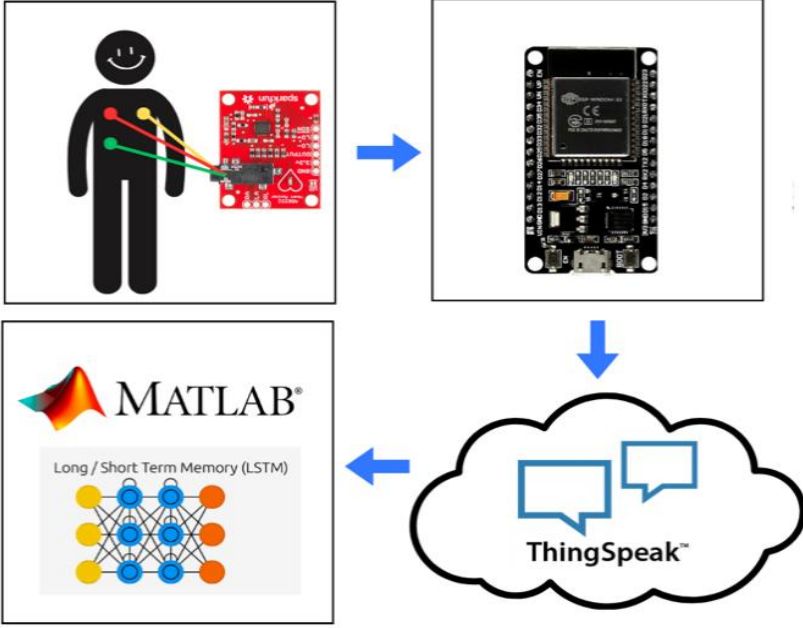


**Şekil 1:** Venn diyagramı

Şekil 1'de anlaşılacağı üzere, DÖ, MÖ bir alt dalıdır. Makine öğrenimi, bilgisayarların verilerden öğrenme yeteneğini genel anlamda ifade ederken, derin öğrenme, daha karmaşık ve çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak derin düzeyde veri analizi ve öğrenme süreçlerini gerçekleştiren bir tekniktir. Makine öğrenimi, destek vektör makineleri, karar ağaçları ve k-en yakın komşu gibi çeşitli algoritmaları kapsar. Derin öğrenme ise, özellikle derin sinir ağları, konvolüsyonel sinir ağları (CNN) ve yinelemeli sinir ağları (RNN) gibi çok katmanlı sinir ağlarını kullanır. Derin öğrenme, büyük veri kümeleri ve yüksek hesaplama gücü gerektiren algoritmaları gerçekleştirme yeteneği sağlar. Özetle, derin öğrenme, makine öğreniminin daha karmaşık ve güçlü bir formudur ve özellikle büyük veri ve karmaşık öğrenme görevlerinde belirgin bir avantaj sunar (Janiesch et al., 2021). Bu çalışmada, EKG dalgalarının analizi için LSTM ağları gibi bir derin öğrenme algoritması kullanılmaktadır.

## 2.2. Çalışma Sistemin Mimarisi

Çalışmada, EKG sinyali vücuda yerleştirilen üç elektrot aracılığıyla alınmakta ve AD8232 sensörü kullanılarak bu sinyaller yükseltilmektedir, bu sensör düşük güç tüketir ve gürültüyü azaltır. Sensörün çıkışı, ESP32 kartının analog pinine iletilmektedir (Prasad & Kavanashree, 2019). Bu veriler, WiFi aracılığıyla bir veri görselleştirme ve depolama platformu olan ThingSpeak'e iletilmiştir. ThingSpeak'de depolanan sinyaller, daha sonra MATLAB ortamına aktarılmıştır. MATLAB'da, yapay sinir ağı mimarisi olan Uzun Kısa Süreli Bellek (Long Short-Term Memory, LSTM) kullanılarak EKG sinyalleri sınıflandırılmakta ve atriyal fibrilasyon (AF) ritim bozukluğu tespit edilmiştir.

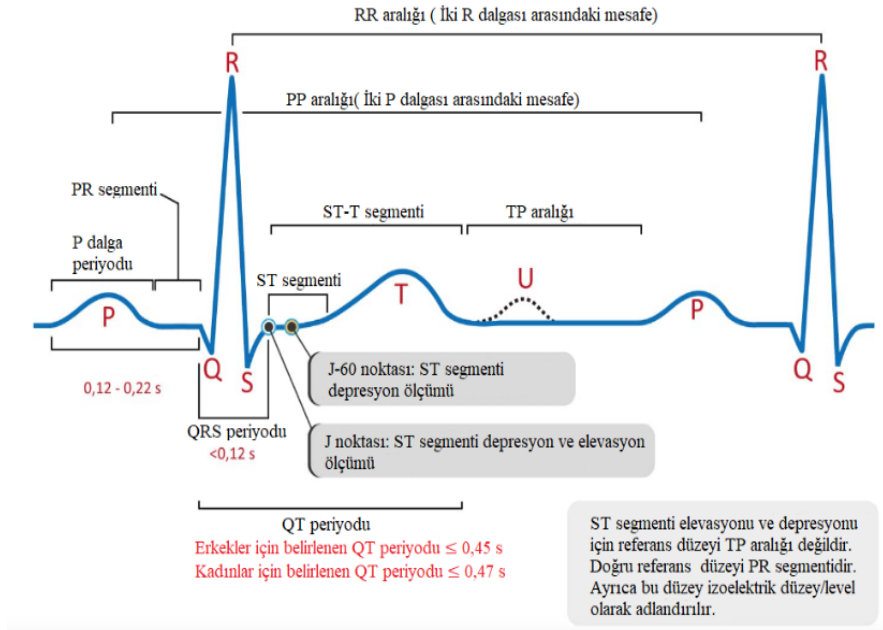


Şekil 2: Blok diyagram

Şekil 2’de, sistemin işleyişini adım adım görselleştirmektedir. Sistemin bileşenleri ve veri akışı bu diyagramda detaylı olarak verilmektedir. Sistem, biyometrik EKG verilerini sensörler aracılığıyla toplamakta ve bu verileri ESP32 mikrodenetleyici kullanarak ThingSpeak bulut platformuna iletilmiştir. Daha sonra, ThingSpeak’te depolanan veriler MATLAB ortamına aktarılmış ve burada LSTM modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Bu entegre sistem, gerçek zamanlı sağlık izleme ve veri analizi için tasarlanmıştır.

### 2.3. Elektrokardiyogram

Elektrokardiyogram, kalpte meydana gelen elektriksel faaliyetin kaydedilmesi için kullanılan bir tıbbi testtir (Kandaz, 2023) Kalbin elektriksel aktivitesi, seri bir monitör üzerinden izlenebileceği gibi çıktı bulut sunucusuna da gönderilerek analiz edilebilir (Rahman et al., 2021) Kalbin elektriksel aktivitesinin temsilini EKG dalgası olarak gözlemleyebiliriz. Doktorlar, elektrokardiyografide kaydedilen herhangi bir anormal deseni tespit etmeye çabalarlar. Kalbin her elektriksel aktivitesinin belirgin bir dalga formu vardır. Şekil 3'te EKG sinyalinin morfolojik gösterimi verilmiştir (Diker et al., 2020; Kandaz, 2023).



Şekil 3: EKG sinyalinin morfolojik gösterimi

Şekil 3'te EKG sinyali, kalp atışlarının farklı aşamalarını yansıtan karakteristik dalgalar ve segmentlerden oluşur. EKG dalgaları ve segmentleri şu şekilde tanımlanabilir: P dalgası, atriyumların depolarizasyonunu gösterir. QRS kompleksi, ventriküllerin depolarizasyonunu temsil eder ve genellikle en belirgin bölümdür. T dalgası ise ventriküllerin repolarizasyonunu yansıtır (Freedomfreak, 2024). U Dalgası (varsa): Papiller kasların repolarizasyonunu gösterebilir. Bu bileşenlerin her biri, kalbin elektriksel aktivitesinin farklı fazlarını temsil eder ve EKG sinyalinin morfolojisi, kalbin sağlığı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. EKG sinyalinin detaylı analizi, kalp ritim bozuklukları ve diğer kardiyak anomalilerin tespitinde kritik rol oynamaktadır. EKG üzerinde belirli zaman aralıkları, kalp kaslarının

elektriksel aktivitesinin farklı evrelerini gösterir. Bu zaman aralıklarının ölçümleri, kalp hızı ve ritmini belirlemek için kullanılır. Sağlıklı yetişkinlerde normal kalp hızı dakikada 60 ile 100 arasında atım olur (Bhattarai et al., 2022). Kalp hızı, RR aralıklarının dakikada ne kadar gerçekleştiğine bakılarak hesaplanır. Kalp ritmi ise RR aralığının düzenli olup olmamasıyla değerlendirilir; aralıklar aynı uzunluktaysa ritim düzenlidir (Bhattarai et al., 2022). EKG analizinde Q, R, S, ve U dalgaları ile ST segmenti, PR ve QT aralıkları önemlidir. QRS kompleksi ventriküler depolarizasyonu, T-dalgası repolarizasyonu gösterir. PR aralığı sinyalin atriyumdan ventriküllere geçiş süresini, QT aralığı ise ventriküler aktivite süresini yansıtır. Bu bileşenler kalp ritim bozuklukları ve miyokardiyal enfarktüs gibi kalp sorunlarının tespitinde kullanılmaktadır (Dhakne et al., 2023).

#### **2.4. Atriyal Fibrilasyon**

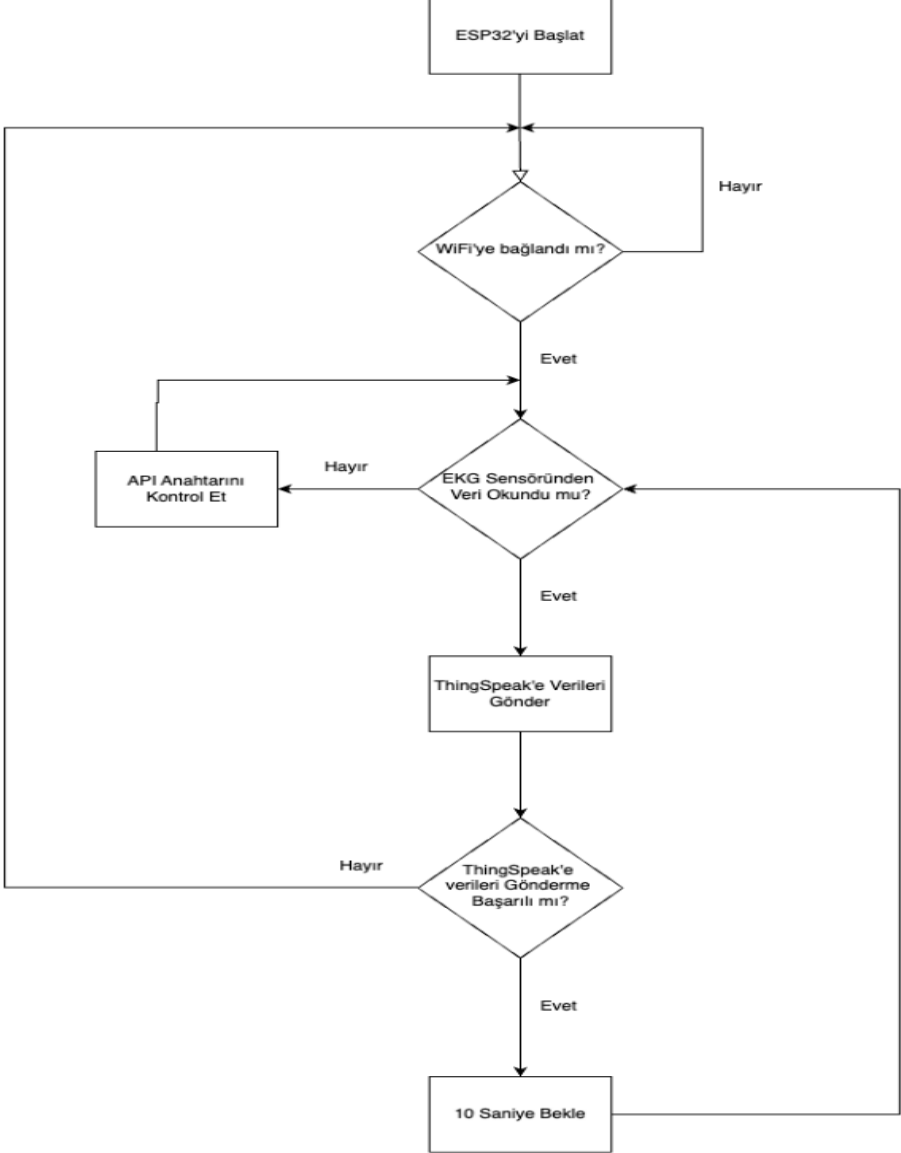
Atriyal fibrilasyon (AF), kalbin atriyum(kulakçık) adı verilen üst odacıklarının düzensiz ve genellikle hızlı bir şekilde kasılması sonucu oluşan bir ritim bozukluğudur. Bu durum, kalbin etkin bir şekilde kan pompalama yeteneğini azaltır ve pıhtı oluşumuna yol açabilir. Pıhtı oluşumu, kişiye kalp yetmezliği ve inme gibi durumlar olmak üzere pek çok sağlık sorununa yol açabilir (Saadi et al., 2023). Atriyal fibrilasyonun belirtileri arasında çarpıntı, yorgunluk, nefes darlığı, baş dönmesi ve göğüs ağrısı bulunabilir. Ancak bazı kişilerde belirti görülmeyebilir. Tedavi seçenekleri arasında yaşam tarzı değişiklikleri, ilaç tedavisi, kateter ablasyonu ve cerrahi müdahaleler yer alır (Clinic, 2024). Atriyal fibrilasyonun nedenleri arasında yüksek tansiyon, kalp hastalıkları, tiroid problemleri, aşırı alkol tüketimi ve genetik faktörler bulunur. Risk faktörlerini yönetmek, sağlıklı bir yaşam tarzı sürdürmek ve düzenli sağlık kontrolleri yaptırmak, AF'nin yönetiminde önemli rol oynar. Bu nedenle ve AF, rutin bir muayene sırasında tespit edilebilir (ClevelandClinic, 2024).

#### **2.5. ThingSpeak**

ThingSpeak, bir IoT analiz platformu hizmeti olarak, bulutta canlı veri akışlarını toplamanıza, görselleştirmenize ve analiz etmenize olanak sağlar. Cihazlarınızdan ThingSpeak'e veri göndererek, canlı verileri anında görselleştirebiliriz. ThingSpeak'in entegre MATLAB analitik araçları sayesinde, veri ön işleme, görselleştirme ve analiz için MATLAB kodu yazabilir ve çalıştırabilirsiniz. Bu özellik sayesinde, mühendisler ve bilim insanları, IoT sistemlerini prototiplemek ve oluşturmak için sunucu kurma veya web yazılımı geliştirme zorunluluğundan kaçınılabirler. Bu projede ThingSpeak'in kullanılmasının amacı, kişilerden alınan EKG verilerinin depolanması ve MATLAB ortamına göndermektir.

## 2.6. Arduino IDE Kullanarak ESP32 geliştirme kartı ile Kod Tasarımı

ESP32 geliştirme kartının kodlaması, Arduino IDE kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Arduino IDE'nin içinde bulunan hazır WiFi kütüphanesi ve ThingSpeak kütüphaneleri, ESP32'nin verileri buluta gönderebilmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. ESP32'nin ThingSpeak ile çalışmasını içeren süreç, EKG verilerinin toplanması, ThingSpeak'e iletilmesi ve bu verilerin bulut üzerinde analiz edilmesi adımlarından oluşur.



Şekil 4: ESP32 için akış şeması

Şekil 4'te akış diyagramı verilen algoritmanın ilk adımı, ESP32 mikrodenetleyicisinin WiFi ağına bağlanmasıyla başlar. Bu bağlantı, ESP32'nin internete erişimini ve verileri ThingSpeak platformuna göndermesini sağlar. WiFi bağlantısı sağlanamazsa, veriler iletilmez. WiFi bağlantısı kurulduktan sonra, ESP32 bağlı olduğu EKG sensöründen veri toplamaya başlar. Toplanan veriler, ThingSpeak platformuna gönderilmek üzere hazırlanır. Bu aşamada, ThingSpeak kanalına erişim sağlamak için gerekli API anahtarı kullanılır. Veriler, ThingSpeak'in belirli bir kanalına yönlendirilir ve burada saklanır. Veri gönderme işlemi başarılı olduktan sonra, ESP32 belirli bir süre bekler. Bu bekleme süresi, veri gönderim sıklığını kontrol etmek ve ThingSpeak kanalının aşırı yüklenmesini önlemek için gereklidir. Bekleme süresi sona erdiğinde, döngü en baştan başlar ve ESP32 yeniden veri toplar.

## 2.7. Long Short-Term Memory Ağları

LSTM ağları, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme ve hatırlama yetenekleri nedeniyle özellikle sıra tahmini problemleri için uygun olan tekrarlayan yapay sinir ağı türüdür. EKG sinyallerinin sınıflandırılması sırasında, zaman serisi verilerinin içerdiği zamansal bağımlılıkları etkili bir şekilde modelleyebilme yetenekleri nedeniyle avantaj sağladığını vurgulamışlardır (Oh et al., 2018).

Çalışmada, ilk olarak sınıflandırma için EKG verileri yüklenir ve normalize edilir, ardından sabit uzunluktaki pencerelere bölünür. Veri seti daha sonra, modelin performansını değerlendirmek için eğitim, doğrulama ve test setlerine ayrılır. Bu aşamada, verilerin eğitim ve test olarak ayrılması, modelin aşırı öğrenmesini önler. Eğitilen model, doğrulama veri seti kullanılarak doğrulanır. Son olarak, model test veri setinde test edilir ve görülmemiş veriler üzerindeki performansı değerlendirilir. Model eğitimi ve değerlendirilmesi tamamlandıktan sonra, EKG sensöründen gelen verilerin sınıflandırılması için kullanılmaya hazır hale gelir.

MATLAB geliştirme ortamında LSTM modelinin nasıl uygulanacağını kodlar adım adım göstermektedir. Verilerin hazırlanması, modelin yapılandırılması, eğitilmesi ve test edilmesi süreçleri detaylı olarak ele alınmıştır. Bu süreçler, farklı kaynaklardan elde edilen kodlar bir araya getirilerek bilimsel bir şekilde yeniden oluşturulmuştur (cixug, 2024; Deep-learning, 2024; Deeplearning, 2024; Mathworks.cn, 2024; Mathworks, 2024; Train-network, 2024).



```

% Dizine git
cd training2017
ref = 'REFERENCE.csv';
tbl = readtable(ref,'ReadVariableNames',false);
tbl.Properties.VariableNames = {'Filename','Label'};
% 'Diğer Ritim' ve 'Gürültülü Kayıt' sinyallerinin silinmesi
toDelete = strcmp(tbl.Label,'O') | strcmp(tbl.Label,'~');
tbl(toDelete,:) = [];
H = height(tbl);
for ii = 1:H
    fileData = load([tbl.Filename{ii},'.mat']);
    tbl.Signal{ii} = fileData.val;
end
cd .....

```

İlk aşamada, PhysioNet 2017 Challenge verileri işlenir ve daha hızlı ve kolay kullanım için bir .mat dosyasına kaydedilir. PhysioNet web sitesinden training2017.zip dosyası indirilir ve çıkarılır. Daha sonra, çıkarılan dizine geçilir ve dosya isimleri ile etiketlerin bulunduğu REFERENCE.csv dosyası okunur. Bu dosyadan bir tablo oluşturularak 'Diğer Ritim' veya 'Gürültülü Kayıt' olarak etiketlenen satırlar tablodan çıkarılır.

```

H = height(tbl);
for ii = 1:H
    fileData = load([tbl.Filename{ii},'.mat']);
    tbl.Signal{ii} = fileData.val;
end
cd ..
% LSTM eğitimi için verilerin formatlanması
% Sinyaller: Predictors'ın hücre dizisi
% Etiketler: Responses'ın kategorik dizisi
Signals = tbl.Signal;
Labels = categorical(tbl.Label);
% 9000 örnekle enterpolasyon
newLength = 9000;
for ii = 1:numel(Signals)
    originalSignal = Signals{ii};
    originalLength = length(originalSignal);
    if (originalLength ~= newLength)

```

```
    Signals{ii} = interp1(1:originalLength, originalSignal, linspace(1,
originalLength, newLength));
    end
end
```

Her bir dosya tabloya yüklenir ve karşılık gelen sinyal verileri tabloya eklenir. Sinyaller, bir hücre dizisinde saklanırken etiketler kategorik bir dizide saklanır ve LSTM eğitimi için uygun bir formata dönüştürülür. Her bir sinyal, sabit bir uzunluk olan 9000 Hz'e ayarlanır

```
% Verileri kategorilere ayırma
normalIdx = find(Labels == 'N');
aFibIdx = find(Labels == 'A');
% Her kategori için istenen örnek sayısı
desiredNormalCount = 4937;
desiredAFibCount = 718;
% Her kategoriden istenen sayıda örneği seçme
rng('default'); % Tekrar üretilebilirlik için
selectedNormalIdx = randsample(normalIdx, desiredNormalCount);
selectedAFibIdx = randsample(aFibIdx, desiredAFibCount);
% Seçilen indeksleri birleştirme
selectedIdx = [selectedNormalIdx; selectedAFibIdx];
% Yeni Sinyaller ve Etiketler dizilerini oluşturma
Signals = Signals(selectedIdx);
Labels = Labels(selectedIdx);
% Değişkenleri bir MAT dosyasına kaydetme
save PhysionetData.mat Signals Labels
% İlk birkaç sinyalin çizimi
normal = Signals{find(Labels == 'N', 1)};
aFib = Signals{find(Labels == 'A', 1)};
figure;
subplot(2,1,1)
plot(normal)
title('Normal Ritim')
ylabel('Genlik (mV)')
xlabel('Örnekler')
subplot(2,1,2)
plot(aFib)
```

```
title('Atrial Fibrilasyon')
ylabel('Genlik (mV)')
xlabel('Örnekler')
```

Daha sonra, veriler normal ve atriyal fibrilasyon (AFib) sinyallerinin indekslerine göre kategorilere ayrılır. Her iki kategori için belirli sayıda örnek rastgele seçilir ve veri seti dengelenir. Bu işlem, veri dengesizliğini önleyerek modelin her iki kategoriyi de eşit derecede öğrenmesini sağlar. İşlenmiş veriler, gelecekte kullanılmak üzere PhysionetData.mat dosyasına kaydedilir. Ayrıca, örnek sinyaller grafik olarak çizilerek verilerin görsel olarak doğrulanması sağlanır.

```
rng("default")
[trainIndA, validIndA, testIndA] = dividerand(length(afibX), 0.8, 0.1, 0.1);
[trainIndN, validIndN, testIndN] = dividerand(length(normalX), 0.8, 0.1,
0.1);
XTrainA = afibX(trainIndA);
YTrainA = afibY(trainIndA);
XTrainN = normalX(trainIndN);
YTrainN = normalY(trainIndN);
XValidA = afibX(validIndA);
YValidA = afibY(validIndA);
XValidN = normalX(validIndN);
YValidN = normalY(validIndN);
XTestA = afibX(testIndA);
YTestA = afibY(testIndA);
XTestN = normalX(testIndN);
YTestN = normalY(testIndN);
XTrain = [repmat(XTrainA, 7, 1); XTrainN];
YTrain = [repmat(YTrainA, 7, 1); YTrainN];
XValid = [repmat(XValidA, 7, 1); XValidN];
YValid = [repmat(YValidA, 7, 1); YValidN];
XTest = [repmat(XTestA, 7, 1); XTestN];
YTest = [repmat(YTestA, 7, 1); YTestN];
layers = [ ...
    sequenceInputLayer(1)
    lstmLayer(50, 'OutputMode', 'last')
    fullyConnectedLayer(2)
    softmaxLayer
];
```

```

options = trainingOptions('adam', ...
    'MaxEpochs', 50, ...
    'MiniBatchSize', 20, ...
    'GradientThreshold', 1, ...
    'Shuffle', 'every-epoch', ...
    'InitialLearnRate', 1e-3, ...
    'ExecutionEnvironment', 'auto', ...
    'plots', 'training-progress', ...
    'Metrics', 'accuracy', ...
    'InputDataFormats', 'CTB', ...
    'ValidationData', {XValid, YValid}, ...
    'Verbose', false, ...
    'OutputNetwork', 'last-iteration');
net = trainnet(XTrain, YTrain, layers, "crossentropy", options);

```

Veriler bu aşamada eğitim, doğrulama ve test setlerine ayrılır ve sınıf dağılımı dengelenir. Bu adımdan sonra, LSTM modelinin mimarisi ve eğitim seçenekleri tanımlanır. Model, eğitim verileri üzerinde eğitilir ve doğrulama seti kullanılarak modelin performansı izlenir. Eğitim tamamlandığında, modelin doğruluk oranı hesaplanır ve bir karışıklık matrisi oluşturularak modelin performansı değerlendirilir.

```

classNames = categories(YTrain);
scores = minibatchpredict(net, XTrain, "InputDataFormats", "CTB");
trainPred = scores2label(scores, classNames);
LSTMAccuracy = sum(trainPred == YTrain) / numel(YTrain) * 100;
figure
confusionchart(YTrain, trainPred, 'ColumnSummary', 'column-normalized',
... 'RowSummary

```

Son olarak, frekans spektrumu ve anlık frekans gibi sinyal işleme teknikleri kullanılarak normal ve AFib sinyallerinin spektral özellikleri analiz edilmektedir. Bu analiz, sinyallerin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesini ve ayırt edici özelliklerin belirlenmesini sağlamaktadır. Frekans spektrumu, sinyalin frekans bileşenlerinin genliklerini ortaya koyarken, anlık frekans, sinyalin zamanla değişen frekans bileşenlerini analiz etmeye olanak tanır.

Bu spektral özelliklerin kullanılmasıyla, yeni bir makine öğrenimi modeli eğitilir ve değerlendirilir. Modelin eğitim sürecinde, spektral analiz sonuçları özellik seti

olarak kullanılarak normal ve AFib sinyalleri arasındaki farklar öğrenilir. Modelin değerlendirilmesi, doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve F1 skoru gibi performans metrikleri ile yapılır. Bu adımlar, sinyal işleme tekniklerinin sağladığı zengin bilgi sayesinde modelin performansının artırılmasına katkıda bulunur. Böylece, AFib tanısında daha güvenilir ve hassas sonuçlar elde edilmesi hedeflenir.

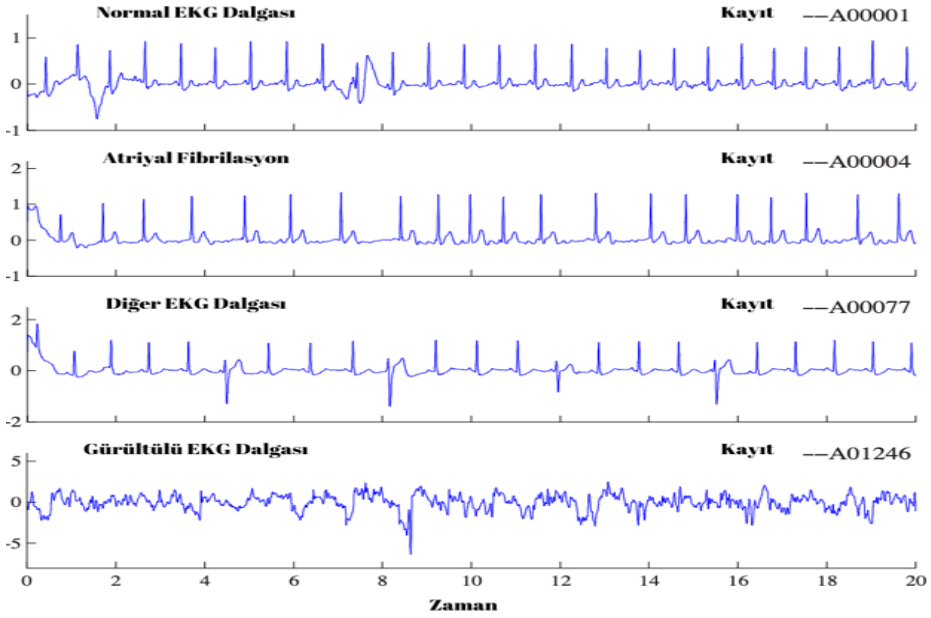
## 2.8. Çalışmamızda Kullanılan Data Seti

Bu çalışmada kullanılan veri seti, PhysioNet platformunda yer alan MIT-BIH Atriyal Fibrilasyon veri setidir. Veri seti, 300 Hz örnekleme frekansına sahip elektrokardiyogram (EKG) sinyallerini içermektedir. Veri setindeki EKG sinyalleri dört ana gruba ayrılmıştır: Normal (N), atriyal fibrilasyonlu (AFib, A), diğer ritimler (O) ve gürültülü kayıtlar (~). Toplamda 8528 EKG kaydı içeren veri setine ait detaylı bilgiler Tablo 1'de sunulmaktadır.

**Tablo 1:** Veri setine ait bilgilendirme

Veri Türü	Tek kanallı kısa ECG kayıtları
Kayıt Uzunluğu	30 ila 60 saniye
Veri Formatı	.mat dosyaları
Sınıflandırma	Normal, Ritmi, Atriyal Fibrilasyon (AF) Diğer Ritim
<b>Veri Kaynakları</b>	Çeşitli yaş ve sağlık durumundaki bireylerden toplanan ECG kayıtları
Veri Türü	Tek kanallı kısa ECG kayıtları
Kayıt Uzunluğu	30 ila 60 saniye

Şekil 5'te veri setindeki bir EKG sinyalinin grafiksel temsili verilmektedir (Johnson et al., 2017). Bu veri seti, atriyal fibrilasyon tanısı konulan bireyler üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen EKG kayıtlarını içermekte olup, farklı kalp ritimlerinin spektral analizler yoluyla incelenmesi ve sınıflandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu sayede, normal ve patolojik kalp ritimleri arasındaki spektral farklılıklar detaylı bir şekilde incelenerek, atriyal fibrilasyonun otomatik tespiti için kullanılacak makine öğrenimi modelleri geliştirilmiştir.



**Şekil 5:** Kullanılan veri setinden EKG örnekleri (Johnson et al., 2017)

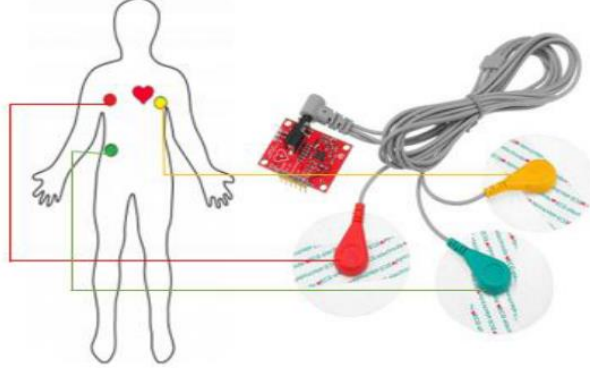
## 2.9. ESP32 Geliştirme Kartı

ESP32, sinyallerin iletilmesi amacıyla kullanılır. ESP32, IoT projeleri için ideal bir modül olan WiFi ve Bluetooth özelliklerini bünyesinde barındırır. AD8232'den gelen sinyal, ESP32'nin WiFi modülü sayesinde ThingkSpeake'e gönderilmektedir (ESP32 Series, 2024). ESP32'nin kapsamlı GPIO pinleri, AD8232 gibi sensörlerle kolay entegrasyon ve ek sensörler veya bileşenler ekleyebilme esnekliği sağlamaktadır. Dahili anten anahtarı, filtreler, güç amplifikatörü ve güç yönetim modülleri, projenin stabil ve güvenilir çalışmasına katkıda bulunmuştur. ESP32, mobil cihazlar, IoT ve giyilebilir teknoloji uygulamaları için tasarlanmış olup, güçlü işlemci kapasitesi ve çift çekirdekli yapısı sayesinde AD8232'den gelen ham EKG verilerini hızlı ve verimli bir şekilde işlemiştir. Ayrıca, düşük enerji tüketimi sayesinde proje taşınabilir ve uzun süreli kullanıma uygun hale gelmiş, bu da giyilebilir teknoloji uygulamaları için büyük avantaj sağladığını vurgulamaktadır (Mishra et al., 2018).

## 2.10. AD8232 EKG Sensörü

AD8232, biyomedikal sinyal işleme için tasarlanmış yüksek performanslı bir EKG amplifikatörü ve analog ön işleme entegresidir. Hastanın kalp ritmini belirli bir süre boyunca ölçer ve bu süre içinde kalbin elektriksel aktivitelerini kaydeder. Sensör, hastanın kalp aktivitesini hassas bir şekilde kaydettikten, bu verileri işlenmek ve analiz edilmek için ESP32 aracılığıyla doğrudan buluta gönderir

(Rahman et al., 2021). Şekil 6’da bir hastanın vücudundan EKG sinyalinin nasıl çıkarıldığını gösterilmektedir (Rahman et al., 2021). Çalışmamızın prototipinden sinyalleri elde etmek için bizler de aynı şekilde bağlantılar yapmış bulunmaktayız.



Şekil 6: AD8232 EKG sensörü vücut ile bağlantısı

## 2.11. İmplementasyon

Uygulanan donanım uygulamasının resmi Şekil 7’de gösterilmektedir. Bağlantı şemasının verileri Tablo 2’de verilmektedir (Mishra et al., 2018). ESP32 sistemin ana bileşeni, AD8232 ise verilerin alındığı sensördür.



Şekil 7 : EKG Sensörü ve ESP32 Bağlantısı

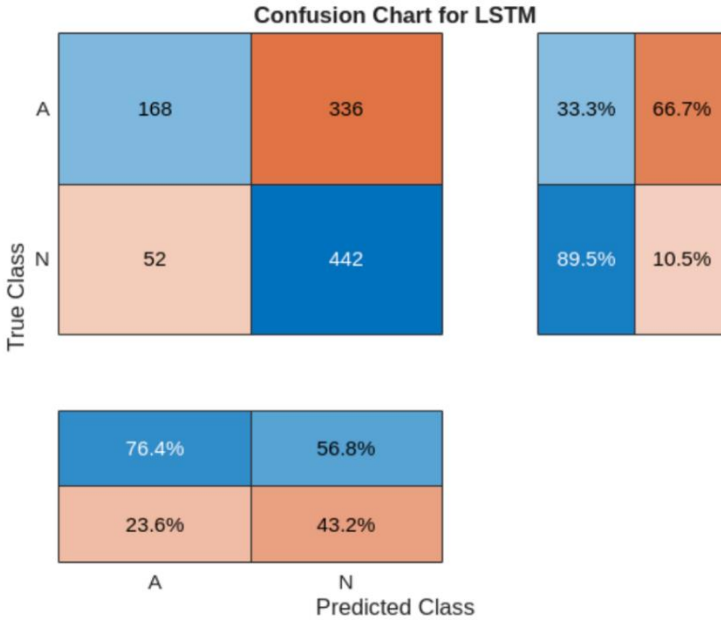
Tablo 2: ESP32 ve AD8232 bağlantı şeması

AD8232 Pinleri	Görevleri	ESP32 Pinleri
GND	Topraklama	GND
3.3 V	Güç Kaynağı	3.3v
OUTPUT	Çıkış Sinyali	A0
LO-	Elektrot Çıkışı Algılandı -	17
LO+	Elektrot Çıkışı Algılandı +	16
SDN	Kapatma	Kullanılmıyor

### 3. PROJENİN ÇALIŞTIRILMASI VE ALINAN SONUÇLAR

Bu çalışmada geliştirilen ESP32 tabanlı taşınabilir EKG izleme sistemi, kalp anormalliklerinin erken tespiti ve gerçek zamanlı uyarı mekanizmalarıyla sağlık izleme alanına önemli katkılar sağlamaktadır. Sistem, düşük maliyetli, taşınabilir ve yüksek doğruluk oranlarına sahip bir çözüm sunmakta olup, LSTM modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar EKG verilerinin analizinde yüksek performans sergilemektedir. Gerçek zamanlı veri iletimi ve analiz imkânı sunan sistem, sağlık izleme sistemlerinin etkinliğini artırmaktadır. Çalışmamız, taşınabilir ve düşük maliyetli bir EKG izleme sistemi geliştirilmesi için önemli bir adım olup, sağlık izleme teknolojilerinin gelecekteki gelişimine ışık tutmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kalp anormalliklerinin erken tespiti ve hızlı müdahale imkânı sağladığını göstermektedir. Bu bulgular, sistemin pratik kullanım potansiyelini vurgulamakta ve sağlık izleme sistemleri için önemli bir katkı sunmaktadır.

#### 3.1. Makine Öğrenmesiyle Karışıklık Matrisi Analizi



Şekil 8: Makine Öğrenmesiyle elde edilen karışıklık matrisi

Şekil 8'de, yapılan eğitim ve test sürecinin sonuçlarına ilişkin karışıklık matrisi verilmektedir. Çalışmamızda, hedef sınıf sinyalin doğru sınıf etiketini, çıkış sınıfı ise ağ tarafından sinyale atanan etiketi ifade eder. Eksen etiketleri AFib (A) ve Normal (N) sınıflarını temsil etmektedir.



Karışıklık matrisine göre:

Atrial fibrilasyonun saptanmasında 168 örnek doğru bir şekilde A olarak, 336 örnek ise yanlış bir şekilde N olarak tahmin edilmiştir.

Normal EKG'lerin saptanmasında ise 442 örnek doğru bir şekilde N olarak, 52 örnek ise yanlış bir şekilde A olarak tahmin edilmiştir.

**Tablo 3:** Karışıklık matrisi

Gerçek Sınıf \ Tahmini Sınıf	A(Tahmin)	N(Tahmin)
A(Gerçek)	168	336
N(Gerçek)	52	442

**Tablo 4:** Yüzdesel karışıklık matrisi

Gerçek Sınıf \ Tahmini Sınıf	A(Tahmin)	N(Tahmin)
A(Gerçek)	%33.3	%66.7
N(Gerçek)	%10.5	%89.5

**Tablo 5:** Genel performans metrikleri

Sınıf	Doğru Tahmin Oranı(%)	Yanlış Tahmin Oranı(%)
A	%76.4	%23.6
N	%56.8	%43.2

Tablo 4 ve Tablo 5'teki veriler, EKG izleme sisteminin performansını değerlendirmek için önemli bilgiler sunmaktadır. Tablo 4'teki yüzdesel karışıklık matrisi, sistem tarafından yapılan tahminlerin gerçek sınıflarla karşılaştırılmasını sağlar. Örneğin, A sınıfı için %33.3'lük bir doğru tahmin oranı olduğu gözlemlenirken, N sınıfı için %89.5'lik bir doğru tahmin oranı bulunmaktadır. Bu, sistemin Normal sınıfını daha doğru bir şekilde tanımladığını gösterirken, A sınıfı için daha iyileştirilmiş tahminlerin gerektiğini öne sürmektedir. Tablo 5'teki genel performans metrikleri, sistem tarafından doğru ve yanlış tahmin edilen oranları özetler. Örneğin, A sınıfı için %76.4'lük bir doğru tahmin oranı ve %23.6'lık bir yanlış tahmin oranı elde edilmiştir. Bu, sistemin A sınıfını doğru bir şekilde belirlemede oldukça etkili olduğunu, ancak hala iyileştirme alanları bulunduğunu gösterir. Benzer şekilde, N sınıfı için %56.8'lik bir doğru tahmin oranı ve %43.2'lik bir yanlış tahmin oranı elde edilmiştir, bu da sistemin Normal sınıfını tanımlamada daha az etkili olduğunu ve iyileştirmeye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Bu veriler, sistem performansının daha da geliştirilmesi ve kalp anormalliklerinin daha doğru bir şekilde teşhis edilmesi için stratejilerin geliştirilmesinde değerli bir kaynak olabilir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu araştırma, geliştirilen ESP32 tabanlı taşınabilir EKG izleme sisteminin, kalp anormalliklerinin erken tespiti ve gerçek zamanlı uyarı mekanizmalarıyla sağlık izleme alanında önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. Sistem, düşük maliyetli, taşınabilir ve yüksek doğruluk oranlarına sahip bir çözüm sunmakta olup, LSTM modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar EKG verilerinin analizinde yüksek performans sergilemektedir. Gerçek zamanlı veri iletimi ve analiz imkânı sunan bu sistem, sağlık izleme sistemlerinin etkinliğini artırmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kalp anormalliklerinin erken tespiti ve hızlı müdahale imkânı sağladığını göstermektedir, bu da sistemin pratik kullanım potansiyelini vurgulamakta ve sağlık izleme sistemleri için önemli bir katkı sunmaktadır. Makine öğrenmesi tabanlı EKG izleme sistemi, kalp hastalıklarının erken teşhisi konusunda önemli bir adım atmaktadır. Geliştirilen ESP32 tabanlı taşınabilir sistem, düşük maliyetli, taşınabilir ve yüksek doğruluk oranlarına sahip bir çözüm sunmakta ve IoT teknolojisinin entegrasyonu ile, hastaların sürekli izlenmesi ve kardiyovasküler sağlığın etkin bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma, makine öğrenmesi ve IoT teknolojilerinin bir araya gelerek, sağlık izleme sistemlerindeki potansiyelini ortaya koymaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abdioğlu, S., Acar, B., & Kavsaoğlu, A. R. (2021). Kablosuz EKG Cihazı Tasarımı ve Sinyal İşleme Teknikleri Kullanılarak Özniteliklerin Değerlendirilmesine Yönelik Web Sitesi Tasarımı. *European Journal of Science and Technology*, 144–150. <https://doi.org/10.31590/ejosat.951988>
- Alpaydin, E. (2020). *Introduction to Machine Learning (Fourth bas.)*. MIT. ss. xix, 1-3, 13-18. ISBN 978-0262043793.
- Bhattarai, C., Yadav, S. K., & Koirala, S. (2022). IoT Based ECG Using AD8232 and ESP32. *Nepal Journal of Science and Technology*, 21(2), 115–121. <https://doi.org/10.3126/njst.v21i2.62361>
- Chow, G. V., Marine, J. E., & Fleg, J. L. (2012). Epidemiology of Arrhythmias and Conduction Disorders in Older Adults. *Clinics in Geriatric Medicine*, 28(4), 539–553.
- cixug. (2024). <https://www.cixug.gal/?lang=en>, Submitted to Consorcio CIXUG, (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- ClevelandClinic. (2024). Cleveland Clinic, “Atrial Fibrillation (AFib): Symptoms, Causes and Treatment,” Cleveland Clinic. Erişim: 17 Mayıs 2024. <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/16749-atrial-fibrillation-afib>.
- Clinic, M. (2024). Mayo Clinic, “Atrial fibrillation,” Mayo Clinic. Available: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/atrial-fibrillation/symptoms-causes/syc-20350624>. Accessed: May 17, 2024.
- Deep-learning. (2024). *Time Series Forecasting Using Deep Learning*, MathWorks. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/time-series-forecasting-using-deep-learning.html>, (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- Deeplearning. (2024). *Long Short-Term Memory Networks*, MathWorks. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/long-short-term-memory-networks.html>, (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- Dhakne, D., Bhongale, J., & Gawande, G. (2023). IOT Based Portable ECG Monitoring Device for Smart Ealthcare. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technologh Nad Science*, 8239, 8239–8247. [www.irjmets.com](http://www.irjmets.com)
- Diker, A., Avci, E., Tanyildizi, E., & Gedikpinar., M. (2020). A novel ECG signal classification method using DEA-ELM. *Med Hypotheses*, 136, 109515, Doi: 10.1016/J.MEHY.2019.109515.
- ESP32 Series. (2024). *ESP32 Series Datasheet 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth ® + Bluetooth LE SoC Including*, (Erişim Tarihi:12.04.2024). [www.espressif.com](http://www.espressif.com)
- Freedomfreak. (2024). <https://freedomfreak.substack.com/>, (Erişim Tarihi:11.05.2024).
- Janiesch, C., Zschech, P., & Heinrich, K. (2021). *Machine learning and deep*

- learning*. 685–695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>/Published
- Johnson, A. E. W., Mark, R. G., Celi, L. A., & Pollard, T. J. (2017). *PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2017, PhysioNet*. Available: <https://physionet.org/content/challenge-2017/1.0.0>.
- Kandaz, D. (2023). Yapay Zekâ Tabanlı Elektrokardiyografi Sinyali ile Kan Basıncı Tespiti. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 1–124.
- Li, Y., Qu, Q., Wang, M., Yu, L., Wang, J., Shen, L., & He, K. (2020). Deep learning for digitizing highly noisy paper-based ECG records. *Computers in Biology and Medicine*, *127*(October), 104077. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.104077>.
- Liaquat, S., Dashtipour, K., Zahid, A., Assaleh, K., Arshad, K., & Ramzan, N. (2020). Detection of Atrial Fibrillation Using a Machine Learning Approach. *Information (Switzerland)*, *11*(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/info11120549>
- Mathunjwa, B. M., Lin, Y. T., Lin, C. H., Abbod, M. F., & Shieh, J. S. (2021). ECG arrhythmia classification by using a recurrence plot and convolutional neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, *64*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102262>
- Mathworks.cn. (2024). <https://ww2.mathworks.cn/>, (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- Mathworks. (2024). *Classify ECG Signals Using Long Short-Term Memory Networks*, MathWorks, <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/classify-ecg-signals-using-long-short-term-memory-networks.html> , (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- Mishra, A., Chakraborty, B., Bose, P., Das, D., & Students, U. G. (2018). *AD8232 based Smart Healthcare System using Internet of Things (IoT)*. [www.ijert.org](http://www.ijert.org)
- Oh, S. L., Ng, E. Y. K., Tan, R. S., & Acharya, U. R. (2018). Automated diagnosis of arrhythmia using combination of CNN and LSTM techniques with variable length heart beats. *Computers in Biology and Medicine*, *102*, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2018.06.002>
- Prasad, A. S., & Kavanashree, N. (2019). ECG Monitoring System Using AD8232 Sensor. *Proceedings of the 4th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2019)*, 976–980.
- Rahman, M. A., Li, Y., Nabeed, T., & Rahman, M. T. (2021). Remote monitoring of heart rate and ECG signal using ESP32. *Proceedings - 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, AEMCSE 2021*, 604–610. <https://doi.org/10.1109/AEMCSE51986.2021.00127>
- Rizwan, A., Zoha, A., Mabrouk, I. Ben, Sabbour, H. M., Al-Sumaiti, A. S.,

- Alomainy, A., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2021). A Review on the State of the Art in Atrial Fibrillation Detection Enabled by Machine Learning. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 14, 219–239. <https://doi.org/10.1109/RBME.2020.2976507>
- Saadi, H., Ferroukhi, M., Elghandja, Y. L., & Lahmari, F. (2023). Low-Cost ECG Monitoring System with Classification Using Deep Learning. *2023 International Conference on Advances in Electronics, Control and Communication Systems, ICAECCS 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICAECCS56710.2023.10104707>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Artificial intelligence, machine learning and deep learning in advanced robotics, a review. In *Cognitive Robotics* (Vol. 3, pp. 54–70). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001>
- Train-network. (2024). *Train Network with LSTM Projected Layer, MathWorks*. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ug/train-network-with-lstm-projected-layer.html>, (Erişim Tarihi:05.04.2024).
- Wegner, F. K., Plagwitz, L., Doldi, F., Ellermann, C., Willy, K., Wolfes, J., Sandmann, S., Varghese, J., & Eckardt, L. (2022). Machine learning in the detection and management of atrial fibrillation. In *Clinical Research in Cardiology* (Vol. 111, Issue 9, pp. 1010–1017). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00392-022-02012-3>
- Wikipedia. (2024). [https://tr.wikipedia.org/wiki/Makine\\_%C3%B6%C4%9Frenimi#cite\\_note-Alpaydin2020-9](https://tr.wikipedia.org/wiki/Makine_%C3%B6%C4%9Frenimi#cite_note-Alpaydin2020-9), (Erişim Tarihi:10.05.2024).
- Wilkins, E., Wilson, L., Wickramasinghe, K., Bhatnagar, P.; Leal, J., Luengo-Fernandez, R., & Townsend, N. (2017). European Cardiovascular Disease Statistics. *European Heart Network: Brussels, Belgium, 2017*. Available Online: <Http://Www.Ehnheart.Org/Images/CVD-Statistics-Report-August-2017.Pdf>.
- Xia, Y., Wulan, N., Wang, K., & Zhang, H. (2018). Detecting atrial fibrillation by deep convolutional neural networks. *Computers in Biology and Medicine*, 93, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.12.007>
- Zompanti, A., Sabatini, A., Grasso, S., Pennazza, G., Ferri, G., Barile, G., Chello, M., Lusini, M., & Santonico, M. (2021). Development and test of a portable ecg device with dry capacitive electrodes and driven right leg circuit. *Sensors*, 21(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s21082777>

## **Bölüm 3**

### **Yumuşak Sediment Deformasyonu**

**Calibe KOÇ TAŞGIN<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.; Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Bölümü.  
[calibekoc@firat.edu.tr](mailto:calibekoc@firat.edu.tr), ORCID No: 0000-0002-5439-7379

## ÖZET

Yumuşak sediment deformasyon, sedimanter tabakaların bozulması, depolanma sırasında veya sediment taşlaşmaya başladığı zaman ki herhangi bir anda oluşabilir ve yeni çökelmiş sediment tabakasının fabrik ve tabakaların değişmesi için kullanılan bir terimdir. Bu yapılar; deformasyon mekanizmasına göre; genel olarak sediment duraysızlığı, sıvılaşma, akışkanlaşma (akıcı hale gelme) ve yükleme şeklinde gruplandırılmıştır. Sediment duraysızlığı nedeniyle oluşan yapılar kayma-oturma yapıları ve büyüme fayları, sıvılaşma ile oluşan yapılar konvolüt laminasyon ve ters dönmüş çapraz tabakalanma, akışkanlaşma ile oluşan yapılar klastik dayklar ve kum volkanları, yükleme ile ilişkili yapılar yük kalıpları-alev yapıları ve diyapirik yapılar olarak sınıflandırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yumuşak sediment deformasyon yapıları, deformasyon mekanizması, sediment duraysızlığı, sıvılaşma, akışkanlaşma, aşırı yükleme

## GİRİŞ

Sedimentler genellikle tabakalı olarak çökler. Depolanma sırasında; çapraz tabakalanma, dalga ripilı veya yatay laminasyon oluşur. Bunlar birincil sedimanter yapılar olarak bilinirler. Eğer sediment yumuşaksa orijinal tabakalanma ve bu sedimanter yapılar su hareketi ve gravite ile ilişkili etkilerle değişikliğe uğrayabilir. Sedimanter tabakaların bozulması, depolanma sırasında veya sediment taşlaşmaya başladığı zaman ki herhangi bir anda oluşabilir. Yumuşak sediment deformasyon, yeni çökelmiş sediment tabakasının fabrik ve tabakaların değişmesi için kullanılan bir terimdir. Deformasyon yapıları yoğunluk farkı sonucu sediment duraysızlığı ve sediment boyunca gözenek suyu hareketine bağlı olarak oluşur.

Sediment, denizel ortamda çökeldiği zaman suya doygundur ve birçok kıtasal çökel yeraltı suyu ile doygundur. Gömülme, eğer su geçirimsiz bir tabaka ile sınırlı değilse, gözenek suyunun kademeli bir şekilde çıkmasına neden olur. Geçirimsiz tabaka ile sınırlı olan su, burada basınç altındadır ve üzerleyen tabakada bir çatlak oluştuğu zaman, akışkanın yukarıya doğru yüksek bir hızla akmasına sebep olur (Leeder, 1999). Hızlı bir şekilde hareket eden gözenek suyu, sedimentin akıcı hale gelmesine (fluidization) neden olur ve sediment de hareket eden su ile birlikte yukarıya doğru taşınır. Böylece ince kum kaba kumdan ayrılarak akışkan ile uzaklara taşınır ve ayırma işlemi oluşur. Sıvılaşma, kısa süreli prosesler olup, suya doymuş sediment kütlesi, örneğin deprem gibi bir şokla etkilendiği zaman oluşur ve bir anlık vizkoz bir akışkan gibi davranan sıvı haline gelir. Yumuşak çökel deformasyon çeşitli boyutlarda ve değişik şekillerde oluşur ve depolanmadan sonra kalan su ile su altında oluşan herhangi bir sedimentte oluşabilir. Bu yapılar; deformasyon mekanizmasına göre oluşumları; genel olarak sediment duraysızlığı, sıvılaşma, akışkanlaşma (akıcı hale gelme) ve yükleme şeklinde gruplandırılmıştır (Nichols, 2013).

### 2.1. Sediment Duraysızlığı Nedeniyle Oluşan Yapılar

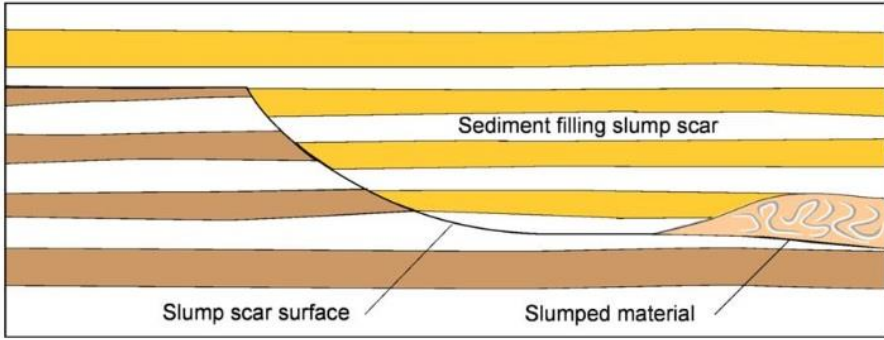
#### 2.1.1. Kayma-oturma yapıları ve kayma-oturma izi

Kayma-oturma yapıları ve kayma-oturma izleri (Şekil 2.1 ve 2.2) sediment istifinde gravite ile ilişkili dengesizlik sonucu oluşur. Bir sediment kütlesi yamaçta çökeldiğinde duraysızdır. Eğer deprem veya daha fazla sedimentin ani bir gelimi ile oluşan şoka maruz kalırsa, sediment istifi içerisindeki yüzeylerde bir dengesizlik (kopma, kırılma) oluşabilir ve bu durum sedimanın kayıp oturmasına neden olur. Kaymış tabakalar, tabakalar içerisine doğru yerleşir ve tipik olarak antiklinalin büklüm kısmı yamaç aşağı yönü işaret edecek şekilde kıvrım yapısı gösterir. Kayıp oturmuş sediment uzaklaştığı zaman kalan yüzey kayma-oturma izi (slump scar) dir. Bu yüzey, devam eden sedimantasyon bu alanı doldurması ile korunur. Stratigrafik kayıtlarda kayma-oturma izi üç boyutta kaşık şekilli yüzeyler olarak tanınır ve



boyutu birkaç metreden yüzlerce metreye kadar değişir. Bu yapılar delta çökellerinde yaygındır fakat yamaçta çökelen herhangi bir materyal içerisinde oluşabilir (Nichols, 2013). Büyük ve küçük ölçekli kayma-oturma yapıları bir çok ortamda (Koç, 2002; Koç-Taşgın 2009; Koç-Taşgın, 2011, Koç-Taşgın vd., 2011, Koç-Taşgın, 2017; Koç-Taşgın ve Diniz-Akarca, C., 2018, Koç-Taşgın ve Altun, 2019) tanımlanmış ve farklı tetikleme mekanizmaları ile oluşmuştur.

Koç (2002) tarafından tanımlanan kayma-oturma yapıları Suluova (Amasya) kuzeyinde Armutlu Formasyonu'na ait lagün fasiyes topluluğu içerisinde yer alan kömür tabakaları ile aridalanmalı organik malzemeli çamurtaşlarında gözlenmiştir (Şekil 2.3).



**Şekil 2.1.** Tabaka içerisindeki duraysızlık nedeniyle oluşan kayma-oturma, hareketin oluştuğu yüzeydeki kayma-oturma izi (slump scar) (Nichols, 2013).



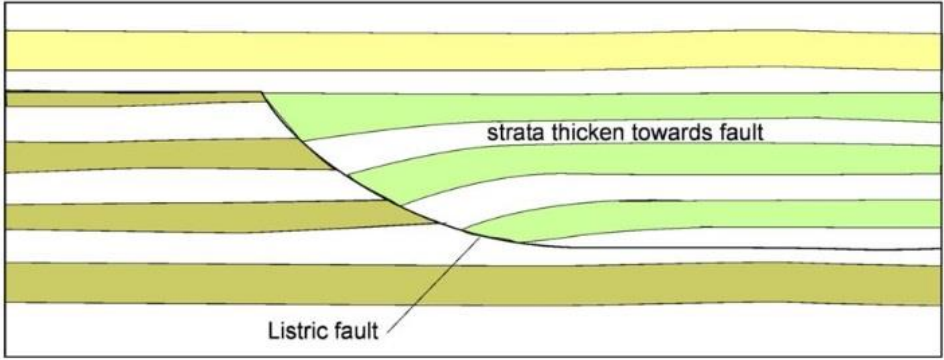
**Şekil 2.2.** Farklı açılarda gözlenen tabakalar, tabakaların dönmesi ile kayma-oturma sonucu oluşur (Nichols, 2013).



**Şekil 2.3.** Küçük ölçekli kayma-oturma yapıları. Kömür tabakaları ile ardalanmalı organik malzemeli çamurtaşları (Koç, 2002)

### **2.1.2. Büyüme Fayları**

Nisbi yer değiştiriminin olduğu yer boyunca sedimanter istif içerisindeki yüzeylere sahip kayma-oturma izleri ve büyüme fayları arasında proses ve çökel devamlılığı vardır. Büyüme fayları, sinsedimanter yapılar olarak tanımlanır. Yani bu yapılar tabakanın paketlenmesi sırasında oluşur. Bu yapılar delta önü ortamlarında yaygındır. Delta ortamında depolanma yamacı ve delta önünün üzerine ağız barı kumlarının gelmesi ve delta önü çamurları istif içerisinde graviteye bağlı duraysızlığa neden olabilir (Collinson 2003; Collinson vd., 2006). Zayıf zonlarda yenilme oluşur ve sedimanter istif içerisinde kaşık şekilli fayın oluşması için yukarıya doğru yayılır (Şekil 2.4.). Eğimli fay yüzeyi üzerindeki tabakaların hareketi tabakaların özel rotasyonu ile sonuçlanır. Büyüme fayları, depolanma sonrası faylanmadan ayrılabilir. Çünkü burada tek bir fay istifin sadece bir bölümünü etkiler. Üzerleyen tabakaları etkilemez.



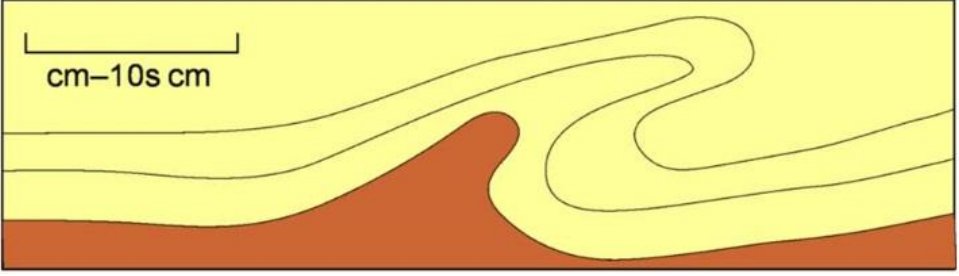
**Şekil 2.4.** Sedimentasyon sırasında büyüme faylarının oluşumu, Faya doğru kalınlaşan tabakalar çökme sırasında faydaki hareketi izler (Nichols, 2013).

## 2.2. Sıvılaşma ile Oluşan Yapılar

### 2.2.1. Konvolüt Tabakalanma ve Konvolüt Laminasyon

Sedimentlerdeki tabakalanma, sedimanın lokal ve küçük ölçekli sıvılaşmasıyla depolanma sırasında veya sonrasında bozulabilir. Bu yapılar bir çapraz tabakanın önemsiz miktarda dikleşmesinden konvolüt laminasyon ve konvolüt tabakalanma olarak bilinen çok kıvrımlı ve büklümlü tabakaların gelişmesine kadar bir aralıkta gözlenir. Bu yapılarda sediment ya küçük açılı bir yamaçta çöktüğünde veya üzerleyen akışkanın akışı ile sedimentlerde bir makaslama gerilmesi ile oluşturulur (Collinson 2003). Bu kıvrımlar asimetrik olup, kıvrımın büklüm yaptığı kısmı akış yönünde veya yamaç aşağısını gösterir. Konvolüt laminasyon özellikle türbiditlerde yaygındır ve burada tabakaların laminalı ve çapraz laminalı bölümleri içerisinde görülebilir (Şekil 2.5 ve 2.6).

Koç (2002) tarafından tanımlanan konvolüt laminasyon Suluova (Amasya) kuzeyinde Armutlu Formasyonu'nda kıyı ötesi-geçiş fasiyes topluluğu içerisinde yer alan paralel laminalı kumtaşlarında gözlenmiştir. Paralel laminalı kumtaşlarının üst seviyesinde yer alan konvolüt laminasyon 40 cm kalınlığa sahip olup yanal yönde bir dizi ardalanmalı atiklinal ve senklinal şekilde büklümlerden oluşur (Şekil 2.7).



**Şekil 2.5.** Çökellerde lokal sıvılaşma sonucu oluşan konvolüt laminasyon ve konvolüt tabakalanma (Nichols, 2013).



**Şekil 2.6.** İnce tabakalı kumtaşı ve çamurtaşı içerisinde gözlenen konvolüt laminasyon (Nichols, 2013).



**Şekil 2.7.** Konvolüt laminasyon. Paralel laminalı kumtaşlarını etkilemiştir. Armutlu Formasyonu (Koç, 2002).

### **2.2.2. Ters Dönmüş Çapraz Tabakalanmalar**

Su altındaki kumulların yüksek eğimli yamaçlarından aşağıya çığ halinde depolanan kumlar gevşek bir şekilde paketlenmiştir ve suya doymuştur. Bunlar kolay bir şekilde sıvılaşır ve çapraz tabaka setlerinin üzerinde kuvvetli akıntılar tarafından sebep olan makaslama gerilmesi ile deforme olabilir. Çapraz tabakaların üst bölümündeki makaslama, yatık çapraz tabakalanma veya ters dönmüş çapraz tabakalama olarak bilinen özel bir şekil oluşturur (Şekil 2.8).

Bu yapı Koç-Taşgın (2009), Koç-Taşgın ve Türkmen (2009) tarafından Elazığ ili doğusunda Çaybağı Formasyonu'nda tanımlanmıştır. Ziyaret Tepe ölçülü kesitinde gözlenen basit yatık kıvrımlar asimetrik özellikte olup, orta taneli tüflü kumtaşları içerisinde tanımlanmıştır.



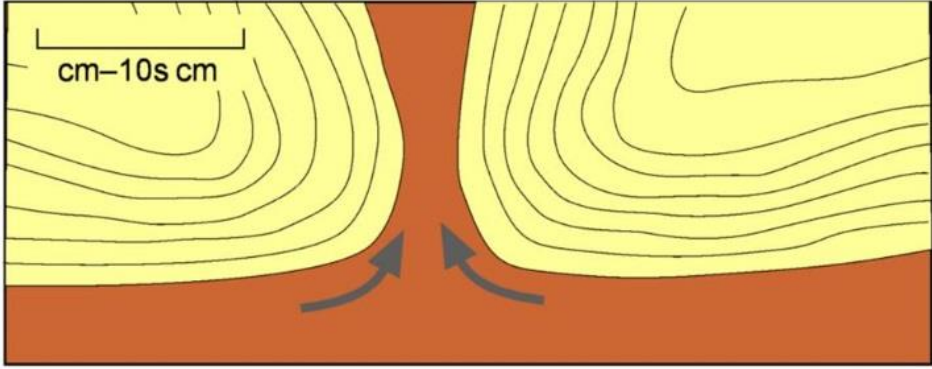


**Şekil 2.8.** Kumtaşı tabakalarında gözlenen ters dönmüş çapraz tabakalanma (Nichols, 2013).

## **2.3. Akışkanlaşma (Fluidization) Nedeniyle Oluşan Yapılar**

### **2.3.1. Tabak ve Sütun Yapıları**

Akışkanlaşma prosesi ile oluşan yumuşak çökel deformasyon yapıları su kaçma yapısı olarak tanımlanır. Bu yapılar bir tabakadan gözenek suyunun çıkması sonucu oluşur. Tabak yapıları sediment içerisindeki tabakalanmayı konkav bir şekilde etkiler. Enine kesitte boyutları birkaç santimetre ile onlarca santimetre arasında değişir. Akışkanın yukarıya doğru hareketi ile oluşur (Leeder, 1999; Collinson vd., 2006). Bu yapılar ince kil laminaları ile kendini gösterir. Bu kil laminaları sediment içerisinde akışkan hareketine lokal bariyer oluşturur. Tabak yapıları plan görünüşte poligonol şekiller oluşturur. Sütun yapıları düşey su kaçma kanallarıdır. Basit tüp veya düşey yaygı benzeri şekle sahiptir. Her ne kadar bu yapılar ayrı ayrı oluşsa da sık sık birlikte oluşabilirler.



**Şekil 2.9.** Alttaki tabakadaki suyun hareketi su kaçma yapılarının oluşumu ile sonuçlanır (Nichols, 2013).

### 2.3.2. Klastik Dayklar

Yeraltındaki büyük boyutlu sedimentlerin akışkan hale gelmesi, sedimentlerin yıkanarak ayrılmasına ve santimetreden onlarca santimetre boyutuna kadar düşey klastik dayk oluşumuna neden olabilir. Bu tabakaya benzeyen düşey yapılar (Klastik dayklar) tipik olarak ince kumlardan oluşur ve diğer tabakaları çapraz olarak kesmektedir. Bu yapılar, bir tabaka üzerinde aşırı yük meydana geldiğinde ve çatlak içerisine sedimentle birlikte gözenek suyunun hızlıca yukarıya doğru taşınması ile şekillenmektedir. Kum, daykın duvarlarına paralel bazı tabakalanmalar gösterebilir ama aksi takdirde yapısızdır.

Klastik dayklar ve çatlak dolguları arasındaki en belirgin ayırt edici özelliklerden biri aşağıya doğru enjekte edilmeleridir ve altındaki tabakalar içerisindeki çatlaklar ve yarıklar üzerindeki boşlukları doldurdukları için “çatlak dolguları” olarak isimlendirilmektedir. Yarık dolguları, deprem aktiviteleri sebebiyle oluşan kırıklarda yada karstik boşlukların oluşumu içerisinde açılan erime boşluklarında oluşabilirler. Yarık dolguları klastik dayklardan genellikle ayırt edilebilir. Çünkü bu yapılar aşağıya doğru gittikçe inceler, kırıntı boyutunda taneler ile dolabilir (yaygın olarak breş) ve bu depremle bağlantılı olabilir. Bu tarz yarık dolgularına geçmişte “Neptüniyen daykı” ismi kullanılırdı.

### 2.3.3. Kum volkanları ve dışarıya atılan yaygılar

Sıvılaşmış (yumuşak) sediment, izole olmuş sütun şeklindeki boşluklardan yukarıya doğru hareketle yüzeye çıkması sonucunda birkaç on santimetreden metre boyutuna kadar küçük kum volkanları meydana gelmektedir (Leeder, 1999; Collinson vd., 2006). Yüzey üzerinde kumun bu şekli yalnızca düşük enerjili akıntı koşullarında korunabilir. Klastik dayklar vasıtasıyla yüzeye çıkan kum ayrıca yüzey üzerinde yayılabilir, genellikle kumlu sedimentlerin içerisinden dışarıya atılmış

yaygıllardır (Şekil 2.10). Bu yaygıları, alttaki dayk ile bağlantısı kurulamıyorsa tanımak zor olabilir. Bu tarz sokulumlar kum silleri şeklinde şekillendirilebilir ve isimlendirilebilir ama teşhis edilmesi zor olabilir (Nichols, 2013).

Kum volkanları, Koç-Taşgın (2009) tarafından Elazığ ili doğusunda Çaybağı Formasyonu'nda tanımlanmıştır. 10 cm çapında 3 cm yüksekliğinde, içerisinde küçük bir krater olan kum volkanı delta önü çökellerinin tüflü kumtaşlarında gözlenmiştir. Sediman içerisinde yukarıya doğru lokal bir su –sediman karışımının hareketinin sonucu olarak oluşur (Owen, 1995).



**Şekil 2.10.** Kum volkanı, kum su ile birlikte yukarıya doğru hareket ederek tabaka yüzeyinde kum volkanını oluşturuyor (Nichols, 2013).

## 2.4. Yükleme ile İlişkili Yapılar

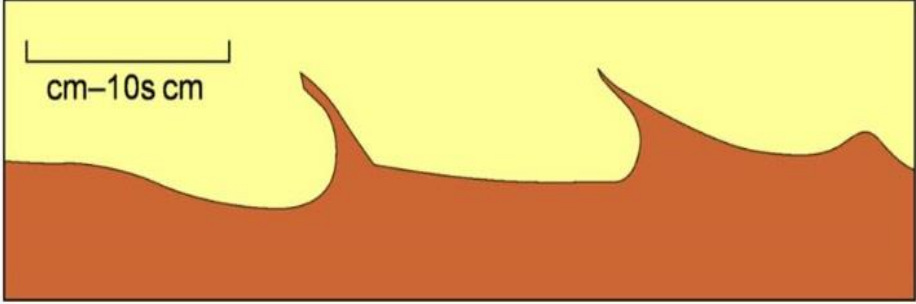
### 2.4.1. Yük Kalıpları ve alev yapıları

Eğer nispeten düşük yoğunluğa sahip bir sediment daha yüksek yoğunluğa sahip bir kütle tarafından üzerlenirse, duraysız bir hal alır. Eğer her iki tabaka nispeten suluysa, daha düşük yoğunluklu kütle basınç altında olacak ve üzerleyen birim içerisinde onu deformasyona zorlayarak zayıf yönleri kullanıp yukarıya doğru hareket edecektir. Yük kalıpları, yüksek yoğunluğa sahip kumun, altındaki çamur içerisine aşağıya doğru kısmen gömülmesiyle oluşmaktadır (Şekil 2.11 ve 2.12).

Çamur, üzerini örten kum tabakası içerisine yükselmesiyle bir “alev yapısı” adında yapı oluşturabilir. Çünkü kum, aşağıya doğru ve çamur yukarıya doğru ilerler, kum, yük topları şeklinde çamurlu tabaka içerisinde tamamen korunabilir. Bu



yük yapıları top ve yastık yapıları olarak tanımlanır (Owen, 2003). Bu yapılar kumlu türbidit tabakalarının tabanında ve kumun sulu çamur üzerine direk olarak çökelediği yerlerde yaygındır.



Şekil 2.11. Yük kalıpları, kum (daha yoğun) yumuşak çamur üzerinde depolanmıştır (Nichols, 2013).



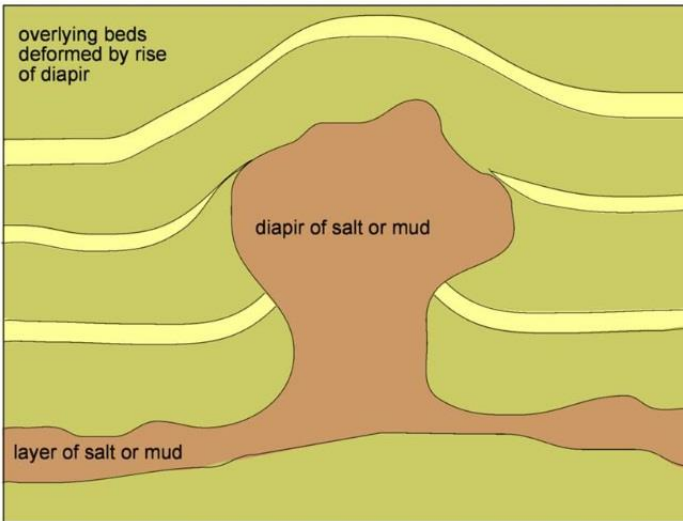
Şekil 2.12. Yük kalıpları (Nichols, 2013).

#### 2.4.2. Diapirizm

Diapirizm, büyük ölçekli sedimentlerin hareketleri sonucu pekişmemiş sediment tabakaları arasındaki yoğunluk farkı sebebiyle duraysız olmaları durumunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.13). Bu olay, çeşitli jeolojik ortamlar ve kayaç-sediment tiplerinde oluşabilir ancak en yaygın olarak yoğunluk farklarından dolayı ortaya çıkmaktadır. Büyük ve düşük yoğunluğa sahip sedimentlerin göreceli hareketi ile

meydana gelir. Bir kayaç tabakası yada sedimentin hacim yoğunluğu iki faktörle belirlenmektedir: (a) Minerallerin yoğunluğu ve (b) sedimentin oranı. Sediment oranı hesaplanırken kayaç içerisindeki gözenek boşlukları sıvı yada gazla dolması dikkate alınmalıdır. Sedimanter istifler içerisinde yaygın olarak iki tip diapirizm görülür, tuz diapirizmi ve çamur diapirizmi ve onlar sedimantoloji ve stratigrafi için iki önemli yapıtıma sahiptir. Birincisi, diapirik yapılar deniz tabanı üzerinde yüksek bölgeler yaratabilir. Bu da karbonat gelişimine neden olabilir. İkincisi, diapirizm; yeraltı yapıları oluşturabilir ve böylece hidrokarbonlar için kapan olabilir.

Diapirizm oluşumunun ikinci ana şekli, yüksek bir porozite ve yoğunluğa sahip sediment tabakasında sediment ile yüksek oranda su karışımının bulunması nedeniyle indirgenmiştir. Bu oluşuma neden olan çamur sedimentinin hızlıca çökmesidir. Deniz tabanı üzerindeki taze çamur çökeli mi suyun oluşturduğu kütle nin yaklaşık %75'ine sahiptir. Aynı miktarda sediment üstte çökeler, su git gide dışarı çıkar, kil çökeli mi artar, killerin gözenekleri olmalarına rağmen düşük bir geçirir mliliğe sahiptir. Çünkü kil mineralleri bir katman gibi malzeme içerisinde akışkanın yolculuğunu engeller. Bunun sonucunda eğer su kaçmak için yeterli zamanı bulamazsa çamurlu tabakalarla birlikte kapanmaya başlar. Suca zengin bir tabaka haline gelen bu oluşum, düşük yoğunlukludur ve daha yoğun sedimentler tarafından üzerlenebilir. Bu durum deltalarda çok yaygın olarak meydana gelir. İnce taneli delta önü fasiyesleri delta önü ve delta üstü kumlar tarafından üzerlenir. Çamur diapirizmi (bazen şeyl diapirizmi olarak da isimlendirilir) bu sebeple yaygın bir çamurlu delyaik dizinin özelliklerindedir (Hiscott, 2003; Nichols, 2013).



**Şekil 2.13.** Diapirik yapılar; düşük yoğunluklu sediment (tuz veya suya doymuş çamur) daha yoğun sediment tarafından üzerlendiğinde oluşur (Nichols, 2013).

## SONUÇLAR

Yumuşak sediment deformasyon yapıları çökelme sırasında veya kısa bir süre sonra, sedimanın sıkılaşmasının ilk aşamalarında gelişir. Bunun nedeni, deformasyonun meydana gelmesi için çökeltilerin "sıvı benzeri" veya katılaşmamış olması gerekmektedir. Bu oluşumlar aynı zamanda Lowe (1975) tarafından su kaçma yapıları olarak adlandırılan bir kategoriye de dahil edilmiştir. Yumuşak sediment deformasyonun meydana geldiği en yaygın yerler, bulantı akıntılarının olduğu derin su havzaları, nehirler, deltalar ve fırtınadan etkilenen koşulların olduğu sığ deniz alanlarıdır. Bunun nedeni, bu ortamlarda sedimanların gevşek bir şekilde birikmesine sebep olan yüksek sedimantasyon oranına sahip olmasıdır.

Yumuşak sediment deformasyon yapıları, çökelme ortamlarından çok, sedimanların erken sıkılaşma geçmişi hakkında daha fazla bilgi vermektedir. Yumuşak çökel deformasyon yapılarının çok az çeşidi belirli bir çökelme ortamına özgü görünmektedir. Bununla birlikte, bu yapılar en çok su içeren sedimanlarda görülür ve en sık olarak kum ve siltlerin gevşek paketlenmesine neden olan yüksek çökelme oranlarının hakim olduğu yerlerde oluşur. Temel olarak sıvılaşmaya bağlı olan bazı yumuşak sediment deformasyon türleri, ya bir tabaka içinde ya da iki tabaka arasındaki ara yüzeyde düzenli kıvrımların oluşmasını içerir. Yumuşak sediment deformasyon, sıvılaşmış, hidroplastik ve bazen daha dayanıklı sedimanların çökelme sırasında veya hemen sonrasında strese maruz kalmasıyla ortaya çıkar. Yumuşak sediment deformasyon yapılarının çoğu, bir tabaka veya tabaka dizisi içinde yer çekimsel olarak kararsız bir kütle yoğunluğu profiline varlığıyla ilişkilidir; örneğin, konvolüt laminasyon, yük kalıpları, yalancı yumrular, top ve yastık yapıları, tabak yapıları.

## REFERANSLAR

- Collinson, J.D. (2003) Deformation structures and growth faults. In: Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks (Ed. Middleton, G.V.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht; 193–195.
- Collinson, J.D., Mountney, N. & Thompson, D. (2006) Sedimentary Structures. Terra Publishing, London.
- Hiscott, R.N. (2003) Latest Quaternary Baram Prodelta, Northwestern Borneo. In: Tropical Deltas of Southeast Asia – Sedimentology, Stratigraphy and Petroleum Geology (Eds Sidi, F.H., Nummedal, D., Imbert, P., Darman, H. & Posamentier, H.W.). Special Publication 76, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Tulsa, OK; 89–107
- Koç Taşgın, C. 2009., Çaybağı Formasyonu'nun (Elazığ Doğusu) Stratigrafik ve Sedimentolojik Özellikleri, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 165 s. Elazığ.
- Koç Taşgın, C. ve Türkmen, İ., Analysis of soft-sediment deformation structures in Neogene fluvio-lacustrine deposits of Çaybağı Formation, Eastern Turkey. Sedimentary Geology, 218, 16-30, 2009.
- Koç Taşgın, C., Orhan, H., Türkmen, İ ve Aksoy, E., Soft-sediment deformation structures in the late Miocene Şelmo Formation around Adıyaman area, Southeastern Turkey. Sedimentary Geology, 235, 3-4, 277-291, 2011.
- Koç Taşgın, C., Seismically-generated hydroplastic deformation structures in the Late Miocene lacustrine deposits of the Malatya Basin, eastern Turkey. Sedimentary Geology, 235, 3-4, 264-276, 2011.
- Koç, 2002. Suluova (Amasya) Kuzebatısındaki Eosen Çökellerinde Sedimentolojik İncelemeler, Fırat Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 52 s. Elazığ.
- Koç-Taşgın, C., (2017). Soft-sediment deformation related to syntectonic intraformational unconformity in the early Palaeocene alluvial-fan deposits of Kuşcular Formation in the Elazığ sector of Tauride foreland, eastern Turkey. Journal Of African Earth Sciences, 134,665-677.
- Koç-Taşgın, C., Altun, F., 2019. Soft-sediment deformation: deep-water slope deposits of a back-arc basin (middle Eocene-Oligocene Kırkgeçit Formation, Elazığ Basin), Eastern Turkey, Arabian Journal of Geoscience, 12, 773, 1-20.
- Koç-Taşgın, C., Diniz-Akarca, C., 2018. Soft-sediment deformation structures related to tectonomagmatic activity: A case study from the borate-bearing lacustrine deposits of early Miocene Bigadiç Basin, NW Turkey. Sedimentary Geology, 373, 32-47.
- Leeder, M.R. (1999) Sedimentology and Sedimentary Basins: from Turbulence to Tectonics. Blackwell Science, Oxford.
- Lowe, D. R. (1975). Water escape structures in coarse-grained sediments. Sedimentology, 22(2), 157-204.

- Nichols, G.J. (2013). *Sedimentology and Stratigraphy*, John Wiley & Sons, 432s.
- Owen, G. (1995). Soft-sediment deformation in upper Proterozoic Torridonian sandstones (Applecross Formation) at Torridon, northwest Scotland. *Journal of Sedimentary Research*, 65(3a), 495-504.
- Owen, G. (2003) Ball-and-pillow (pillow) structures. In: *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks* (Ed.Middleton, G.V.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht; 39–40.

## Bölüm 4

### 3B Beton Baskı: İnşaat Mühendisliği Perspektifinden Yenilikler

Nazım Çağatay DEMİRAL<sup>1</sup>  
Cenk KARAKURT<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Arş. Gör.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.  
[cagatay.demiral@bilecik.edu.tr](mailto:cagatay.demiral@bilecik.edu.tr) ORCID No: 0000-0001-5927-7299

<sup>2</sup> Prof. Dr.; Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü.  
[cenk.karakurt@bilecik.edu.tr](mailto:cenk.karakurt@bilecik.edu.tr) ORCID No: 0000-0002-4204-5341

## Özet

İnşaat sektöründe 3B baskının kullanımı, verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve iş güvenliğini iyileştirmek gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu teknoloji, konut yapımından altyapı projelerine kadar geniş bir yelpazede uygulanarak, sektörde önemli değişiklikler yaratma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, inşaat sektöründe 3B baskı teknolojisinin tarihçesi, avantajları ve uygulama alanları üzerinde durulmaktadır. İnşaat sektörünün geleneksel yöntemlerinin sürdürülebilirlik ve yenilikçilik açısından yetersiz kaldığı belirtilerek, otonom sistemlerin ve robotik teknolojilerin sektöre entegrasyonunun önemi vurgulanmaktadır. Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisinin tarihsel gelişimi ve 3B baskı yöntemlerinin inşaat sektöründeki uygulamaları detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. 3B baskının ekonomik ve çevresel faydaları, kalıp maliyetlerinin düşürülmesi, malzeme israfının azaltılması ve sürdürülebilir inşaat süreçlerinin oluşturulması gibi konular incelenmektedir. Sonuç olarak, 3B baskı teknolojisi, inşaat sektöründe devrim yaratabilecek bir yenilik olarak öne çıkmakta ve bu teknolojinin benimsenmesi, sektördeki operasyonel süreçlerin modernizasyonuna ve sürdürülebilirliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İnşaat Sektörü, 3B Baskı, 3B Beton, Sürdürülebilirlik, Eklemeli İmalat

## 1 Giriş

İnşaat sektörünün varlığından beri kullanılan üretim yöntemleri, çağımızın teknolojik ilerlemeleri göz önüne alındığında geride kalmış durumda olduğu söylenebilir. Sektörün sürdürülebilirliği ve yenilikçi gelişmelerin izinden gidebilmesi için operasyon bazlı yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, inşaat sektöründe otonom sistemlerin kullanımı sürdürülebilir bir inşaat sektörü oluşturmak için kritik öneme sahiptir. İnşaat sektöründe otomasyon, maliyetlerin düşürülmesi, verimliliğin artırılması ve kalitenin iyileştirilmesi gibi birçok fayda sağlamaktadır (García de Soto vd., 2018). Ayrıca, inşaat alanında robotik teknolojilerin kullanılması iş kazalarını ve yaralanmaları da büyük ölçüde azaltmaktadır (García de Soto vd., 2018). Robotik sistemler 1960'lardan beri inşaat sektöründe kullanılıyor olsa da, bu alandaki ilerleme otomotiv endüstrisi gibi diğer sektörlerle kıyaslandığında daha yavaş olmuştur (Castro-Lacouture, 2009). Yavaş da olsa uygulanan yenilikler arasında inşaat alanında 3 Boyutlu (3B) uygulamaların robotik sistemlerin kullanıldığı alanlara örnek olarak verilebilir. 3B eklemeli imalat (Eİ), yapı sektöründeki bu otonom devrimlerden biridir. Eİ, yani 3B baskı teknolojisinin inşaatla kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. İnşaat firmaları da bu kapsamda verimliliği artırmak ve maliyetleri azaltmak için yeni yöntemler aramaktadır (Bock, 2015). 3B baskının inşaat alanında geleneksel yöntemlere kıyasla birçok ekonomik ve çevresel fayda sağlaması sebebiyle günümüz teknolojisinde uygulanabilir alternatiflerden biri haline gelmiştir. Ayrıca, bu yöntem imalat hatalarını, zamanı, iş güvenliği riskini ve maliyeti azalttığını raporlayan çalışmalar bulunmaktadır (Maskuriy vd., 2019). Bu nedenle, 3B-Eİ değişen dünyada inşaat alanında önemli bir rol oynayabilir (Bos vd., 2016). Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında, 3B eklemeli imalat (Eİ) kalıp maliyetlerinde de önemli avantajlar sunar. Kalıp maliyetleri, inşaat sektöründe büyük bir paya sahiptir. Kalıba ihtiyaç duymayan bu yeni teknoloji, toplam inşaat maliyetlerinde %35 ile %60 arasında tasarruf sağlamaktadır (Lloret vd., 2015; Beersaerts vd., 2020). Ayrıca, 3B-Eİ yöntemiyle çevresel etkilerin azaltılması, daha sürdürülebilir bir inşaat sürecine yol açacaktır. Doğru yönetilen inşaat atıkları ile bir üretim süreci ve optimizasyonu sağlanmış malzeme kullanımı vasıtasıyla üretimden sonra ortaya çıkan atık miktarının azalması beklenmektedir (Keating vd., 2014, Biernacki vd., 2017).

## 2. Eİ Teknolojisinin Tarihçesi

3B yazıcı teknolojisinin evrimi, son birkaç on yılda mühendislik ve imalat sektörlerinde devrim yaratmıştır. Bu ilerlemesi hızla devam eden teknoloji, 1980'lerin başından günümüze kadar olan dönemi kapsayarak, stereolitografi



(SLA) gibi erken teknolojilerden başlayıp, gelişmiş çok malzemeli baskı sistemlerine kadar önemli birçok gelişmeyi kapsamaktadır. Tablo 1’de sunulan bu kronolojik derleme, 3B yazıcı teknolojisinin temel dönüm noktalarını, ilgili akademik çalışmaları ve bu alanda öncü olan araştırmacıları belgelemektedir. Bu, mühendislik ve tasarımın sınırlarını zorlayan yenilikçi bir alanda, bilimsel araştırma ve uygulamalı gelişmelerin bir özeti. Önemli patentler ve akademik makalelerle desteklenen bu tarihçe, 3B baskı teknolojisinin nasıl geliştiğini ve sektör üzerinde nasıl dönüştürücü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. 3B yazıcı teknolojisinin gelişimi.

<b>Firma-Yazar</b>	<b>Çalışma Adı</b>	<b>Geliştirilen Ürün</b>
Chuck Hull (Hull, 1984)	Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography	İlk 3B Yazıcı (SLA Teknolojisi)
S. Scott Crump (Crump, 1992)	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	FDM Teknolojisiyle 3B Yazıcı
Carl R. Deckard (Deckard, 1994)	Method and apparatus for producing parts by selective sintering	SLS Teknolojisiyle 3B Yazıcı
Atala, A. vd. (Atala vd., 2006)	Tissue-engineered autologous bladders for patients needing cystoplasty	3B Baskılı İnsan Mesanesi
DM3B Technology LLC (Dutta and Froes, 2015)	Direct metal deposition (DMD)	Doğrudan Metal Biriktirme (DMD)
Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (Edgar ve Tint, 2015)	Additive Manufacturing Technologies: 3B Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing	Gelişmiş 3B Yazıcı Serileri

Eİ fikri çok eskilere dayansa da ortaya çıkan ilk sistemin 1987 yılında Stereolitografi olarak bilinen plastik işleme tekniğinin ticarileşmesi ile başladığı bilinmektedir. Bu süreç, dünya genelinde ticari olarak üretilen ilk Eİ sistemi olarak bilinir. 1990'lı yıllar, Eİ teknolojileri için bir dönüm noktası olmuştur. Bu dönemde Lamine Nesne Üretimi (LOM), Katı Zemin Kürleme (SGC) ve Kaynaşmış Biriktirme Modellemesi (FDM) ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır (Özer, 2020). Bu yöntemlerin hemen ardından Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemi geliştirilmiştir. Alman EOS firması, 1994 yılında Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) teknolojisine dayalı M160 makinesini tanıtmış ve 1995 yılında M250 makinesini üretmiştir (Yang vd., 2017; Özer, 2020). Son 20 yılda, Eİ teknolojilerinde önemli ölçüde hızlı gelişmeler yaşanmıştır. Mevcut teknolojiler gelişmeye devam ederken, Doğrudan Metal Lazer Eritme (DMLM) gibi yeni ve önemli teknolojiler geliştirilmiş ve ticari hale getirilmiştir. 2002 yılında Doğrudan Metal Biriktirme (DMD) sistemlerinin satışına başlanmıştır. 2016 yılının başlarında neredeyse her hafta yeni bir teknoloji, ürün, malzeme veya uygulama ortaya çıkmıştır. Bu sistemler zamanla daha güvenilir ve verimli hale gelmiş ve kullanılan malzeme çeşitliliği önemli ölçüde artmıştır (Gouge ve Michaleris, 2017; ASTM F2792-12a, 2012; Paul vd., 2018). Eİ teknolojisinin geçmişten günümüze gelişimi göz önüne alındığında Bu teknoloji, 1980'lerden günümüze dek hızla gelişmiş ve birçok endüstride devrim yaratmıştır. 1981 yılında, Hideo Kodama, ilk 3B baskı süreçlerinden birini geliştirmiş, fakat bu çalışma ticari bir ürün haline gelmemiştir (Kodama, 1981). Ardından, 1984 yılında, Chuck Hull, stereolitografi (SLA) yöntemini icat ederek 3B baskı teknolojisini ticarileştiren ilk kişi olmuş ve bu teknolojiyi kullanarak 3B Systems şirketini kurmuştur (Hull, 1984). SLA (Şekil 1), ultraviyole (UV) ışığı kullanarak sıvı fotopolimerleri katılaştırma prensibine dayanır. Bu süreç, bir 3B modelin dijital verilerini alır ve bu verileri katman katman fiziksel bir nesneye dönüştürür. Hull'un çalışması, 3B baskının temelini oluşturmuş ve bu teknolojinin gelişimine öncülük etmiştir. SLA işlemi, bir lazer ışınının fotopolimer bir havuzunun yüzeyine doğru yönlendirilmesiyle başlayıp, lazerin belirli noktaları katılaştırmak için sıvı polimeri sertleştirmesiyle devam eder. Bu işlem katman katman tekrarlanarak, üç boyutlu bir nesne oluşturulmaktadır. Bu teknik, özellikle karmaşık geometrilere sahip nesnelere ve çok ince detaylara sahip prototipleri üretmek için ideal olduğu raporlanmıştır. Chuck Hull'un geliştirdiği SLA teknolojisi, 3B baskı endüstrisinin ticarileşmesinde ve yaygınlaşmasında kritik bir rol oynamıştır. Hull'un icadı, 3B baskının sadece endüstriyel uygulamalara değil, aynı

zamanda tıp, mimarlık, otomotiv ve daha pek çok alana yayılmasını sağlayan bir dönüm noktası olmuştur.



Şekil 1. İlk stereolitografi 3B-yazıcı, (Hull, 2015)

1990'larda, Fused Deposition Modeling (FDM) ve Selective Laser Sintering (SLS) gibi yeni 3B baskı teknolojileri geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, malzeme çeşitliliği ve baskı kabiliyetleri bakımından önemli ilerlemeler sağlamıştır (Crump, 1992; Deckard, 1989). 2000'lerin başında, 3B baskının kullanımı daha da genişledi ve metal baskı gibi daha gelişmiş teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bu dönemde, tıp, havacılık ve otomotiv gibi alanlarda 3B baskının kullanımı yaygınlaşmıştır (Gibson vd., 2021). 2010'lar, 3B baskı teknolojisinde bir patlama yaşandığı dönem olmuştur. Tüketicilere yönelik uygun fiyatlı 3B yazıcılar piyasaya sürülmüş ve bu, teknolojinin daha geniş kitleler tarafından kullanımını sağlamıştır (Lipson ve Kurman, 2013). Günümüzde, 3B baskı teknolojisi, özelleştirilmiş ürünlerin üretimi, karmaşık geometrilere sahip parçaların ve hatta biyolojik dokuların basılması gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Ayrıca, sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından yeni kapılar açmaktadır (Ford, 2019).

Eklemeli imalat, günümüzde üretim sektöründe hızla popülerlik kazanan bir teknoloji olması, günümüze kadar gelişmesi ve daha çok endüstride kullanılması beraberinde birçok avantaj getirmiştir. Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine, Eİ, katman katman nesnelerin oluşturulmasını sağlayarak tasarım ve üretim süreçlerinde devrim niteliğinde bir yaklaşım sunmaktadır. Bu teknoloji, bir dizi avantaj sunmakta ve endüstriyel uygulamalarda çeşitli faydalar sağlamaktadır. Eİ teknolojisinin sunduğu avantajlar şunlardır:

- Üretim süreçlerini ve maliyetlerini düşürür,
- Ürün geliştirme sürecini hızlandırır,
- Özel ürünlerin üretimini mümkün kılar,
- Hızlı modelleme imkânı sunar,
- Zor şekillendirilebilen parçaların üretimini sağlar,
- Tasarım sürelerini kısaltır,
- Tasarım ve üretim arasında uyum sağlar,
- Ürünün işlevselliğini optimize eder,
- Üretim makinelerinin sayısını azaltır,
- Daha kısa teslimat süreleri ve daha düşük stok gereksinimleri sunar,
- Tasarımda özgürlük sağlar,
- Kalıba ihtiyaç duymaz,
- Daha az malzeme tüketir ve atık miktarını azaltır,
- Lojistiği kolaylaştırır.

### **3. Eklemeli İmalatın Kullanım Alanları**

Geleneksel üretim yöntemlerinin aksine, eklemeli imalat, malzeme israfını önemli ölçüde azaltmakta ve karmaşık geometrilerin üretimini kolaylaştırmaktadır. Bu yöntem, plastiklerden metaller ve hatta biyolojik materyallere kadar geniş bir yelpazede malzeme kullanılabilmesiyle bilinmektedir (Edgar ve Tint, 2015). Son yıllarda, Eİ teknolojisinin gelişimi, çeşitli endüstrilerde benimsenmesini hızlandırmıştır. Çalışmanın bu kısmında, eklemeli imalatın havacılık, otomotiv, sağlık ve inşaat gibi farklı alanlardaki kullanım örneklerine odaklanılacaktır.

#### **3.1 Havacılık Endüstrisi**

Havacılık endüstrisi, eklemeli imalatı benimseyen ilk sektörlerden biridir. Bu teknoloji, hafif ve karmaşık yapıdaki yedek parçaların üretimi için idealdir. Havacılıkta kullanılan parçalar genellikle yüksek performans gerektirir ve eklemeli imalat, bu ihtiyaca mükemmel bir şekilde cevap vermektedir (Karkun ve Dharmalingam, 2022). Örneğin, uçak motorlarında kullanılan

yakıt nozülleri, eklemeli imalat ile üretilerek yakıt verimliliğini artırmakta ve ağırlığı azaltmaktadır. Bu yöntem, ayrıca prototip geliştirme süreçlerini hızlandırıp ve üretim maliyetlerini düşürmektedir.

### **3.2 Otomotiv Endüstrisi**

Otomotiv sektörü, eklemeli imalatın potansiyelinden yararlanan bir diğer önemli alandır. Bu teknoloji, hem prototip oluşturma hem de son kullanım parçalarının üretimi için kullanılmaktadır (Tofail vd., 2018). Özel araçlar ve yarış otomobilleri için özelleştirilmiş parçalar, eklemeli imalat sayesinde hızlı ve maliyet etkin bir şekilde üretilebilmektedir. Ayrıca, bu yöntem, otomobillerin hafifletilmesine olanak tanıyarak yakıt verimliliğini artırmakta ve emisyonları azaltmaktadır.

### **3.3 Sağlık Endüstrisi**

Sağlık sektöründe eklemeli imalat, özellikle kişiye özel implantlar ve protezlerin üretiminde devrim yaratmıştır (Ventola, 2014). Bu teknoloji sayesinde, hastaların vücut ölçülerine tam olarak uygun implantlar ve protezler üretilebilmektedir. Bu da ameliyat başarı oranlarını artırır ve iyileşme süreçlerini hızlandırır. Eklemeli imalat, ayrıca dental implantlar ve ortodonti cihazları gibi diğer medikal ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Biyo-uyumlu malzemelerle çalışabilme yeteneği, eklemeli imalatı sağlık sektöründe vazgeçilmez kılmaktadır.

### **3.4 Enerji Endüstrisi**

Enerji endüstrisi, eklemeli imalatı yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminde kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin kanatlarının eklemeli imalat yoluyla üretilmesi, aerodinamik performansın optimize edilmesini sağlayarak, türbinlerden daha fazla enerji üretimine imkân tanır. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha rekabetçi hale gelmesine yardımcı olur. Ayrıca, eklemeli imalat, güneş enerjisi panelleri gibi diğer yenilenebilir enerji bileşenlerinin üretiminde de kullanılarak, enerji sektöründe sürdürülebilirlik ve inovasyonun önünü açmaktadır.

### **3.5 Eğitim ve Araştırma**

Eğitim ve araştırma alanında eklemeli imalat, öğrencilere ve araştırmacılara mühendislik, tasarım ve malzeme bilimi gibi konularda pratik deneyim sağlar. Üniversitelerde ve araştırma enstitülerinde bu teknoloji, karmaşık teorik kavramların somutlaştırılması ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi için kullanılmaktadır (Ford ve Minshall, 2019). Ayrıca, yeni

malzeme türlerinin ve üretim süreçlerinin keşfi için bir platform olarak hizmet eder, bilimsel araştırmaları ve teknolojik yenilikleri destekler.

### **3.6 Moda ve Sanat**

Moda ve sanat dünyasında eklemeli imalat, tasarımcılara ve sanatçılara önceki üretim yöntemleriyle mümkün olmayan bir özgürlük ve esneklik sunar. Takı, aksesuar ve giysi tasarımlarında yenilikçilik sağlayarak, kişiselleştirilmiş ve özgün eserlerin oluşturulmasına imkân tanır (Birtchnell ve Urry, 2013). Sanat eserleri ve heykellerin üretiminde de benzersiz imkânlar sunarak, geleneksel sanat anlayışının ötesine geçen yeni ifade biçimleri yaratılmasına olanak sağlar.

Eklemeli imalatın bu geniş yelpazede uygulama alanları, teknolojinin sadece üretim süreçlerini değil, aynı zamanda ürünlerin tasarımını ve fonksiyonunu da nasıl dönüştürebileceğinin bir göstergesidir. Sürekli gelişen bu teknoloji, gelecekte daha da fazla sektörde önemli değişiklikler yaratmaya devam edebilir.

## **4. İnşaat Teknolojisinde Eklemeli İmalatın Yeri ve Uygulamaları**

### **4.1 Kontür İşleme Makinesi**

3B baskının inşaat sektöründeki tarihi, katkı maddesi imalat teknolojilerinin ilk gelişmelerine kadar uzanmaktadır. Dr. Behrokh Khoshnevis, Kontür işlemeyi geliştirerek inşaat alanında 3B baskının öncülüğünü yapmıştır (Khoramshahi ve Mokhtari, 2017). Dr. Behrokh Khoshnevis, kontür işleme adını verdiği ve katmanlı imalat teknolojisini kullanan bir 3B yazıcı sistemi için patent aldı. Bu sistem, beton veya diğeri yapı malzemelerini kullanarak, büyük ölçekli yapıları otomatik ve sürekli bir şekilde inşa edebilmektedir. Kontür işleme sistemi, inşaat sürecini hızlandırmayı, maliyetleri düşürmeyi ve yapısal bileşenlerin karmaşıklığını artırmayı amaçlamıştır. Khoshnevis'in patent aldığı bu teknoloji, bir yapı inşaatını katman katman gerçekleştirerek, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla zaman ve işçilikten tasarruf sağlamayı hedeflemiştir. Sistem, büyük bir robotik kol üzerine kurulu bir yazıcıdan oluşur ve bu yazıcı, bilgisayar kontrollü bir şekilde, yapı malzemelerini belirli bir düzende yatırarak yapı katmanlarını oluşturmaktadır. Teknoloji, özellikle hızlı prototipleme, acil barınma ihtiyaçları ve uzay kolonizasyonu gibi alanlarda uygulama potansiyeline sahiptir. İnşaat sektöründeki 3B baskının ilk yılları, çeşitli 3B baskı yöntemlerinin geliştirilmesi ve deneme projeleri ile karakterize edilmiştir. Kontür işleme, bu dönemde önemli bir yenilik olarak ortaya çıkmış, binaların duvarlarını hızlı ve verimli bir şekilde basma yöntemini önermiş ve

zaman ve işçilik maliyetlerini azaltarak inşaat sektörünü dönüştürme potansiyeline sahip olmuştur.

3B baskının imalat endüstrisindeki yadsınamaz avantajları, akademisyenleri bu teknolojiyi inşaat sektöründe daha fazla kullanmak için ölçeklendirmeye teşvik etmiştir; aslında bu teknoloji, modelleme yerine gerçek yaşam boyutlarında evler inşa etmek için kullanılmaktadır. Kontur işleme, eklemeli imalatın katmanlar halinde inşa edilmesinde bir temel oluşturmaktadır (Perkins ve Skitmore, 2015). Kontür işleme sistemi, çimento harcı, seramik, metal gibi çeşitli malzemeleri kullanabilen hafif, hareketli bir 3B yazıcıdır. Bunları insan müdahalesi olmadan otomatik olarak binaya katmanlar halinde işleyebilir. Kontur işleme makinesi, belirli raylar üzerinde bir makine parçası eşliğinde temelin yanına yerleştirilip ve hareket ettirilerek üretim yapmaktadır (Şekil 2). Makinenin 3 boyutlu alandaki her bir bölüme erişebilmesi için X, Y ve Z eksenlerinin tamamında hareket edebilmesi gerekmektedir. İlk eksen (X) raylardan oluşmaktadır. Y eksenini makine kolunun yüksekliği tarafından oluşturulmaktadır. Kol tamamen açıldığında, iki katlı bir bina inşa etmek için yeterli olan 6 metre yüksekliğinde olacaktır. Üçüncü eksen (Z), iki kolu birleştiren yatay bir çubuktan oluşmaktadır (Khoshnevis vd., 2006). Şu anda bu makine tüm beton, kenar, yalıtım duvarlarını basabilmekte; mucidin görüşüne göre, uygulanabilirliği 2025 yılında oldukça yaygın hale geleceği belirtilmektedir. Binaların 3B baskısının diğer iki tekniğine göre avantajlarından bazıları daha hızlı inşa edilmesi, yerinde kullanılabilmesi ve daha yüksek kalitede daha pürüzsüz yüzeyler oluşturmasıdır. Kontür işleme sisteminin temel özelliği ve işlevi yapı malzemesini düzleştirmek olan iki malaya sahip olmasıdır.



Şekil 1. Kontür işleme makinesinin ana hatları (OpenAI, 2024)

Makineyi kurmak ve hazırlamak aşamasının ardından, malzemenin ekstrüde edilmesi işlemi projenin amacına ve inşaat aşamasına göre değişmektedir. Sıradan bir bina inşa etmek için beton harcı, makinenin ön valfine enjekte edilmekte ve bu işlem makinenin pompalarından birini nozülün ağzına doğru harekete geçirmektedir. Sonunda harç, dört eksenli nozüle girmekte ve bu da ona çok fazla hareket özgürlüğü sağlamaktadır (Şekil 3). Kollar, malzemeleri depodan nozül başına taşımak için bir birime sahip olup hızı kontrol etmektedir. Kollar ayrıca, yatay ve dikey olarak hareket edebilen ve eğim, açı ve geometrik şekillerin hassasiyetini kontrol edebilen bir düzeltme malası ile donatılmıştır. Nozül uçları, farklı dış kalıplara göre çeşitli şekiller oluşturabilecek farklı başlıklara sahip olabilir (Zhang ve Khoshnevis, 2013).





Şekil 2. Kontür işleme makinesinin nozülleri (Khosnevis, 2004; Khorramshahi ve Mokhtari, 2017)

Duvarlar yükselirken, kapı ve pencere boşlukları yazıcı tarafından önceden belirlenen yerlerde bırakılmaktadır. Bu boşluklar, nozülün belirli bölgelerde malzeme eklemeyi durdurmasıyla oluşturulmaktadır, böylece gerekli açıklıklar sağlanmaktadır. Pencere ve kapı boşlukları, yazdırma işlemi sırasında doğru konum ve boyutlarda bırakılmakta, sonrasında bu alanlara geleneksel inşaat malzemeleri ile devam edilmektedir. Çatı yapımı ise genellikle duvarların tamamlanmasından sonra gerçekleşmektedir. Mevcut 3B yazıcı teknolojisi çoğunlukla yatay yüzeyler için tasarlandığından, çatılar ayrı bir süreçte, bazen modüler bölümler halinde inşa edilmekte ve yerine monte edilmektedir.

#### 4.2 D-Şekilli 3B Baskı

D-şekilli 3B baskı tekniği, Enrico Dini tarafından geliştirilen ve inşaat alanında önemli bir ilerleme sunan, büyük ölçekli yapıları oluşturmak için bir kum yatağı 3B baskı süreci kullanarak yeni bir yöntem sunmuştur. 2007'de tanıtılan D-şekilli, inorganik bir bağlayıcı ile katman katman kum tabakasını seçici bir şekilde katılaştıran dünyanın ilk büyük ölçekli inşaat yazıcısıdır (Prasad vd., 2023). Bu teknik, karmaşık geometrileri inşa etme potansiyelini ve sürdürülebilir ve maliyet etkin bina çözümleri oluşturma uygulamasını araştıran çeşitli çalışma ve makalelerde incelenmiştir. Alanla ilgili birçok araştırma, bu teknolojinin çevresel etkisine odaklanarak, geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla atık ve malzeme kullanımını ne seviyede azalttığını tartışmaktadır. D-şekilli 3B baskı teknolojisinin kum gibi yerel malzemelerle baskı yapabilme yeteneği, inşaat projelerinin karbon ayak izini önemli ölçüde azaltabileceği düşünülmektedir.

Uygulama açısından, D-şekilli teknolojisi mimari yapılar, kıyı ve deniz altyapısı gibi çeşitli projeler için düşünülmüştür, farklı ortamlarda verimlilik ve çok yönlülüğünü göstermektedir (Zaid ve El Ouni, 2024). Akademik çalışmalar, D-şekilli 3B baskının sınırlamalarını ve gelecek perspektiflerini de ele almakta, teknolojinin ölçeklenebilirliğini, hızlı ve esnek bir şekilde binaların üretimini sağlayarak inşaat sektörünü devrimleştirme potansiyelini değerlendirmektedir (Perkins ve Skitmore, 2015).

İnşaat sektörü, eklemeli imalatı benimseyerek, yapıların daha hızlı, daha ekonomik ve daha sürdürülebilir bir şekilde inşa edilmesine olanak tanımaktadır (Khoshnevis, 2004). 3B baskı teknolojisi ile imal edilen yapılar, geleneksel inşaat yöntemlerine göre daha az malzeme kullanılarak ve daha kısa sürede tamamlanabilmektedir. Bu yöntem, ayrıca karmaşık tasarımların ve özel geometrilerin inşa edilmesine olanak tanımakta, bu da mimarlara ve tasarımcılara daha önce mümkün olmayan bir yaratıcılık alanı sunmaktadır. Örneğin, özel kavisli duvarlar veya entegre su drenaj sistemleri gibi özellikler, eklemeli imalat ile çok daha kolay bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, bu teknoloji afet sonrası hızlı konut sağlama gibi insani yardım projelerinde de umut vaat etmektedir, malzeme israfını azaltarak ve inşaat süreçlerini hızlandırarak sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır.

### **4.3 İnşaat Mühendisliğinde Günümüzde Kullanılan 3B Yazıcılar**

İnşaat sektöründe 3D yazıcılar, yapıların daha hızlı, ekonomik ve çevre dostu bir şekilde inşa edilmesine olanak tanıyan yenilikçi bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojinin kullanımı, malzeme israfını azaltma, iş gücü maliyetlerini düşürme ve karmaşık yapıların üretimini kolaylaştırma gibi birçok avantaj sunmaktadır (Guamán-Rivera vd., 2022). Bu bölümde, inşaat sektöründe kullanılan farklı 3B yazıcı tipleri ve bu teknolojinin sektördeki uygulamaları ele alınacaktır.

#### **4.3.1 Gantry 3B Yazıcılar**

Gantry sistemler, büyük ölçekli yapıların inşasında yaygın olarak kullanılan 3B yazıcılarıdır. Bu yazıcılar, yapıların üzerine yerleştirilen raylar üzerinde hareket eden bir baskı kafası kullanarak çalışır. Gantry 3B yazıcılar ise geniş bir çerçeve üzerinde hareket eden baskı kafasına sahip olup, özellikle büyük ölçekli yapıların inşasında kullanılır. Bu yazıcılar, geniş bir hareket alanı sağlayarak büyük yapıların tek seferde ve kesintisiz olarak inşa edilmesine olanak tanır. Gantry sistemleri, beton gibi dayanıklı malzemelerle çalışabilir ve geniş yapıları inşa edebilir. Örneğin, köprüler ve büyük binalar gibi projelerde gantry yazıcılar kullanılır. Bu yazıcıların sunduğu geniş

hareket alanı, inşaat sürecinin hızını ve verimliliğini artırırken, malzeme israfını da en aza indirir. Bu yazıcılar, özellikle büyük binaların ve köprülerin inşasında tercih edilmektedir (Puzatova vd., 2022). Gantry 3D yazıcıların avantajları arasında yüksek stabilite, büyük ölçekli yapıların inşasında sağladığı verimlilik ve maliyet avantajları bulunmaktadır. Ayrıca, bu yazıcılar, inşaat sürecini otomatikleştirerek insan hatalarını minimize eder ve iş gücü maliyetlerini düşürür. Ancak, bu yazıcıların kurulumu ve taşınması zordur ve bu da esnekliklerini azaltır. Çeşitli gantry sistem 3B yazıcılar şekil 3'te sunulmuştur.

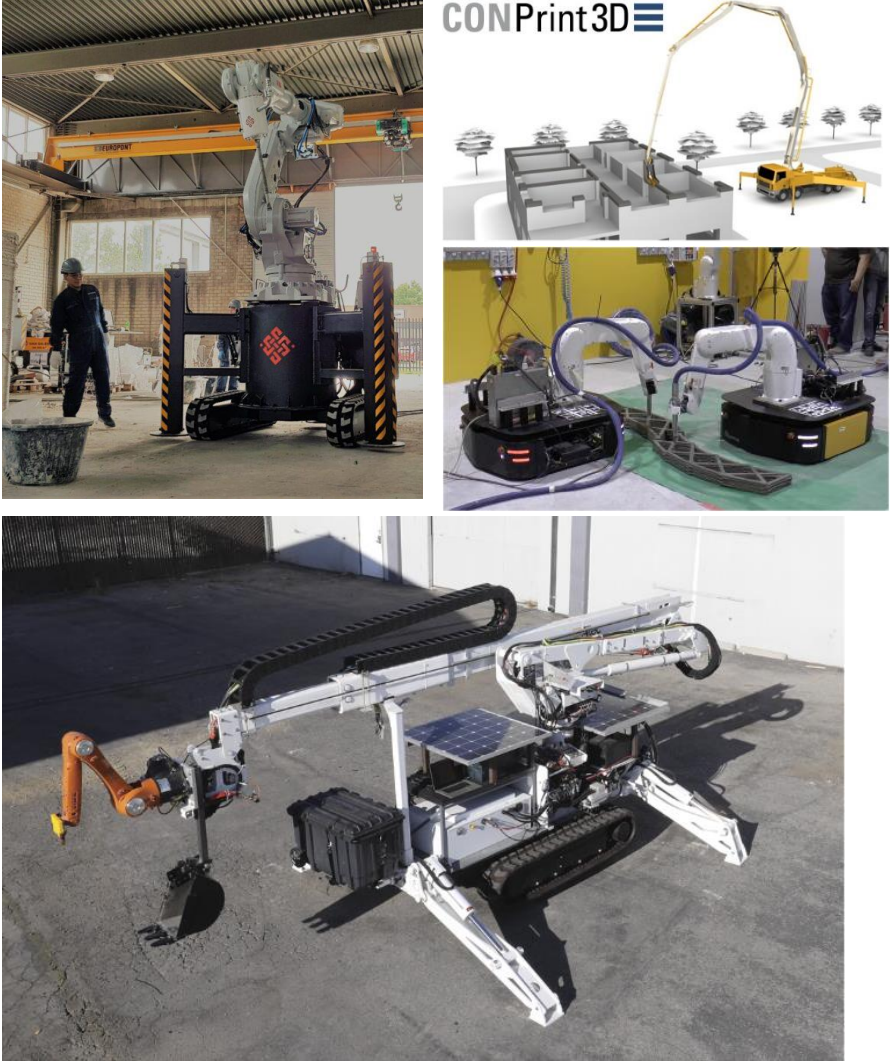


Şekil 3 Günümüzde kullanılan Gantry 3B yazıcılar (Nidus3d, 2024; Specavia.pro, 2024, Le vd., 2012).

#### 4.3.2 Robotik Kol Yazıcılar

Robotik kol yazıcılar, inşaat sektöründe esnek ve hassas bir üretim süreci sunan 3D yazıcılardır. Bu yazıcılar, robotik kolların çeşitli açılarda hareket etmesiyle karmaşık ve detaylı yapıların inşasını mümkün kılar. Robotik kollu yazıcılar, çok eksenli bir robot kol üzerinde yer alan bir baskı kafası kullanır. Bu tür yazıcıların çalışma prensibi, uygulama türü ne olursa olsun aynıdır. Endüstriyel robotların mevcut olması ve görece yüksek maliyetli olmamaları nedeniyle, 3D baskı için robot kollarının seçimi mantıklı bir tercihtir. Bu yazıcılar, yüksek doğruluk ve dinamizm sunar ve gelişmiş yazılım sistemleri sayesinde kontrol edilmeleri oldukça kolaydır. İnşaat uygulamalarına yönelik robotik kollu beton 3B yazıcı örnekleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu

teknoloji, inşaatın otomasyonu ve işçilik maliyetlerinin azaltılması açısından büyük avantajlar sağlamaktadır (Guamán-Rivera vd., 2022).



Şekil 4 Günümüzde kullanılan robotic kol yazıcılar (CyBe Yapı, 2024; Mechtcherine vd., 2019; Keating vd., 2017; Zhang vd., 2018).

### 4.3 Eklemeli İmalatın İnşaat Sektöründeki Avantajları ve Uygulamalar

ASTM F2792-12a'ya (ASTM, 2012) göre Eİ, katman üzerine eklenen katman olarak tanımlanmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, Eİ teknolojisi son yıllarda tıbbi uygulamalar, ticari havacılık ve diğer teknolojik alanlarda

yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanların yanı sıra, Eİ teknolojisi, beton yapıların imalatında, mevcut beton endüstrisinin sorunlarına çözüm olabilecek yollardan biri olmuştur. Eİ teknolojisinin beton üretiminde kullanılması, malzemenin çevresel etkisini azaltmakta, ürün kalitesini artırmakta ve tamamlanan projenin hızlı bir şekilde inşa edilmesine olanak sağlamaktadır (Wangler vd., 2016, Paul vd., 2018). İnşaat sektöründe, yakın geçmişte ortaya konulan üretim süreçleri göz önüne alındığında, Eİ'nin büyük ölçekli bir üretim yöntemi olarak kullanımının mümkün olabileceği kanıtlanmıştır (Khoshnevis, 2004; Buswell vd., 2007). 3B-Eİ, kalıp gerektirmeyen katman tabanlı bir üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Lim vd., 2009; Oxman vd., 2014). Geleneksel yöntemlere kıyasla, 3B-Eİ kalıp maliyetleri açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Geleneksel yöntemle 3B eklemeli imalat teknolojisinin üretim süreci arasındaki farklar Şekil 5'te gösterilmiştir.



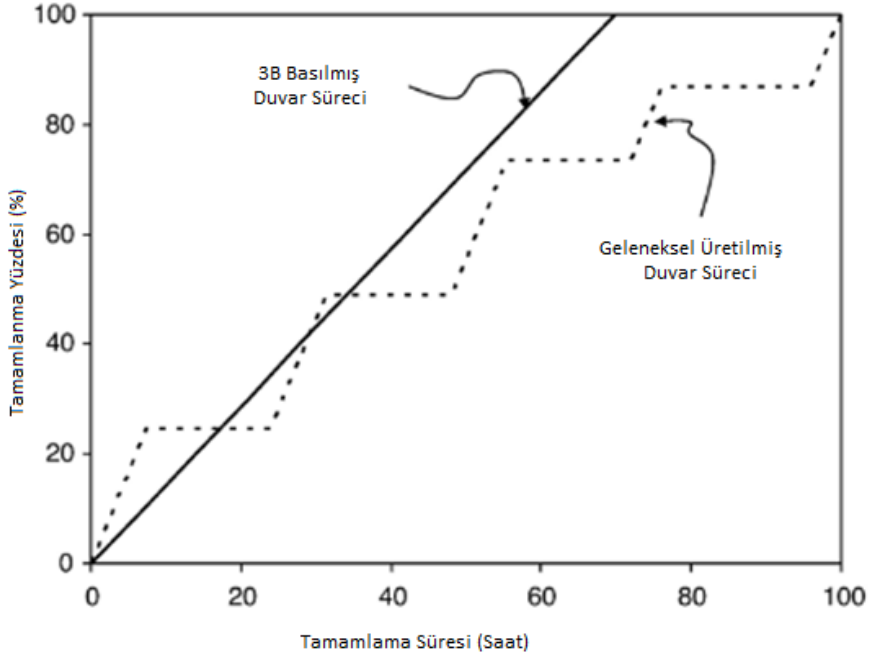
Şekil 5. Geleneksel beton üretimi ve 3B eklemeli imalat teknolojisi üretim süreçleri.

Bilindiği gibi kalıp maliyeti inşaat endüstrisinde en yüksek harcama kalemlerinden biridir. Kalıpsız uygulama imkanı sunan 3B-Eİ teknolojisinden

faydalanarak toplam inşaat maliyetlerinden %35-%60 arasında tasarruf sağlanabilmektedir (Lloret vd., 2015, Shakor vd., 2017). Ayrıca kalıp işçiliği ile kıyaslandığında, teknolojik ekipman desteği ile 3B-Eİ yönteminin kullanılması kalıp maliyeti dışında işçilik ihtiyacını da önemli ölçüde azaltacaktır. Böylelikle hem kazalarda hem de işçilik maliyetlerinde önemli ölçüde düşüşler olacaktır (Shakor vd., 2017). Geleneksel beton üretiminde tasarımcı belirli sınırlamalar içinde çalışırken, 3B-Eİ ile üretimde bu engeller ortadan kalkmakta ve tasarımcı özgürce tasarım yapabilmektedir. Günümüzde estetik, fonksiyonel ve optimize edilmiş tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, 3B-Eİ yöntemiyle çevresel etkilerin azaltılması, daha sürdürülebilir bir inşaat süreci sunmaktadır. Doğru bir üretim süreci ve optimize edilmiş malzeme tüketimi sayesinde, imalat sonrası atık miktarının azalması beklenmektedir.

(Biernacki vd., 2017; Oxman vd., 2014). Ayrıca, 3B-Eİ teknolojisi binalarda yaygın olarak kullanıldığından, düşük atık malzeme (yaklaşık %30), daha düşük enerji kullanımı, yerinde üretim, daha az kaynak gereksinimi ve geniş tasarım özgürlüğü gibi faktörler sayesinde üretim sonrası CO2 emisyonlarında önemli azalmalar beklenmektedir (Bos vd., 2016; Tay vd., 2017; Wolfs vd., 2018). Yukarıda özetlendiği gibi; geleneksel beton üretim süreçlerine kıyasla, yapıların 3B-Eİ ile inşası çok daha fazla tasarım özgürlüğüne izin veren daha ucuz, daha hızlı, daha uygun fiyatlı ve daha sürdürülebilir bir yöntemdir.

İnşaat sektöründe 3B-Eİ teknolojisinin kullanılmasının faydalarından biri, üretimin sabit bir hızda ve daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamasıdır. Buswell vd. (2007) 3B-Eİ ve geleneksel yöntemlerle üretilen yığma duvarların tamamlanma sürelerini karşılaştırmıştır (Şekil 6). 3B baskılı duvarın sabit hızda ve daha kısa sürede üretildiği görülürken, geleneksel yöntemlerle üretilen duvarın kürlenmesi için üretim yapılmadan beklenmesi gerektiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6. 3B-Eİ ile üretilen duvar üretimi ile geleneksel yöntem arasındaki zaman karşılaştırması (Buswell, vd., 2007)

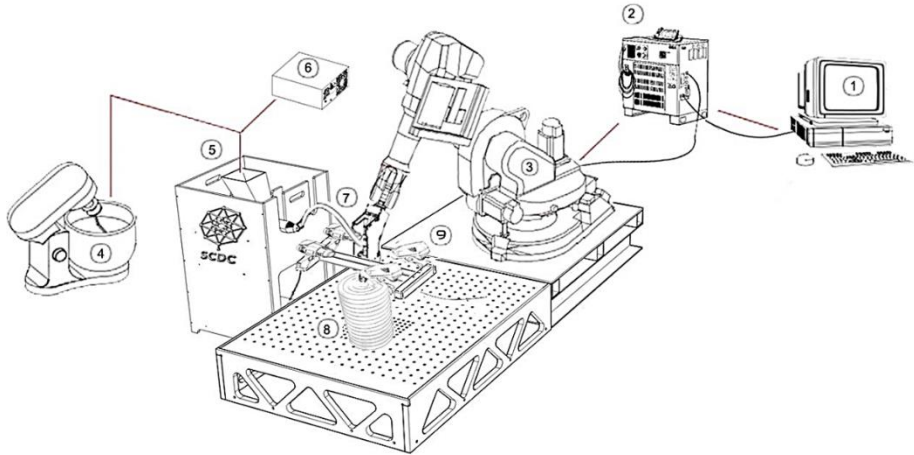
Teknolojideki gelişmeler, tasarım araç ve olanaklarının potansiyellerine ilişkin yeni beklentileri de beraberinde getirmiştir. Hızlı değişimlerin yaşandığı günümüz mobil yaşam tarzındaki sorunlar, dijital teknolojileri takip eden özel çözümler gerektirmektedir. 3B baskı, dijital fabrikasyonu ile bu zorlukların üstesinden gelmek için bir metodoloji olarak yükselmektedir. 3B baskı, dijital modellerin 3B modelleme ile entegre edilmesi sayesinde karmaşık şekil ve yapıların üretilmesini mümkün kılar. Genellikle, dijital bir modelin paralel yatay dilimlerden oluşan bir montaja dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. 3B baskı, daha hızlı inşaat, düşük maliyet ve güvenli çalışma koşulları gibi birçok avantaja sahiptir (Khoshnevis, 2004; Buswell vd., 2006). 3B baskının bazı zorlukları olsa da, özelleştirilebilir, esnek ve modüler konut olanakları sağlar (Beirão vd.). Ayrıca bu teknoloji, geleneksel manuel inşaat yöntemlerini kullanarak, mimarların kullanışlı, nadir ve elde edilmesi zor geometriye sahip yapılar üretmesine olanak tanıyarak tasarım esnekliğini artırmaktadır (Şekil 7). Sürdürülebilir yapı malzemelerini ve elemanlarını tasarlamak için uygulanabilir ön çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, laboratuvar ölçeğinde 3B yazıcı sistemleri ile deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Laboratuvar ölçekli 3B yazıcı sistemleri, çeşitli bileşenlerden



oluşmaktadır. Hojati vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada bu sistemin şeması sunulmuştur (Şekil 8).



Şekil 7. Bloom, 3B baskı ile üretilmiş Portland çimentosu kullanılarak deneysel amaçlarla yapılan bir pavilyon (Rael ve Fratello, 2018).



Şekil 8. 3B baskı beton sisteminin şeması şu şekildedir: (1) Takım yolunu tasarlamak ve G kodunu oluşturmak için bilgisayar, (2) Oluşturulan kodu okumak ve robotu kontrol etmek için robot kontrolörü, (3) Ekstrüder nozülünü belirlenen takım yolu boyunca hareket ettirmek için robot, (4) Malzeme hazırlığı için karıştırıcı, (5) Gelişmiş pompa, (6) Kodu çalıştırmak ve pompa hızını kontrol etmek için pompa kontrolörü, (7) Ekstrüder, (8) Baskı alınmış numune, (9) Baskı sırasında malzemeyi ısıtmak için ısı tabancaları (Hojati vd., 2018).



## 5. Sonuç

Geçmişten günümüze birçok endüstrideki üretim uygulamalarında daha kolay uygulanabilir, sürdürülebilir ve daha ekonomik yollar aranmıştır. Bu yenilikçi düşünce ihtiyacını karşılayan devrim niteliğindeki gelişmelerden biri birçok endüstrinin üretim kısmında yararlanabileceği 3B yazıcıların ortaya çıkışıdır. 3B yazıcıların günümüz inşaat endüstrisinde kapladığı yer ve avantajları aşağıda sunulmuştur.

- İnşaat sektöründe 3B baskı ve otomasyon teknolojilerinin kullanılması, geleneksel yöntemlere göre önemli verimlilik, maliyet tasarrufu ve kalite iyileştirmesi gibi faydalar sağladığı gözlemlenmiştir, bu da sektördeki operasyonel süreçlerin modernizasyonuna katkıda bulunmuştur.
- 3B baskı teknolojisinin uygulanması, kalıp maliyetlerinde önemli bir azalma sağlamakla kalmamış, aynı zamanda malzeme israfını da minimize ederek hem ekonomik hem de çevresel anlamda önemli avantajlar sunmuştur.
- İnşaat sektöründe robotik sistemlerin entegrasyonu, iş güvenliği açısından önemli iyileştirmeler sağlamış ve iş kazaları ile yaralanmaların azalmasına yol açarak projelerin daha güvenli ve verimli tamamlanmasını mümkün kılmıştır.
- 3B baskı ve otomasyon teknolojileri, konut yapımından altyapı projelerine kadar geniş bir kullanım alanı bulmuş ve bu teknolojilerin uygulandığı projelerde maliyet ve zaman açısından olumlu sonuçlar elde edilmiştir.
- Geleneksel inşaat yöntemlerine kıyasla, 3B baskı ve otomasyon teknolojileri, projelerin daha hızlı tamamlanmasını ve maliyet etkinliğinin yanı sıra, daha sürdürülebilir yapılar oluşturma potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamıştır.
- Yeni teknolojilerin uygulanmasında yüksek başlangıç maliyetleri, teknik uzmanlık gereksinimi ve sektörel adaptasyon gibi zorluklarla karşılaşmıştır, bu durum bu teknolojilerin benimsenmesi ve uygulanmasında önemli engeller olarak ortaya çıkmıştır.
- 3B baskı ve otomasyon teknolojilerinin sürekli gelişimi, inşaat sektörünün geleceğini şekillendirecek ve bu teknolojilerin daha geniş kitleler tarafından benimsenip yaygınlaştırılması beklenmektedir, bu da sektördeki inovasyon ve sürdürülebilirlik çabalarını önemli ölçüde etkileyecektir.

## **Kaynakça**

- ASTMF2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies, ASTM International, (2012).
- Atala, A., S. B. Bauer, S. Soker, J. J. Yoo and A. B. Retik (2006). "Tissue-engineered autologous bladders for patients needing cystoplasty." *The lancet* 367(9518): 1241-1246.
- Beersaerts, G., S. S. Lucas and Y. Pontikes (2020). An Fe-Rich Slag-Based Mortar for 3D Printing. Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Cham, Springer International Publishing.
- Beirão, J., Mateus, N., & Alves, J. S. (2018). Modular, Flexible, Customizable Housing and 3D Printed. *eCAADe 2018: Practices*, 1, 381-390.
- Benbow, J., N. Ouchiyama and J. Bridgwater (1987). "On the prediction of extrudate pore structure from particle size." *Chemical Engineering Communications* 62(1-6): 203-220.
- Biernacki, J., J. Bullard, G. Sant, K. Brown, F. Glasser, S. Jones, M. Ley, R. Livingston, L. Nicoleau, J. Olek, F. Sanchez, R. Shahsavari, P. Stutzman, K. Sobolev and T. Prater (2017). "Cements in the 21 st Century: Challenges, Perspectives, and Opportunities." *Journal of the American Ceramic Society* 100.
- Birtchnell, T. and J. Urry (2013). "3D, SF and the future." *Futures* 50: 25-34.
- Bock, T. (2015). "The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics." *Automation in Construction* 59: 113-121.
- Bos, F., R. Wolfs, Z. Ahmed and T. Salet (2016). "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing." *Virtual and Physical Prototyping* 11(3): 209-225.
- Castro-Lacouture, D. (2009). *Construction Automation. Springer Handbook of Automation*. S. Y. Nof. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 1063-1078.
- Crump, S. (1992). Apparatus and method for creating three-dimensional objects. U.S. Patent 5,121,329.
- Deckard, C. R. (1994). "Method and apparatus for producing parts by selective sintering."
- Doe, J. (2019). "Future of Construction: The Impact of 3D Printing Technologies." *Journal of Construction Innovation*, 11(1), 34-45.
- Dutta, B. and F. H. Froes (2015). 24 - The additive manufacturing (AM) of titanium alloys. *Titanium Powder Metallurgy*. M. Qian and F. H. Froes. Boston, Butterworth-Heinemann: 447-468.

- Edgar, J. and S. Tint (2015). "“Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing”, 2nd Edition." *Johnson Matthey Technology Review* 59(3): 193-198.
- Ford, S. (2019). Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce and Economics*.
- Ford, S. and T. Minshall (2019). "Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education." *Additive Manufacturing* 25: 131-150.
- García de Soto, B., I. Agustí-Juan, J. Hunhevicz, S. Joss, K. Graser, G. Habert and B. T. Adey (2018). "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall." *Automation in Construction* 92: 297-311.
- Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer.
- Hojati, M., S. Nazarian, J. P. Duarte, A. Radlinska, N. Ashrafi, F. Craveiro and S. Bilén (2018). 3D printing of concrete: A continuous exploration of mix design and printing process. 42nd IAHS world congress the housing for the dignity of mankind.
- Hull, C. W. (1984). "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography." United States Patent, Appl., No. 638905, Filed.
- Hull, C. W. (2015). "The birth of 3D printing." *Research-Technology Management* 58(6): 25-30.
- Johnson, M. (2018). "Environmental Impact of Particle-Bed 3D Printing in Construction." *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(1), 55-65.
- Karkun, M. S. and S. Dharmalingam (2022). "3D printing technology in aerospace industry—a review." *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace* 9(2): 4.
- Keating, S., N. A. Spielberg, J. Klein and N. Oxman (2014). A compound arm approach to digital construction. *Robotic Fabrication in architecture, art and design 2014*, Springer: 99-110.
- Khale, D. and R. Chaudhary (2007). "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review." *Journal of materials science* 42(3): 729-746.
- Khorranshahi, M. R. and A. Mokhtari (2017). "Automatic construction by contour crafting technology." *Emerging Science Journal* 1(1): 28-33.

- Khoshnevis, B. (2004). "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies." *Automation in construction* 13(1): 5-19.
- Khoshnevis, B., D. Hwang, K.-T. Yao and Z. Yeh (2006). "Mega-scale fabrication by contour crafting." *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 1(3): 301-320.
- Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, 52(11), 1770-1773.
- Lipson, H., & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons.
- Lloret, E., A. R. Shahab, M. Linus, R. J. Flatt, F. Gramazio, M. Kohler and S. Langenberg (2015). "Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication." *Computer-Aided Design* 60: 40-49.
- M. Gouge, P. Michaleris, *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*, Butterworth-Heinemann 2017.
- Maskuriy, R., A. Selamat, P. Maresova, O. Krejcar and O. O. David (2019). "Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective." *Economies* 7(3): 68.
- N. Oxman, J. Duro-Royo, S. Keating, B. Peters, E. Tsai, *Towards robotic swarm printing*, *Architectural Design*, 84 (2014) 108-115.
- OpenAI. (2024). ChatGPT (GPT-4o version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>
- Özer, G. (2020). "Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9(1): 606-621.
- Paul, S. C., Y. W. D. Tay, B. Panda and M. J. Tan (2018). "Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction." *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18(1): 311-319.
- Perkins, I. and M. Skitmore (2015). "Three-dimensional printing in the construction industry: A review." *International Journal of Construction Management* 15(1): 1-9.
- Prasad, K. V., V. Vasugi and G. Senthil Kumaran (2023). "Application of 3D printing concepts in the Architecture Engineering and Construction (AEC) industry - A scientometric review." *Materials Today: Proceedings*.

- R.A. Buswell, R.C. Soar, A.G. Gibb, A. Thorpe, Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction, *Automation in construction*, 16 (2007) 224-231.
- R. Rael, V. San Fratello, *Printing architecture: Innovative recipes for 3D printing*, Chronicle Books 2018.
- R.J. Wolfs, F.P. Bos, E.C. van Strien, T.A. Salet, A real-time height measurement and feedback system for 3D concrete printing, *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Springer 2018, pp. 2474-2483.
- S. Lim, T. Le, J. Webster, R. Buswell, A. Austin, A. Gibb, T. Thorpe, Fabricating construction components using layered manufacturing technology, *Global Innovation in Construction Conference*, Loughborough University Leicestershire, UK, 2009, pp. 512-520.
- S.C. Paul, Y.W.D. Tay, B. Panda, M.J. Tan, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (2018) 311-319.
- Smith, J. (2016). "Mechanical Properties of Structures Produced with D-shaped 3D Printing." *International Journal of Construction Engineering*, 5(3), 142-149.
- Tofail, S. A. E., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities." *Materials Today*, 21(1), 22-37.
- Ventola, C. L. (2014). "Medical applications for 3D printing: current and projected uses." *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704.
- Wangler, T., E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli and N. Roussel (2016). "Digital concrete: opportunities and challenges." *RILEM Technical Letters 1: 67-75*.
- Y.W.D. Tay, B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, K.F. Leong, 3D printing trends in building and construction industry: a review, *Virtual and Physical Prototyping*, 12 (2017) 261-276.
- Yang, L., K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon and S. Wiener (2017). "Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production."
- Zaid, O. and M. H. El Ouni (2024). "Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments." *Construction and Building Materials* 427: 136254.

- Zhang, J. and B. Khoshnevis (2013). "Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting." *Automation in Construction* 29: 50-67.
- Zhou, W., Zhu, H., Li, Q., Zhou, Y., Bai, J., & Zhang, Y. (2018). "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering." *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
- Guamán-Rivera R, Martínez-Rocamora A, García-Alvarado R, Muñoz-Sanguinetti C, González-Böhme LF, Auat-Cheein F. (2022) Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts. *Buildings*; 12(2):229. <https://doi.org/10.3390/buildings12020229>
- Puzatova A, Shakor P, Laghi V, Dmitrieva M. (2022) Large-Scale 3D Printing for Construction Application by Means of Robotic Arm and Gantry 3D Printer: A Review. *Buildings*; 12(11):2023. <https://doi.org/10.3390/buildings12112023>
- Nadis3d Construction. (2024). Erişim adresi: <https://nidus3d.com/bod2/>
- Specavia.pro Construction. (2024). Erişim adresi: <https://specavia.pro> ,
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Mater Struct* **45**, 1221–1232 <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- CyBe Construction. (2024). CyBe GR (Gantry Robot). Erişim adresi: <https://cybe.eu/solutions/3d-printing-houses/>
- Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Frank Will, Mathias Näther, Jens Otto, Martin Krause, Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Automation in Construction*, Volume 107, 2019, 102933, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>.
- Keating, S.J.; Leland, J.C.; Cai, L.; Oxman, N. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Sci. Robot.* 2017, 2, eaam8986.
- Zhang, X., Li, M., Lim, J. H., Weng, Y., Tay, Y. W. D., Pham, H., & Pham, Q. C. (2018). Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. *Automation in Construction*, 95, 98-106.

## **Bölüm 5**

### **Yenilikçi Teknolojik Uygulamalar ve Fonksiyonel Gıdaların Geleceği**

**Zeynep KİLCİ<sup>1</sup>**  
**Nilay KORKMAZ<sup>2</sup>**

---

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Susurluk Tarım ve Orman MYO, znale@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1700-8597

<sup>2</sup> Öğr. Gör., Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Susurluk Tarım ve Orman MYO, nkorkmaz@bandirma.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6436-6699

## Özet

Endüstrinin tüm dallarında olduğu gibi gıda endüstrisinde de gelişmeler aralıksız devam etmektedir. Bu gelişmelerin amacı halihazırda uygulanmakta olan süreçlerde iyileşmelerin sağlanması olmakla birlikte bazen de tüm uygulamaları ters yüz eden yenilikçi gelişmeler yaşanabilmektedir. Gıda ürünlerini işlemek için, geliştirilen yenilikçi teknolojilerin kullanılabileceği yorumlanmaktadır, bu sayede artan probiyotik işlevsellik, prebiyotik bileşenlerde stabilitenin artışı ve biyoaktif bileşik konsantrasyonlarında yükselme sağlanacaktır. Gerek üretim gerek işleme süreçlerinde yaşanan gelişmeler gıdanın bütününe veya herhangi makro veya mikro bir bileşenini etkileyebilmektedir. Esasen uzun yıllardır tükettiğimiz ancak sağlık üzerine olumlu etkilerinin bilinirliğinin artmasıyla birlikte probiyotik, prebiyotik ve postbiyotik ürünler de bu gelişmelerden nasibini almaktadır.

Bu derleme, gelişen teknolojilerin fonksiyonel gıdalar içerisinde önemli bir yer kaplayan probiyotik, prebiyotik ve postbiyotik ürünler üzerindeki etkisine ilişkin literatürü taramayı hedeflemektedir. Yeni teknolojilerin probiyotik ürünlere uygulanması probiyotiklerin hayatta kalmasını artırabilir ve probiyotik özellikleri iyileştirebilir. Ayrıca yine yenilikçi teknolojiler kullanılarak fermantasyon süreci optimize edilebilir, ilgilenilen bileşikler (bakteriyosin, oligosakkaritler, peptitler, fenolik bileşikler, flavonoidler) rahatlıkla ve istenilen miktarlarda üretilebilir veya korunabilir, biyoaktivite (vitamin, aglikonlar, kalsiyum) ve duyuşal özellikler geliştirilebilir. Artan sağlık etkileri olan postbiyotiklerin elde edilmesi için de yine gelişen teknolojiler uygulanabilir. Geleneksel ısış işlemlere kıyasla sağlık etkileri daha iyi olan postbiyotik ürünler elde etmek için yenilikçi teknolojilere artık sıklıkla başvurulmaktadır. Yapılmış mevcut çalışmalar, gelişen gıda işleme teknolojilerinin gıdalardaki probiyotik ve prebiyotiklerin etkinliğini artırdığını ileri sürmektedir. Sağlanan bilgiler, gıda endüstrilerinin ürünlerini işlemek için daha uygun bir teknoloji seçmesine yardımcı olabilir ve en çok kullanılan proses parametreleri için mevcut duruma kıyasen gelişme ve iyileşme sağlayabilir.



## 1. Giriş

Zamanla gıdanın amacı sadece tat ve beslenmenin ötesine geçerek ek işlevsellik yoluyla insan sağlığını iyileştirmenin güçlü bir yolu olarak da hizmet etmektedir. Günlük yeme – içme alışkanlığı veya daha genel haliyle diyet genel insan sağlığında çok önemli bir rol oynar ve çok sayıda hastalığa karşı ön saflarda savunma görevi görür. Gıda ve sağlık arasındaki ilişkiye olan ilgi arttıkça fonksiyonel gıdalara olan talep de artmaktadır. Fonksiyonel gıdalar genel olarak kişinin diyetine dahil edildiğinde sağlık açısından çeşitli faydalar sağlayan gıda ürünleri olarak tanımlanmaktadır. Fonksiyonel gıdalar tanımlarına göre dört ana kategoriye ayrılabilir: geleneksel gıdalar, değiştirilmiş gıdalar, özel diyet ihtiyaçları için tasarlanmış gıdalar ve tıbbi gıdalar. Tıbbi olarak tanımlanmış kriterleri karşılamak ve popülasyonları beslemek için biyoaktif bileşenlerin gıdalara dahil edilmesi ve karakterizasyonuna artan bir ilgi bulunmaktadır (Sørensen vd., 2022).

Son zamanlarda dikkat çeken bir strateji, fermantasyon reaksiyonlarından oluşturulan toz formülasyonlar olan fermentatların kullanılmasıdır. Fermentatlar, fermente olan bakterilerden veya et suyuna atılan metabolitler ve biyoaktif bileşiklerden oluşabilir. Süt ve süt ürünleri tat, doku ve besin değeri açısından çok çeşitliliğe sahip bir besin grubu olması nedeniyle dünya çapında altı milyardan fazla insan tarafından tüketilmektedir. Süt mineraller ve vitaminler gibi faydalı bileşenlerle zenginleştirilmiştir. Özellikle fermente süt ürünleri, farklı canlı laktik asit bakterisi türleri (LAB) için iyi bir kaynaktır (Kruger vd., 2012).

Peptitler, ekzopolisakkaritler (EPS), bakteriyosinler, bazı amilaz proteazlar, lipaz enzimleri ve laktik asit, fermantasyon sırasında LAB tarafından üretilen başlıca biyoaktif moleküllerdir. Ancak tüm LAB suşları bu bileşikleri üretemez. LAB'ın sağlığa olan faydaları, onları terapötik beslenmede popüler bir içerik haline getirmiştir. LAB'nin terapötik beslenmede kullanıldığı en yaygın yollardan biri probiyotik takviyeleri şeklindedir. Fermente süt ürünleri, fermantasyon işlemi sırasında oluşan mikrobiyal metabolitlerin (biyojenik veya biyoaktif etki) etkisiyle ve ayrıca bileşimlerinden izole edilen bazı LAB suşlarının probiyotik etkilerinden dolayı sağlığı geliştirici etkiler gösterebilir. Birçok çalışma yoğurt, fermente süt ve kefir gibi probiyotik içeren süt ürünlerinin tüketiminin, kolesterol metabolizması, tümör baskılanması, daha hızlı yara iyileşmesi, bağışıklık sistemi modülasyonu, anjiyotensin dönüştürücü enzim (ACE) inhibisyonu ve antimikrobiyal aktivite gibi çeşitli sağlık yararlarıyla bağlantılı olduğunu belirtmiştir (Savaiano & Hutkins, 2021). Dahası, probiyotik tüketimi, gıda ve bağlanma bölgeleri açısından patojenleri geride bırakan ve yerel olarak antimikrobiyal metabolitler üreten faydalı bakterilerin büyümesini teşvik ederek

bağırsak ve idrar yolu mikrobiyomunu dengelemektedir. Bir yan fayda olarak probiyotikler, konakçının bağışıklık sistemini etkileyerek mukozal bariyer fonksiyonuna yardımcı olmaktadır (Ağagündüz vd., 2021).

İçinde bulunduğumuz yüzyılın çarpıcı bir özelliği tüketicilerin düşük veya azaltılmış kalorili ve fonksiyonel bileşenlerin varlığıyla minimal düzeyde işlenmiş gıdalara yönelik arayışının ve talebinin artmasıdır. (Nowosad vd., 2021). Bu gerçek temel olarak gıdalla ilişkili besinsel faydalar ve refah arayan tüketici beslenme alışkanlıklarının değişmesiyle ilgilidir. Günümüzde tüketiciler, kardiyovasküler rahatsızlıklar, obezite, diyabet ve kanser gibi kronik hastalıklara yakalanma riskini düşüren/düşürecek gıdalar talep etmektedir (McClements & Grossmann, 2021).

Fonksiyonel gıdalar temel beslenmenin ötesinde sağlık, fiziksel ve zihinsel iyilik sağlayan gıdalar olarak bilinmektedir. Bu nedenle fonksiyonel gıda tüketmek, sağlığı korumak ve ilaç harcamalarını azaltmak için etkili ve görece ucuz bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Granato vd., 2020). Fonksiyonel gıdalar ile ilgili probiyotikler ve prebiyotikler üzerlerine en çok çalışılan başlıklar arasındadır. Özellikle obez insanlarla yapılan çalışmalarda en çok incelenen fonksiyonel bileşenler arasında probiyotikler dikkat çekmektedir (Longoria-García vd., 2018).

Literatürde probiyotiklerin “yeterli miktarda uygulandığında konakçıya sağlık açısından fayda sağlayan canlı mikroorganizmalar” olarak açıklandığı görülmektedir (Hill vd., 2014). Prebiyotikler ise esas olarak mikroorganizmalar tarafından tüketilen ve sağlık üzerine olumlu etkilerde bulunan mikroorganizmaların metabolik ihtiyaçlarını karşılamak için kullandığı substratlardır (Gibson vd., 2017). Her iki fonksiyonel bileşeni de içeren ve simbiyotik olarak isimlendirilen gıda ürünleri, probiyotiklerin veya prebiyotiklerin tek başına kullanılmasına göre daha fazla avantaja sahip olan ve bağırsak aktivitesini düzenlemeye yardımcı olan gıda ürünlerini ifade etmektedir. (Balthazar vd., 2017). Tüketicilerin artan talepleriyle doğru orantılı olarak bu bileşenleri içeren gıda ürünleri artık market raflarında kendilerine daha geniş yer bulmaktadır (González-Herrera vd., 2021).

Laktik asit bakterileri gıda endüstrisinde umut vaat etse de, bunların klinik beslenmede gıda besin maddesi olarak kullanılması ek zorluklar doğurmaktadır. Klinik araştırmalar incelendiği zaman probiyotik ilaç alan bireylerin tümünün sağlığında iyileşme gözlenmediği ve hatta bunun yanı sıra sayıları çok az olmakla birlikte bazı probiyotik türlerinin fırsatçı hastalıkların nedensel ajanları olabileceğini göstermiştir. Bu çok nadir görülen hastalıklar çoğunlukla bağışıklık sistemi baskılanmış kişiler gibi daha yüksek risk kategorilerinde görülmektedir. Bağışıklık sistemi baskılanmış bireylerde, belirli LAB suşlarının diğer güvenlik

sorunlarının yanı sıra enfeksiyon veya sepsis riskini artırma ihtimali bulunmaktadır. Diyet besinleri olarak kullanılan LAB'nin diğer ilaçların etkinliğini veya emilimini tehlikeye atmamasını sağlamak da önemle üzerinde durulması gereken hususlardan biridir (Katkowska vd., 2021). Gelecekte yapılacak çalışmalarda, LAB'ın terapötik etkilerinin yaratılmasında ve sunulmasında ilaç-besin ilişkisinin vurgulanması önemlidir. Yakın gelecekte probiyotik-ilaç ve probiyotik-bağırsak mikrobiyotası etkileşimlerine ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir çünkü kesin mekanizmalar halen kısmen anlaşılmıştır (Purdell vd., 2023). Ek olarak, LAB'lerin konakçı üzerinde immün modüle edici etkilere sahip olduğu bilinmektedir, bu da onları inflamatuvar hastalıklar da dahil olmak üzere bir dizi hastalık için prospektif terapötik ve önleyici bir seçim haline getirmektedir. Probiyotiklerin cinsini ve türünü anlamak, konakçı üzerinde istenen etkileri elde etmek için çok önemlidir, çünkü probiyotik etkileri doza, duruma ve suşa bağlı olarak değişmektedir. LAB kullanımı sağlıklı bireyler için genel olarak güvenli kabul edilebilir. Özellikle bağışıklığı baskılanmış konakçılar ve hassas gruplarda hem kısa hem de uzun vadede olumsuz olaylara ilişkin daha fazla kanıt acil ihtiyaç duyulmaktadır (Merenstein vd., 2023).

Postbiyotikler büyüme ve fermantasyon süreci boyunca faydalı mikroorganizmalar tarafından üretilen ve tüketicinin sağlığı üzerinde olumlu etkisi olan metabolit yan ürünler olarak nitelendirilebilir. LAB'den hazırlanan postbiyotiklerde organik asit (laktik asit, asetik asit), karbonhidratlar, enzimler, bakteriyosinler, vitaminler (B12 vitamini, riboflavin ve folat) ve kısa zincirli yağ asitleri dahil çok sayıda biyoaktif metabolit mevcuttur (Moradi vd., 2020) . Postbiyotiklerin prosedür suşları, bakteriyel (*Lactobacillus*, *Streptococcus* ve *Bifidobacterium*) ve mantar türlerinden (*Saccharomyces*) olanlar dahil olmak üzere biyoaktif metabolitlerin üretiminde önemli bir rol oynayan fermente gıdalarda doğal olarak bulunabilir. Postbiyotik tüketimi bağırsak sağlığının iyileştirilmesine, antiinflamatuvar etkilere ve solunum yolu enfeksiyonlarının önlenmesine yardımcı olma potansiyelindedir (Thorakkattu vd., 2022).

Paraprobioyotik ve postbiyotik kullanmak, gıda alımı yoluyla probiyotiklerin sağlık yararlarından faydalanmanın alternatif bir metodu olarak kabul görmektedir (Parvarej vd., 2021). Paraprobioyotikler inaktive edilmiş veya yaşayamayan mikrobiyal hücrelerdir, postbiyotikler ise canlı bakteriler tarafından salgılanan veya bakteriyel lizis sonrasında ortama verilen ürünler veya metabolik üretilen yan ürünler olarak ifade edilmektedir. Postbiyotikler, antikarsinojenik, anti-inflamatuvar, anti-oksidatif özellikler sağlamanın yanı sıra yaşamı tehdit eden birçok hastalıkla ilgili riskleri azaltarak konakçıya fizyolojik faydalar sunmaktadır (Barba vd., 2015).

Araştırılan ve üzerine çalışılan her yenilikçi gıda ürününün işlevsel etkinliği ancak bilimsel kanıtlarla desteklenirse anlam kazanacaktır. Bu nedenle her ülkenin özel düzenlemelerine bağlı olarak pek çok in vitro ve in vivo analizler gerçekleştirilmektedir. Örnek vermek gerekirse söz konusu probiyotikler olduğu zaman bağırsak hücrelerine tutunma, epitelyal hücrelere ve mukozaya yapışma, safra tuzuna hidroliz etkisi, mikroorganizmaların asit toleransı, oto-agregasyon, co-agregasyon ve antimikrobiyal aktiviteyi ölçen ve belirleyen in vitro testler probiyotiklerin hedef organa ulaşma ve yeterli aktiviteyi gösterme yeteneğini bir anlamda garanti etmektedir (Kerry vd., 2018). Belirlenmiş fonksiyonel bileşenlerin gıda ürününe eklendiğinde farklı davranma ihtimali her zaman bulunduğu için ilgili bileşen ve/veya gıdaların probiyotik, prebiyotik ve postbiyotik ürünler için gözlemlenen in vitro faydalarının hayvanlar veya insanlar gibi bir konakçı organizmada doğrulanması önemlidir (Granato vd., 2020).

Fonksiyonel gıdaların faydalarına rağmen bu ürünlerin duyuşsal özellikler ve pratiklik açısından büyük zorlukları vardır. Ayrıca, geleneksel olarak gıda ürünlerine uygulanan ısı işleme, gıda ürünlerinin duyuşsal yönlerini değiştirebilmekte ve biyoaktif bileşik içeriğini azaltabilmektedir (Augusto, 2020). Bu nedenle, sağlık ile tüketim istek ve eğilimini birleştirerek mevcut gıda tüketimi eğilimlerini karşılamak amacıyla, söz konusu zorlukların üstesinden gelmek için yeni ortaya çıkan bazı gıda işleme teknolojileri üzerinde çalışılmaktadır (Guimarães vd., 2018).

Yükselen teknolojiler, yaşamın sosyal, ticari ve çevresel yönlerini değiştirme yeteneğine sahip, halihazırda geliştirilmiş veya gelecek yıllarda geliştirilecek olan yeni teknolojilerdir (Misra vd., 2017). Ortaya çıkan bu yeni teknolojiler, gıdalarda termal olmayan veya optimize edilmiş termal işlemler kullanan, besin kayıplarını önlemeyi, işleme ve depolama sırasında biyoaktif bileşiklerini korumayı ve gıda güvenliğini sağlamayı amaçlayan gıda işleme teknikleridir. Halihazırda gıda uygulamalarında kullanılmak amacıyla incelenen birçok yeni teknoloji mevcuttur, ancak bunların pratikte uygulanabilirliğini kanıtlamak için hala önemli araştırmalara talep ve ihtiyaç vardır. Gıda ürünlerinin işlenmesine yönelik yeni teknolojiler arasında üzerinde yoğunlukla çalışılan uygulamalar arasında yüksek yoğunluklu ultrason, yüksek basınç, darbeleri elektrik alanı, darbeleri ışık teknolojisi, süperkritik karbondioksit teknolojisi, soğuk plazma teknolojisi, omik ısıtma ve mikrodalga işleme teknikleri belirtilebilir (Priyadarshini & Rajauria, 2019). Bu alanda yapılan bazı çalışmalar gıda işlemeyle ilgili gelişen teknolojilerin, gelişmiş fonksiyonel aktivitelere sahip gıda ürünleriyle sonuçlandığını göstermiştir. Bu sonuçları gösteren araştırmalar başlıca ultrason, yüksek basınç, darbeleri elektrik alanı, darbeleri ışık, soğuk plazma,

omik ısıtma ve süperkritik karbondioksit teknolojisi olarak öne çıkmaktadır (Guimarães vd., 2018).

Bu bilgiler doğrultusunda bu derleme çalışması probiyotik bakteri suşlarına ve probiyotik, prebiyotik ile postbiyotik gıda ürünlerine uygulanan yeni teknolojilere ilişkin en güncel bilgileri sunmak amacıyla hazırlanmıştır.

## **2. Probiyotik, Prebiyotik ve Postbiyotik Kavramlarına Genel Bir Bakış**

Probiyotikler gıda veya ilaç/nutrasötik kapsüller yoluyla metabolizmaya alınabilir. Gıdalara eklenen probiyotiklerin, kalın bağırsakta kolonileşebilmesi ve sağlık açısından fayda sağlayabilmesi için öncelikle tüketilinceye kadar gerçekleştirilen depolama sürecinde tüketiciye vaad edilen sayıyı korumalı ve tüketildikten sonra gastrointestinal sistemden geçiş sırasında yeterli miktarda hayatta kalması gerekmektedir. İnsanlar tarafından probiyotik alımıyla ilgili faydalı etkiler diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, Crohn hastalığı, ülseratif kolit, gastrointestinal bozukluklar, ürogenital hastalık, karaciğer hastalıkları ve farklı kanser türleri gibi rahatsızlıklara yakalanma noktasında tüketiciye olumlu destek sunması olarak ifade edilebilir (Hill vd., 2014; Vasquez vd, 2020). Ayrıca laktoz intoleransını, çeşitli enfeksiyonları, alerjileri, bağışıklık sistemini, solunum yolu enfeksiyonlarını, ağız sağlığını, dermatit, viral enfeksiyonlar üzerinde iyileştirici etkide bulunabilirler (Lopez-Santamarina vd., 2021).

Potansiyel probiyotik seçimi için temel kriterlerden biri bunların epitelyal ve bağırsak mukoza hücrelerine yapışmasıdır. Bağırsak duvarı hücrelerine olan bu yapışma, probiyotiklerin bağırsak hareketliliğini önler ve geçici kolonizasyona, bağışıklık modülasyonunun artmasına ve patojenik mikroorganizmaların rekabetçi bir şekilde dışlanmasına izin verir. Ek olarak potansiyel bir probiyotik, safra tuzu hidroliz etkisi, asit toleransı, hücre zarı hidrofobikliği, oto-agregasyon, co(birlikte)-agregasyon ve antimikrobiyal aktivite gibi içsel faktörlere dayalı olarak seçilir. Bunların ötesinde depolama sürecinde gıdanın bekleme süresi, sıcaklığı, pH değeri ve su aktivitesi gibi dışsal özellikler de bakteri suşunun büyümesi ve seçimi ile ilişkilidir (Fiocco vd., 2020).

Probiyotik mikroorganizmaları sindirim yolunda korumak için probiyotiklerin prebiyotikler ile birlikte uygulanması, probiyotik mikroorganizmaların kapsüllenmesi gibi çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Gıdalardaki yeterli probiyotik konsantrasyonu en az 6-7 log kob/g olarak belirtilmekle beraber sağlık yararlarını teşvik etmeleri için günlük alım miktarının yaklaşık 8-9 log kob/g düzeyinde olması önerilmektedir. Bu yüksek konsantrasyonlar sindirim yolu boyunca olası kayıpları telafi etmek için belirlenmiş olup gıda ürününe eklenen prebiyotikler yardımıyla da gastrointestinal sindirim yolunda probiyotik mikroorganizmalarda yaşanacak kayıpların azaltılabileceği belirtilmektedir (Balthazar ve ark., 2017).

*Lactobacillaceae* familyası *Bifidobacterium* grubu ile birlikte insan tüketimi için probiyotik olarak en sık kullanılan ve bilinen türlerdir. Bu iki büyük familyanın yanı sıra *Bacillus* gibi cinsler de probiyotik özelliklere sahip türler sunabilmektedir (Pereira vd., 2018). Süt ürünleri probiyotik mikroorganizmaların süt matrisine kolay adaptasyonu ve tüketiciler tarafından süt ve ürünlerinin genel olarak yüksek kabul görmesi nedeniyle, probiyotikleri insanlara ulaştırmak için kullanılan en popüler araçtır. Bununla birlikte unlu mamuller, çikolatalar, makarnalar, tahıl barları, et, meyve ve balık gibi diğer gıda ürünleri de probiyotikleri başarıyla tüketiciye sunma potansiyeline sahiptir (Terpou vd., 2019).

Prebiyotik kavramından bahsedilmek istendiğinde birçok bileşiğin prebiyotik olarak sınıflandırılabilirdiğini söylemek mümkün olsa da çalışmaların çoğunda fruktooligosakkaritler (FOS), inülin, galaktooligosakkaritler (GOS), mannanoligosakkarit (MOS) ve ksilooligosakkarit (XOS) gibi sindirilmeyen karbonhidratların kullanıldığını belirtmek gerekmektedir. Ancak belirtilen bileşenlerin yanı sıra insan sütü oligosakkaritleri (human milk oligosaccharides, HMO), konjuge linoleik asit (conjugated linoleic acid, CLA), polifenolik bileşikler ve çoklu doymamış yağ asitleri (polyunsaturated fatty acids, PUFA) gibi diğer bileşikler de prebiyotik özellikler gösterebilmektedir. Çoğu prebiyotik, sağlık yararları sağlamak için günde 3 g'ın üzerinde bir doz gerektirse de yeterli dozaj ilişkili metabolik etkilere ve mikrobiyal ekosisteme göre değişiklik göstermektedir (Gibson vd., 2017).

Probiyotik mikroorganizmaların canlılığı konakçıya olumlu sağlık etkilerini taşımak için hayati öneme sahip olsa da ölü hücreler ve sentezlenmiş metabolitler de tüketiciye fayda sağlayabilmektedir. Örnek vermek gerekirse antioksidan ve antimikrobiyal peptitler, bazı yağ asitleri gibi biyoaktif bileşikler, organik asitler, kompleks ajanlar ve ekzopolisakkaritler insan sağlığı üzerine faydalı etkilere sahiptir (Almada vd., 2016). Yakın zamanda yayınlanan bir akademik çalışmada paraprobiyotikler ve postbiyotikleri aynı terimle birleştirme konusunda fikir birliğine varılmıştır. Bu şekilde postbiyotikler canlı probiyotik mikroorganizmalar tarafından üretilen veya hücre kırılmasından sonra konağa herhangi bir fizyolojik fayda sağlayan biyoaktif çözümler (ürünler veya metabolik yan ürünler) olarak tanımlanmaktadır (Moradi vd., 2020). Postbiyotik ürünleri karakterize etmek için mikroorganizmanın türü, inaktivasyon prosedürü, güvenlik ve sağlık yararlarının kanıtı gibi bilgilere ihtiyaç vardır. Çalışmalar in vitro koşullarda postbiyotiklerin peynirde, et ve balıkta, sebzelerde, ekmekte ve meyve sularında patojen mikroorganizmalara karşı birçok antimikrobiyal aktivite sergilediğini göstermiştir. Bu özellikler gıda endüstrisinin yanı sıra postbiyotiklerin potansiyel antibiyofilm ajanları olarak kullanımı açısından da

oldukça ilgi çekici olarak değerlendirilmektedir (Koohestani vd., 2018; Sharahi vd., 2019).

### **3. Gelişen Güncel Teknolojilere Genel Bir Bakış**

Tüketiciye güvenli, sağlıklı ve minimum düzeyde işlenmiş gıdalar sunarken geleneksel termal süreçlerin sınırlamalarının üstesinden gelmek için birçok yeni teknik kullanılabilir. Ayrıca gelişen güncel yenilikçi teknolojiler geleneksel koruma yöntemlerine kıyasla daha düşük enerji gereksinimi ve gıda işleme süreçleri için daha az su gereksinimi ile daha çevre dostu ve sürdürülebilir olma gibi önemli avantajlar da sunabilmektedir. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda endüstriyel ilginin de giderek artmasıyla birlikte yeni geliştirilen teknolojiler üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır (Knorr vd., 2011).

#### **3.1. Ultrason Teknolojisi**

İnsan işitme eşiğinin (>16-20 kHz) üzerindeki ses dalgaları ultrason dalgaları olarak isimlendirilmiştir. Ultrason, frekans aralıklarındaki farka bağlı olarak düşük ve yüksek yoğunluklu ultrason (high-intensity ultrasound, HIUS) olmak üzere iki farklı yaklaşımda incelenebilir. Düşük yoğunluklu ultrason 100 kHz'den yüksek frekanslar ve  $1 \text{ W/cm}^2$ 'nin altındaki yoğunluklarla karakterize edilirken HIUS, 20 ila 500 kHz arasındaki frekanslar ve  $1 \text{ W/cm}^2$ 'den yüksek yoğunluklarla karakterize edilmektedir. Yüksek yoğunluklar ve genlikler, sıvının buhar basıncının altında yerel basınçlara neden olmakta ve bu da ortamdaki gaz kabarcıklarının sürekli büyümesine yol açmaktadır. Sıvı kabarcıklar, artık yeterli enerjiyi ememedikleri zaman salınmakta ve boyut olarak genişlemektedir bu da kabarcıkların çökmesine neden olup kavitasyon olarak da bilinen mekanik, kimyasal ve termal etkilere neden olur. Kavitasyon ve ilişkili olaylar, HIUS'un gıda işlemedeki etkisinin çoğundan sorumludur (Knorr vd., 2011; Joshi vd., 2019).

Gıdada doğrudan ürüne (ultrason probu) uygulanabilen HIUS'un özelliği akustik enerjinin dönüştürücüden (ultrason dalgalarını oluşturan cihazlar) numuneye doğrudan yayılmasıdır. Bu sistemin dönüştürücüsünde sinyali yükseltmekten ve numuneye göndermekten sorumlu bir boynuz bulunur. HIUS ayrıca, bir birleştirme sıvısı (genellikle su) kullanılarak akustik enerjinin dönüştürücüden numuneye dolaylı olarak dağıtılmasıyla karakterize edilen ürüne (ultrason banyosu) dolaylı olarak da uygulanabilir (Guimaraes vd., 2019).

HIUS, gıdadaki bileşiklerin yapısını değiştirebilir, parçacıkları parçalayabilir, kütle transferini hızlandırabilir veya duvar ve sitoplazmik membrana zarar vererek yüzey sürtünmesi nedeniyle hücrelerin kırılmasına ve sızmasına neden

olabilir. Düşük sonoporasyon seviyelerinde (geçici gözenekler veya boşluklar), HIUS mikrobiyal büyümeyi artırabilir çünkü artan hücre zarı geçirgenliği, daha yüksek bir substrat transferine, hücresel yan ürünlerin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasına olanak tanır ve mikroorganizmalara besin ve oksijen tedarikini hızlandırır. Bununla birlikte, daha yüksek sonoporasyon seviyeleri, hücre zarı lipit çift katmanının değişmesi ve bozulması nedeniyle hücresel materyalin sızıntısına ve tüm bu olayların neticesi olarak da hücrenin ölümüne sebep olabilir. Bu şekilde, HIUS'tan önce probiyotikler eklendiğinde probiyotiklerde hücre ölümü olmadan istenen hücre geçirgenliği düzeylerine ulaşmak için işlem parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir (Guimaraes vd., 2019).

### 3.2. Yüksek Basınç Uygulamasıyla İşleme

Termal olmayan teknolojiler içerisinde araştırma ortamından yaygın endüstriyel ölçekli uygulamalara geçişi mümkün kılan yüksek basınç uygulamasıyla (high-pressure processing, HPP) işleme teknolojisidir. Bu teknoloji ilk olarak Japonya'da icat edilmiş olup 1990 yılında ilk ticari HPP ile işlenmiş ürünün geliştirilmesinden bu yana gıda endüstrisi tarafından giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır (Priyadarshini & Rajauria, 2019).

HPP gıda ürünlerinin korunması ve sterilizasyonu için uygulanan ve termal olmayan bir yöntemdir. Ürüne çok yüksek değerlerde basıncın iletilmesi için suyun bir ortam olarak kullanıldığı bu teknolojiye mayalar, küfler, gram-pozitif ve gram-negatif bakteriler ile bazı enzimlerin etkisizleştirilmesi sağlanır (Barba ve diğerleri, 2017; Mandal & Kant, 2017; Zhang ve diğerleri, 2019). Her türlü katı ve sıvı gıda ürünü için uygulanabilen HPP (Priyadarshini & Rajauria, 2019) ile sağlanacak mikrobiyal inaktivasyonun etkinliği uygulanan gıda matrisine, ilgili mikroorganizmanın direncine, basınç değerine, işlemin uygulandığı ortam ve ürünün sıcaklığına, HPP işleminin bekleme süresine bağlıdır (Zhang ve diğerleri, 2019).

HPP iki temel prensibe dayanmaktadır:

- i. Le Chatelier İlkesi (gıda kimyası ve mikrobiyoloji)
- ii. Pascal Yasası (izostatik ilke, gıdanın fiziksel özellikleri)

Le Chatelier İlkesi dengedeki bir sisteme, halihazırda sahip olduğu koşullarında bir değişiklik uygulandığında sistemin bu değişikliğe karşı koymaya ve dengeyi yeniden kurmaya çalışacağını ifade eden bir prensiptir. Pascal Yasası ise uygulanan basıncın numune boyunca basınç gradyanları olmadan anında ve eşit şekilde iletilmesini, dolayısıyla ürünün boyutu ve geometrisinin önemsiz olduğunu ifade etmektedir. Genellikle gıda için kullanılan HPP, oda sıcaklığında 200-600 MPa'da 5 dakikadan kısa döngü süreleri boyunca gerçekleştirilmektedir (Aganovic vd., 2021).



HPP uygulamasında kimyasal özellikler ve özellikle moleküllerin kovalent bağları bozulmadan kalırken, proteinlerin, nükleik asitlerin ve polisakkaritlerin ikincil, üçüncül veya dördüncül yapıları etkilenebilir. Renklerden, tatlardan ve besinlerden sorumlu olan daha küçük organik moleküller, baskın veya özel olarak kovalent bağa sahiptir ve bu bağlar HPP uygulamasından neredeyse hiç etkilenmedikleri için HPP uygulaması kalite parametrelerinin korunmasını da kolaylaştırmaktadır (Mandal & Kant, 2017).

HPP, probiyotik hücreler veya probiyotik ürünler üzerinde 50 MPa'lık öldürücü olmayan basınç homojenizasyonunda kullanılabilir; bu değer belirli bakteri grubunun canlılığını, gastrointestinal bariyerlere karşı direncini arttırmak ve hücre zarı hidrofobikliği ile otomatik agregasyonunu geliştirmek için mükemmel bir yoldur (Burns vd., 2015).

### 3.3. Darbeli Elektrik Alanı Uygulaması

Darbeleri elektrik alanı (pulsed electric field, PEF), mikro saniyeden milisaniyeye kadar küçük bir süre boyunca yüksek elektrik alanlarının kısa darbelerini kullanan, termal olmayan bir teknolojidir. Bitki hücrelerinde stres indüksiyonu için tersinir geçirgenleştirme amacıyla uygulanan yoğunluklar 0,1 ile 1 kV/cm arasında değişebilir. Bitki ve hayvan dokusunun geri dönüşümsüz geçirgenliği için 0,5–3 kV/cm aralığı kullanılır. Mikrobiyal hücrelerin geri dönüşümsüz geçirgenliği için 15-40 kV/cm aralığı uygulanır. PEF, bir oda içindeki elektrotlar arasına yerleştirilen ürünün tamamından geçer (Knorr vd., 2011; Priyadarshini v& Rajauria, 2019).

PEF teknolojisi hücre zarlarının geçici geçirgenliği ve reaktif türlerin hücresel bölmeler arasında elektroforetik hareketi yoluyla hücrelerde ölümcül hasara neden olabilir veya ölümcül olmayan strese neden olabilir. Örneğin gıdalardaki mikroorganizmaları etkisiz hale getirmek için geri dönüşü olmayan elektroporasyon koşulları (orta veya çok yüksek alan gücü) kullanılmaktadır (Wang vd., 2019). PEF tedavisi sırasında mikrobiyal inaktivasyonu etkileyen faktörler:

- i. Ekipmanın elektrik alan gücü gibi işlem parametreleri
- ii. Darbe genişliği ve şekli
- iii. Uygulama sıcaklığı
- iv. Uygulamaya maruz kalma süresi
- v. İlgili mikroorganizmanın tür, boyut, konsantrasyon ve büyüme aşaması gibi mikrobiyal faktörler
- vi. pH, antimikrobialler, iyonik bileşikler, elektriksel iletkenlik ve iyonik güç gibi dış faktörler (Knorr vd., 2011).

Gıda, yüksek yoğunluklu darbelerle ( $\mu\text{s}$  başına 15-40 kV/cm) PEF'e maruz bırakıldığında, dirençli ısınma, elektroliz ve hücre zarlarının bozulması gibi

çeşitli olaylar meydana gelebilir ve bu da mikroorganizmanın inaktivasyonuna katkıda bulunur. PEF'in hücre zarında oluşturduğu hasara elektroporasyon adı verilir. PEF'in elektroporasyon mekanizması, sıvı veya yarı katı gıda ürünlerine yönelik çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Örneğin meyve sularının, sütün ve diğer gıda matrislerinin işlenmesi ve korunmasında başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca gıda ürünlerinde biyoaktif bileşenlerin veriminin artırılması gibi biyoproseslerde de kullanılabilir. Ancak PEF işleme, hava kabarcığı olmayan ve elektrik iletkenliği çok düşük olan katı gıda ürünleri için uygun değildir (Priyadarshini & Rajauria, 2019).

PEF teknolojisi uygun maliyetlidir, enerji açısından verimlidir ve çeşitli meyve sularında başarıyla kullanıldığı gibi üretim hatlarına kolaylıkla uygulanabilir. Ancak büyük ölçekli endüstriyel operasyonların iyileştirilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır (Priyadarshini & Rajauria, 2019).

### **3.4. Darbeli Işık Uygulaması**

Darbeli ışık teknolojisi, kızılötesi (700-1000 nm), görünür ışık (400-700 nm) ve ultraviyole (100-400 nm) dahil olmak üzere farklı dalga boylarında olabilen yüksek güçlü elektromanyetik radyasyon darbelerinin uygulanmasına dayanmaktadır. Bu ışık spektrumu (100-1000 nm), düşük frekans ve yüksek dalga boyundan dolayı genellikle yetersiz penetrasyon kapasitesine sahiptir. Ancak bu ışık türleri arasında mikrobiyal inaktivasyon için en çok kullanılan ultraviyole (UV) spektrumu en yüksek penetrasyon oranına sahiptir. Bu nedenle, UV ışığının malzemelere nüfuz etme kapasitesi biraz daha yüksek olmasına rağmen, darbeli ışık teknolojisinin gıda ve ambalaj malzemesinin yüzey seviyesinde etki gösterdiği düşünülmektedir (Mahendran vd., 2019).

Genel olarak darbeli ışık, yoğun geniş spektrumlu kısa süreli ışık darbelerinin uygulanmasını içerir. Mikrobiyal inaktivasyon mekanizması ile ilgili olarak, mikrobiyal DNA UV ışığını emerek yapısında fizikokimyasal değişikliklere neden olur, ardından hücre ölümüne yol açabilecek replikasyonu ve gen transkripsiyonunu engeller. Bu nedenle gıdalara darbeli ışık uygulanmasına yönelik çalışmaların çoğu, gıdaların korunması ve ambalaj malzemelerinin dekontaminasyonu ile ilgilidir (Mahendran vd., 2019).

### **3.5. Soğuk Plazma Teknolojisi**

Gıda ürünlerinin güvenliği ve kalitesi için ortaya çıkan soğuk plazma (cold plasma, CP) termal olmayan uygulamalar içerisinde yeni sayılabilecek bir teknolojidir. Plazma maddenin dördüncü hali olup CP, oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta veya azaltılmış basınçta (vakum) bir gazdaki elektrik deşarjı yoluyla indüklenmektedir. Bu iyonlaştırıcı gaz serbest elektronlar, iyonlar ve nötr

parçacıkların yanı sıra, kovalent bağları kırmak ve çok sayıda iyonu indüklemek için yeterli elektrik enerjisi ile sürekli etkileşim halinde olan reaktif türlerden (süperoksit, hidroksil radikalleri, nitrik oksit, ozon vs) oluşur. CP tarafından üretilen bileşiklerin mikrobiyal inaktivasyonda kritik bir role sahip olduğu yaygın olarak rapor edilmiştir (Priyadarshini & Rajauria, 2019).

Plazmanın tetiklediği ve hücre ölümüne katkıda bulunan üç mekanizma vardır:

- i. Plazma oluşumu sırasında oluşan hücre yüzeylerinde reaktif türlerin aşındırılması,
- ii. Bileşiklerin buharlaşması ve UV fotonlarının içsel fotodesorpsiyonu
- iii. Genetik materyalin yok edilmesi (Coutinho ve diğerleri, 2018).

Plazmanın açığa çıkmasından sonra mikroorganizmalar, bakteri yüzeyi tarafından emilen ve yüzeyde yırtılmaya neden olan sonrasında da hücre ölümüyle sonuçlanan uçucu bileşikler ( $CO_2$  ve  $H_2O$ ) oluşturan radikaller ( $OH$  ve  $NO$ ) tarafından bombardımana tutulur. Ayrıca CP, nemli hava plazması tarafından tetiklenen asitleşme ile hücre transmembran potansiyelini değiştirerek ve hücre içi pH'ı düzenleyerek membran geçirgenliğini artıran gözeneklere neden olabilir. Dahası, aktif türlerin girişine izin vererek, DNA'ya, proteinlere ve diğer iç hücre bileşenlerine zarar vererek iç sıvı hücrenin serbest bırakılmasına katkıda bulunabilir (Phan vd., 2017).

CP'nin düzgün çalışması için gaz bileşimi, gaz akışı, elektrik girişi (voltaj, frekans, güç), plazmaya maruz kalma modu (maruz kalma doğrudan veya dolaylı/uzaktan olabilir), uygulama süresi ve bağlı nem gibi temel parametreler dikkate alınmalıdır. Ayrıca ürün türü (sıvı veya katı), gıda bileşimi ve hedef mikroorganizmaların başlangıç konsantrasyonu gibi ürün parametreleri de hayati öneme sahiptir (Misra & Jo, 2017).

Plazma işleme, çevre açısından güvenli kabul edilir ve plazma gücü kapatıldıktan sonra aktif türler ortadan kaybolduğunda tüm ekolojik standartları karşılayabilir. Reaktif plazma türlerinin nüfuz etme gücünün az olması nedeniyle mikrobiyal inaktivasyon gıda yüzeyinde meydana gelir. Bu nedenle işlenecek ürünü seçerken dikkatli olması gerekmektedir (Coutinho vd., 2018).

#### **4. Sonuç ve Öneriler**

Bu derleme çalışmasında gelişen yeni teknolojilerin probiyotik, prebiyotik ve postbiyotik ürünler ile probiyotik bakteri türleri üzerindeki etkisine ilişkin literatür taraması yapılması hedeflenmiştir. Genel bir bakış açısıyla probiyotik ve prebiyotik ürünlerde gelişen yeni teknolojilerin uygulanması, probiyotiklerin

hayatta kalma oranını ve ürünlere karşı direnci artırabilir, probiyotik özelliklerini iyileştirebilir, biyoaktif bileşikleri koruyabilir veya artırabilir. Ayrıca gıda endüstrisi için vazgeçilmez bir özellik olan fermantasyon uzunluğunu azaltmak ve ürünlerin duysal özelliklerini geliştirmek için de kullanılabilir. Bu noktada prebiyotik bileşenlerin yeni ortaya çıkan teknolojilerin çoğuna karşı stabil bir duruş sergilediği belirtilebilir.

Gelişen teknolojilerin probiyotik suşlarına uygulanmasıyla ilgili çalışmalar farklı teknikler (PEF ve HIUS) kullanılarak kolesterolün probiyotik hücre zarına tutunmasının iyileştirilmesi ve probiyotiklerin optimizasyonu gibi probiyotik özellikleri üzerinde olumlu sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir. Ayrıca fermantasyon ortamında PEF uygulandığında probiyotik büyümesinin, bakteriyosin üretiminin ve vitamin biyoaktivitesinin artırılması, HPP kullanıldığında probiyotik canlılığının ve gastrointestinal direncin artırılması gibi özellikler üzerinde olumlu gelişmeler yaşandığı belirlenmiştir. Ancak çalışmaların çoğu in vitro olarak yürütülmekte olduğundan gelişen teknolojilere tabi tutulan ürünlerin sağlık üzerindeki etkilerinin in vivo testlerle değerlendirilmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- Aganovic, K., Hertel, C., Vogel, R., Johne, F. R., Schlüter, O., Schwarzenbolz, U., Jäger, H., Holzhauser, T., Bergmair, J., Roth, A., Sevenich, R., Bandick, N., Kulling, S. E., Knorr, D., Engel, K. H., & Volker, H. (2021). Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **20**, 3225–3266.
- Ağagündüz, D., Yılmaz, B., Şahin, T. Ö., Güneşliol, B. E., Ayten, Ş., Russo, P., ... & Özogul, F. (2021). Dairy lactic acid bacteria and their potential function in dietetics: The food–gut–health axis. *Foods*, *10*(12), 3099.
- Almada, C. N., Almada, C. N., Martinez, R. C. R., & Sant'Ana, A. S. (2016). Paraprobiotics: Evidences on their ability to modify biological responses, inactivation methods and perspectives on their application in foods. *Trends in Food Science & Technology*, **58**, 96–114.
- Augusto, P. E. (2020). Challenges, trends and opportunities in food processing. *Current Opinion in Food Science*, **35**, 72–78.
- Balthazar, C. F., Pimentel, T. C., Ferrão, L. L., Almada, C. N., Santillo, A., Albenzio, M., & Cruz, A. G. (2017). Sheep milk: Physicochemical characteristics and relevance for functional food development. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **16**(2), 247–262.
- Barba, F. J., Galanakis, C. M., Esteve, M. J., Frigola, A., & Vorobiev, E. (2015). Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of high-added value compounds from blackberries. *Journal of Food Engineering*, **167**, 38–44.
- Burns, P. G., Patrignani, F., Tabanelli, G., Vinderola, G. C., Siroli, L., Reinheimer, J. A., & Lanciotti, R. (2015). Potential of high pressure homogenisation on probiotic Caciotta cheese quality and functionality. *Journal of Functional Foods*, **13**, 126–136.
- Coutinho, N. M., Silveira, M. R., Rocha, R. S., Moraes, J., Ferreira, M. V. S., Pimentel, T. C., & Cruz, A. G. (2018). Cold plasma processing of milk and dairy products. *Trends in Food Science & Technology*, **74**, 56–68.
- Fiocco, D., Longo, A., Arena, M. P., Russo, P., Spano, G., & Capozzi, V. (2020). How probiotics face food stress: They get by with a little help. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **60**(9), 1552–1580.
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). The international scientific association for probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on

- the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews in Gastroenterology & Hepatology*, **14**, 491–502.
- Gibson, G. R., Hutkins, R., Sanders, M. E., Prescott, S. L., Reimer, R. A., Salminen, S. J., Scott, K., Stanton, C., Swanson, K. S., Cani, P. D., Verbeke, K., & Reid, G. (2017). The international scientific association for probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics. *Nature Reviews in Gastroenterology & Hepatology*, **14**, 491–502.
- González-Herrera, S. M., Bermúdez-Quiñones, G., Ochoa-Martínez, L. A., Rutiaga-Quiñones, O. M., & Gallegos-Infante, J. A. (2021). Synbiotics: A technological approach in food applications. *Journal of Food Science and Technology*, **58**(3), 811–824.
- Granato, D., Barba, F. J., Kovačević, D. B., Lorenzo, J. M., Cruz, A. G., & Putnik, P. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, **11**, 93–118.
- Guimarães, J. T., Silva, E. K., Alvarenga, V. O., Costa, A. L. R., Cunha, R. L., Sant'Ana, A. S., & Cruz, A. G. (2018). Physicochemical changes and microbial inactivation after high-intensity ultrasound processing of prebiotic whey beverage applying different ultrasonic power levels. *Ultrasonics Sonochemistry*, **44**, 251–260.
- Guimarães, J. T., Silva, E. K., Ranadheera, C. S., Moraes, J., Raices, R. S. L., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2019). Effect of high-intensity ultrasound on the nutritional profile and volatile compounds of a prebiotic soursop whey beverage. *Ultrasonics Sonochemistry*, **55**, 157–164.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., & Salminen, S. (2014). The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews in Gastroenterology & Hepatology*, **11**(8), 506–514.
- Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., & Salminen, S. (2014). The international scientific association for probiotics and prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews in Gastroenterology & Hepatology*, **11**(8), 506–514.
- Joshi, S., Mobeen, A., Jan, K., Bashir, K., & Azad, Z. R. A. A. (2019). Emerging technologies in dairy processing: Present status and future potential. In A. Malik, Z. Erginkaya & H. Erten (Eds.), *Health and safety aspects of food processing technologies* (pp. 105–120). Springer International Publishing.

- Katkowska, M., Garbacz, K., & Kusiak, A. (2021). Probiotics: should all patients take them?. *Microorganisms*, *9*(12), 2620.
- Kerry, R., Patra, J. K., Gouda, S., Park, Y., Shin, H.-S., & Das, G. (2018). Benefaction of probiotics for human health: A review. *Journal of Food and Drug Analysis*, *26*(3), 927–939.
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, *2*(1), 203–235.
- Koohestani, M., Moradi, M., Tajik, H., & Badali, A. (2018). Effects of cell-free supernatant of *Lactobacillus acidophilus* LA5 and *Lactobacillus casei* 431 against planktonic form and biofilm of *Staphylococcus aureus*. *Veterinary Research Forum*, *9*(4), 301–306.
- Kruger, M. C., Ha, P. C., Todd, J. M., Kuhn-Sherlock, B., Schollum, L. M., Ma, J., ... & Lau, E. (2012). High-calcium, vitamin D fortified milk is effective in improving bone turnover markers and vitamin D status in healthy postmenopausal Chinese women. *European journal of clinical nutrition*, *66*(7), 856-861.
- Longoria-García, S., Cruz-Hernández, M. A., Flores-Verástegui, M., Contreras-Esquível, J. C., Montañez-Sáenz, J. C., & Belmares-Cerda, R. E. (2018). Potential functional bakery products as delivery systems for prebiotics and probiotics health enhancers. *Journal of Food Science and Technology*, *55*(3), 833–845.
- Lopez-Santamarina, A., Lamas, A., Del Carmen Mondragón, A., Cardelle-Cobas, A., Regal, P., Rodriguez-Avila, J. A., Miranda, J. M., Franco, C. M., & Cepeda, A. (2021). Probiotic effects against virus infections: New weapons for an old war. *Foods*, *10*(1), 130.
- Mahendran, R., Ramanan, K. R., Barba, F. J., Lorenzo, J. M., López-Fernández, O., Munekata, P. E. S., & Tiwari, B. K. (2019). Recent advances in the application of pulsed light processing for improving food safety and increasing shelf life. *Trends in Food Science & Technology*, *88*, 67–79.
- Mandal, R., & Kant, R. (2017). High-pressure processing and its applications in the dairy industry. *Food Science and Technology Journal*, *1*(1), 33–45.
- McClements, D. J., & Grossmann, L. (2021). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *20*(4), 4049–4100.
- Merenstein, D., Pot, B., Leyer, G., Ouwehand, A. C., Preidis, G. A., Elkins, C. A., ... & Sanders, M. E. (2023). Emerging issues in probiotic safety: 2023 perspectives. *Gut microbes*, *15*(1), 2185034.

- Misra, N. N., & Jo, C. (2017). Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry. *Trends in Food Science & Technology*, **64**, 74–86.
- Misra, N. N., Koubaa, M., Roohinejad, S., Juliano, P., Alpas, H., Inácio, R. S., Saraiva, J. A., & Barba, F. J. (2017). Landmarks in the historical development of twenty first century food processing technologies. *Food Research International*, **97**, 318–339.
- Moradi, M., Kousheh, S. A., Almasi, H., Alizadeh, A., Guimarães, J. T., Yılmaz, N., & Lotfi, A. (2020). Postbiotics produced by lactic acid bacteria: The next frontier in food safety. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, *19*(6), 3390-3415.
- Moradi, M., Kousheh, S. A., Almasi, H., Alizadeh, A., Guimarães, J. T., Yılmaz, N., & Lotfi, A. (2020). Postbiotics produced by lactic acid bacteria: The next frontier in food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **19**(6), 3390–3415.
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of PEF technology in food processing and human nutrition. *Journal of Food Science and Technology*, **58**(2), 397–411.
- Parvarei, M., Fazeli, M. R., Mortazavian, A. M., Sarem Nezhad, S., Mortazavi, S. A., Golabchifar, A. A., & Khorshidian, N. (2021). Comparative effects of probiotic and paraprobiotic addition on microbiological, biochemical and physical properties of yogurt. *Food Research International*, **140**, 110030.
- Pereira, G. V. M., de Oliveira Coelho, B., Júnior, A. I. M., Thomaz-Soccol, V., & Soccol, C. R. (2018). How to select a probiotic? A review and update of methods and criteria. *Biotechnology Advances*, **36**(8), 2060–2076.
- Phan, K. T. K., Phan, H. T., Brennan, C. S., & Phimolsiripol, Y. (2017). Non-thermal plasma for pesticide and microbial elimination on fruits and vegetables: An overview. *International Journal of Food Science & Technology*, **52**(10), 2127–2137.
- Priyadarshini, A., & Rajauria, G. (2019). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **59**(19), 3082–3101.
- Purdel, C., Ungurianu, A., Adam-Dima, I., & Margină, D. (2023). Exploring the potential impact of probiotic use on drug metabolism and efficacy. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, *161*, 114468.
- Savaiano, D. A., & Hutkins, R. W. (2021). Yogurt, cultured fermented milk, and health: A systematic review. *Nutrition reviews*, *79*(5), 599-614.



- Sharahi, J. Y., Azimi, T., Shariati, A., Safari, H., Tehrani, M. K., & Hashemi, A. (2019). Advanced strategies for combating bacterial biofilms. *Journal of Cellular Physiology*, **234**(9), 14689–14708.
- Sørensen, H. M., Rochfort, K. D., Maye, S., MacLeod, G., Brabazon, D., Loscher, C., & Freeland, B. (2022). Exopolysaccharides of lactic acid bacteria: production, purification and health benefits towards functional food. *Nutrients*, *14*(14), 2938.
- Terpou, A., Papadaki, A., Lappa, I. K., Kachrimanidou, V., Bosnea, L. A., & Kopsahelis, N. (2019). Probiotics in food systems: Significance and emerging strategies towards improved viability and delivery of enhanced beneficial value. *Nutrients*, **11**(7), 1591.
- Thorakkattu, P., Khanashyam, A. C., Shah, K., Babu, K. S., Mundanat, A. S., Deliephan, A., ... & Nirmal, N. P. (2022). Postbiotics: current trends in food and pharmaceutical industry. *Foods*, *11*(19), 3094.
- Vasquez, E. C., Aires, R., Ton, A., & Amorim, F. G. (2020). New insights on the beneficial effects of the probiotic kefir on vascular dysfunction in cardiovascular and neurodegenerative diseases. *Current Pharmaceutical Design*, **26**(30), 3700–3710.
- Wang, T., Chen, H., Yu, C., & Xie, X. (2019). Rapid determination of the electroporation threshold for bacteria inactivation using a lab-on-a-chip platform. *Environment International*, **132**, 105040.
- Zhang, Z.-H., Wang, L.-H., Zeng, X.-A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, **54**(1), 1–13.

## **Bölüm 6**

### **Bitüm Modifikasyonunda Güncel Yaklaşımlar: Nanokil Örneği**

**Hande VAROL MOROVA<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> Arş. Gör., Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, [handevarol@isparta.edu.tr](mailto:handevarol@isparta.edu.tr), ORCID: 0000-0002-3481-9925

## ÖZET

Yol üstyapıları üzerine gelen dinamik yükleri tabanın şeklini değiştirmeden yayarak zemine ileten tabakalı yapılardır. Bir yol üstyapısı, proje ömrü boyunca her türlü iklim koşulları altında yeterli servis kabiliyetine sahip olmalıdır. Esnek kaplamalar inşa edildikten sonra zamanla iklim, artan dingil yükleri gibi nedenlerle bozulmaya başlamakta ve proje ömrünü tamamlamadan hizmet kabiliyetleri başka bir ifadeyle servis kabiliyetleri ve sürüş konforu düşmektedir. Esnek kaplamaların bakım ve onarım çalışmalarıyla düşen bu performanslarını eski haline getirmek çok zahmetli, aynı zamanda maliyeti yüksektir ve ülke ekonomisinde önemli bir paya sahiptir. Bu nedenlerle son zamanlarda çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak yol kaplamalarının ömrü uzatılmaya çalışılmaktadır. Günümüzde çeşitli polimerler, atıklar ve nanomalzemeler kullanılarak bitüm veya bitümlü sıcak karışım modifiye edilerek uzun proje ömrüne sahip, dayanıklı esnek kaplamaların imalatı amaçlanmaktadır.

Son zamanlarda nanoteknolojideki gelişmelere paralel olarak üstyapı inşasında da nanomalzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle üstyapı imalatında bağlayıcı olarak kullanılan bitümün fiziksel, reolojik ve mühendislik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla nanosilika, nanokil gibi çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır. Bitümün nanomalzemeler ile modifiye edilmesi ile hedeflenen, yol üstyapılarının stabilite, yorulma direnci, su hasarına karşı hassasiyet gibi mühendislik özelliklerini artırarak dayanıklı ve uzun ömürlü üstyapılar inşa etmektir. Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda güncel yaklaşımlar nanokil örneği ele alınarak incelenmiş ve bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara bir alt-yapı oluşturulması amaçlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Bitümlü sıcak karışım, nanomalzemeler, nanokil, bitüm modifikasyonu

## 1. GİRİŞ

Ülkelerin ulaşım ağlarının yeterli ve standartlara uygun olması gelişmişliklerinin bir ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Her geçen gün artan ağır taşıt trafiği yol üstyapısındaki bozulmaların artmasına bu da bakım ve onarım maliyetlerinin artmasıyla birlikte maddi kayıplara sebep olmaktadır. Bir yol üstyapısından istenen dayanıklı, uzun ömürlü ve bakım-onarım masraflarının düşük olmasıdır. Bitümlü sıcak karışımlar (BSK) trafik, iklim ve çevre koşullarının etkisiyle kalıcı deformasyon, yorulma çatlakları, düşük sıcaklık çatlakları ve sudan kaynaklı soyulma gibi çeşitli bozulmalara maruz kalmaktadır (Arslan vd., 2010).

Yol üstyapısında kullanılan bitümlü bağlayıcı ya da kaplamanın performansını artırmak ve deformasyon oluşumunu engellemek amacıyla katkı malzemelerinin belirli oranlarda bitüm veya karışıma ilave edilmesine modifikasyon adı verilmektedir. Ülkemizde ve dünyada, esnek kaplamaların performansını ve deformasyona karşı dayanımını artırmak için BSK veya bitüme çeşitli katkı malzemeleri ilave edilerek modifikasyon yapılmaktadır. Günümüzde ise bitüm modifikasyonu oldukça yaygın hale gelmiş olup modifikasyonda kullanılan katkı malzemeleri çeşitlenmektedir (Yiğit, 2021).

Yol yapım ve inşası yüksek maliyetli olduğundan dolayı yapımında kullanılacak malzemeler uygun şekilde seçilmeli, tasarlanmalı, bu yapılarda oluşacak yük dağılımları hesaplanmalı ve tasarım sürecine dahil edilmelidir. Mevcut araştırma konuları, yolların performansını ve hizmet ömrünü artırmaya odaklanan çalışmaları içermektedir. Farklı katkı malzemeleri kullanılarak yolların performansının ve hizmet ömrünün artırılması hedeflenmektedir (Torun, 2015).

Bilim insanları son yıllarda, iklim koşulları ve trafiğin neden olduğu dingil yüklerine karşı asfalt kaplamanın ömrünü ve durabilitesini artırma amacıyla birçok çalışma yapmaktadırlar. Bu amaçla bitümlü karışımlarda polimerler, elyaflar ve son zamanlarda çeşitli nanomalzemeler kullanılmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki gelişmelere paralel olarak son zamanlarda bitümlü karışımların modifiye edilmesinde nanopartikül malzemelerin kullanımı ilgi görmeye başlamıştır. Nanomalzemelerin geniş özgül yüzey alana ve küçük boyutlara sahip olması sebebiyle asfalt kaplamada katkı malzemesi olarak kullanılmalrı uygun olmaktadır (Günay, 2016).

Nanomalzemelerle gerçekleştirilen bitüm modifikasyonu sonucunda tekerlek izi direnci, yorulma direnci, yumuşama noktası gibi özelliklerin iyileştiği bilinmektedir. Bu çalışmada bitüm modifikasyonu üzerine ayrıntılı bir literatür araştırması yapılmış olup, modifiye bitüm ve nanokil ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

## 2. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

Üstyapılar bağlayıcı malzemenin türüne göre esnek ve rijit kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Rijit üstyapılarda bağlayıcı malzeme olarak portland çimentosu kullanılırken, esnek yol kaplamalarında ise bitüm kullanılmaktadır. Esnek kaplama, taşıtlar için gerekli sürüş konforu ve emniyeti sağlayarak oluşan gerilmelere karşı yeterli stabiliteye sahip farklı özelliklerden oluşan çok tabakalı esnek yapılar olarak tanımlanmaktadır. Esnek kaplamalar genellikle düşük ve yüksek standartlı kaplamalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Düşük standartlı kaplamalar arasında sathi kaplamalar, makadam temeller (veya yollar) ve koruyucu satıh tabakaları bulunurken, yüksek standartlı kaplamalar ise bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak adlandırılan kaplamalardır (Tunç, 2001).

Ülkemizde hem kent içi hem de kırsal yollarda genellikle esnek üstyapılar tercih edilmektedir. Esnek kaplamaların üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, gelen yükleri alt tabakalara ileterek taşıtlara sürüş konforu ve güvenlik sağlamak amacıyla tasarlanmaktadır. Yüksek standartlı yollarda kaplama, aşınma ve binder olarak iki ayrı tabaka halinde yapılmaktadır. BSK belirli gradasyon sınırları içerisinde kırılmış ve elenmiş kaba agregalar, ince agregalar ve mineral fillerin uygun orandaki bitümlü bağlayıcıyla plentte belirli bir sıcaklıkta homojen şekilde karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Hazırlanan bitümlü karışım belirli standartlar altında ve sıcaklıklarda taşındıktan sonra yine belirli bir sıcaklıkta sıkıştırılarak kaplama inşası gerçekleştirilmektedir. Agregat-bitüm karışımının yol kaplamasında kullanılabilmesi için dizayn aşamasında stabilite, dayanıklılık, esneklik, yorulma ve kayma direnci, su geçirmezlik ve işlenebilirlik gibi özelliklerin dikkate alınması gerekmektedir (Tunç, 2001).

BSK veya bitümlü bağlayıcının performansını artırmak, deformasyon oluşumunu engellemek amacıyla belirli oranlarda ve şartlarda çeşitli katkı malzemelelerinin bağlayıcı içerisine karıştırılmasına modifikasyon adı verilmektedir (Malcoç, 2002).

## 3. BİTÜM MODİFİKASYONU

Bitüm, reolojik yapısı dolayısıyla viskoelastik davranış sergilemektedir. Bu özelliğinden ötürü kalıcı deformasyona ve çatlaklara karşı direnç göstermekte ve kaplama performansında etkili olmaktadır. Ayrıca, bu özelliği sayesinde yüksek yüklenme hızlarında elastik davranış, düşük yüklenme hızlarında viskoz davranış, orta hızlarda ise hem elastik hem de viskoz davranış birlikte görülmektedir (Hunter, 1994).

Bitümlü bağlayıcıda meydana gelen deformasyonun bir bölümü elastik davranış sayesinde toparlanırken kalan bölümü viskoz davranıştan dolayı kalıcı deformasyona sebep olmaktadır. Modifikasyon işlemi ile daha uzun ömürlü,

stabilite ve performans özelliği yüksek, daha az bakım ve onarım gerektiren esnek üstyapıların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, daha yumuşak karışımlar elde ederek düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumunu azaltmak, daha sert karışımlar elde ederek ise yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumunu azaltmak amaçlanmaktadır. Modifikasyonun amaçları arasında işlenebilirliği ve sıkışmayı artırmak, karışımın dayanımını ve stabilitesini güçlendirmek, karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek, asfalt betonun kalitesini artırmak, yaşlanma veya oksidasyona karşı direnci artırarak bitümlü bağlayıcının ömrünü uzatmak, kaplama tabakalarının kalınlığını azaltmak ve kaplamanın ömür döngüsü maliyetini düşürmek de yer almaktadır (Orhan, 2012).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, bitümlü bağlayıcılar üzerine odaklanmış ve bitüme uygun katkı malzemelerinin eklenmesiyle reolojik davranışlarında olumlu değişikliklerin olduğunu göstermiştir. Bu katkılar bitümün özelliklerinde iyileşme sağlamış ve bitüm performansı üzerinde gelişmeler gözlemlenmiştir (Uncu, 2017).

Sahada kullanılacak katkı malzemeleri ve modifiye bitümlerin seçiminde etkinlik, uygunluk ve ekonomi gibi kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden katkının kolay elde edilebilir olması ve bitümle homojen şekilde karışabilmesi gerekmektedir. Modifikasyonda kullanılacak katkı yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitümü fazla akışkan hale getirmemeli, yüksek yol sıcaklıklarında ise bitümün viskoziteye karşı direncini artırmalıdır. Modifiye bitüm elde etmek amacıyla katkı arayışına girildiğinde bu özelliklerin yanında ekonomik olması da mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır (Uncu, 2017).

### **3.1. Bitüm Modifikasyonunda Nanomalzeme Kullanımı**

Nanonun Latincedeki kökeni "çok küçük boyutlu" anlamına gelmektedir. Bilimsel olarak ise, bir nanometre (nm) metrenin milyarda biri anlamına gelen ölçü birimidir. Nanomalzemeler, boyutlarının küçük olması ve geniş yüzey alanına sahip olmaları sebebiyle normal boyutlu malzemelerden daha farklı ve üstün özelliktedirler (Yao vd., 2013).

Nanoteknoloji, mevcut teknolojilerin daha gelişmiş hassasiyet ve küçültme kabiliyetine dayalı olarak hızla gelişen teknolojilerdir. Nanoteknoloji, maddeyi atomik, moleküler veya makromoleküler düzeyde kontrol etme yeteneğiyle yaklaşık 1 nm ile 100 nm aralığında ölçeklendirilmektedir. Bu ölçekteki yapılar, cihazlar ve sistemler küçük veya orta boyutlu olmalarından kaynaklanan özellikler ve işlevler göstermektedir. Bu boyut aralığındaki özellikler sayesinde yeni malzemelerin ve uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlanmaktadır (Ghile, 2006).

Nanoteknoloji, uygulanması durumunda neredeyse tüm endüstriyel ve toplumsal alanlarda kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu sayede tıpta, ulaşımda, tarımda vs. daha güvenli ve daha dayanıklı ürünlerin kullanımı mümkün olmaktadır. Bitüm modifikasyonu ile malzemenin adezyon, sıcaklık hassasiyeti, sürtünme özellikleri, oksidasyon direnci, yaşlanmaya karşı dayanıklılığı gibi performans özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Fang vd., 2013).

Son yıllarda, modifikasyon sürecinde ortaya çıkan sorunların üstesinden gelmek ve bitümlü bağlayıcının performansını daha fazla artırmak için yeni katkı malzemeleri arayışı ivme kazanmıştır. Bu kapsamda, gelişen nanoteknoloji ile beraber çeşitli nanomalzemeler bitümlü bağlayıcıların modifikasyon sürecine dahil edilmiştir. Farklı nanomalzemelerin bitüm modifikasyonuna eklenmesiyle, bitümlü bağlayıcıların termal, mekanik ve bariyer özelliklerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Golestani vd., 2012; Jasso vd., 2013). Bu gelişmeleri mümkün kılan, nanomalzemelerin diğer malzemelerden daha küçük boyutta ve yüksek yüzey alanına sahip olmalarıdır, bu da onlara farklı ve üstün özellikler kazandırmaktadır (Yao vd., 2013).

### 3.2. Nanokil

Kil, doğal olarak oluşan bir ikincil mineraldir ve genellikle hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan meydana gelmektedir (Önalp, 2007). İki mikron veya daha küçük dane boyutuna sahiptir (Batman, 2015). Pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren katı bir hal alır ve ıslakken hamur kıvamında şekil verilebilecek kadar plastik özelliklere sahiptir (Öztürk, 2012).

Killer genellikle saf halde bulunmazlar, çoğunlukla farklı elementler ve mineraller içerirler ve çeşitli kristal şekillerine sahiptirler (Sünnetci, 2015). Bu sebeplerden ötürü, kil mineralleri birçok farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmalar genellikle aşağıdaki gibi yapılmaktadır (Malayoğlu ve Akar, 1995):

- Mineralojik özelliklere dayalı sınıflandırma; Kaolin, Smektit (Montmorillonit), Mika, İllit ve Attapulgit gruplarından oluşmaktadır.
- Yapılarına göre sınıflandırma; Amorf ve Kristal grup şeklindedir.
- Kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırma şu grupları içerir; yüksek alüminyum içerikli, boksit içerikli, silikat içerikli, demir içerikli, kalsit içerikli ve karbonat içerikli.
- Fiziksel özelliklere göre sınıflandırma şu kriterlere dayanır: Plastik özellik, tane boyutu, refrakter özellik ve renk özelliği.
- Üretildikleri yatak veya bölgeye göre,
- Kullanım alanlarına göre.

Killi yapılar, tane boyutu 0.02 mm'den küçük ince taneli sedimanter oluşumlardır. Genellikle magmatik ve metamorfik kayaçların bozunma ürünleri olarak bulunabilirler, ancak genelde sedimanter kayaçların %40'tan fazlasını oluşturmaktadırlar (Karakaya, 2006).

Son dönemlerde, nano boyutta kil mineralleri asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılan yeni nesil malzemelerdir.

Kil nanoparçacıkları; yüksek mekanik dayanıklılığıyla birlikte, ayrıca morötesi ışığı engelleyerek kullanıldıkları ürünlere yanmazlık, aşınmazlık gibi üstün özellikler kazandırmaktadırlar. Nanopartiküller, genellikle en az bir boyutta 100 nm'den daha küçük olarak ölçülen ve nanometre (nm) ölçü birimi kullanılan parçacıklardır. Nanokil, organik monomerler ve polimerlerle uyumlu hale getirilen modifiye edilmiş bir kil türüdür. Bu nanokompozitler, bir veya daha fazla polimerin ögütülmesiyle birlikte 1 nm kalınlığa ve büyük yüzey alanı oranına sahip tabakalı silikatlarla oluşmaktadır. Kil tabakalarının ayrışmasıyla aktif yüzey alanları oldukça geniş malzemeler ortaya çıkmakta ve bu sayede birleşeceği malzeme ile daha sağlam bir bağ oluşmaktadır (Van vd., 2009).

Nanoteknoloji genel olarak iki açıdan fayda sağlamaktadır. Birinci fayda mevcut ürün ve süreçleri daha maliyet etkin, dayanıklı ve etkili hale getirerek sağlarken ikinci fayda ise tamamen yeni ürünlerin ortaya çıkmasını sağlayarak gerçekleşmektedir. Asfalt karışımlarının düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirme, su hasarı direncini artırma, enerji ve maliyet tasarrufu sağlama, bakım gereksinimlerinde azalma gibi özellikler, asfalt ve asfalt karışımlar için nanoteknolojinin sunduğu faydalardan sadece birkaçıdır (Yang vd., 2013).

Modifiye bitümle ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Farias vd. (2016) çalışmasında %4 oranında nanokil, %4 stiren bütadien stiren (SBS) ve %4 nanokil/SBS ile bitümü modifiye etmiş ve elde ettiği tüm modifiye bitümlerde sertlik ve elastikiyette iyileşme olduğunu tespit etmiştir.

Babagoli vd. (2017) çalışmasında bitüm ağırlığına göre çeşitli oranlarda nanokil (%2, %3, %4 ve %5) ve SBS (%0 ve %5) içeren farklı numuneler hazırlamış ve bitümün reolojik ve kimyasal davranışı (dönel viskozitesi, dinamik kesme reometresi), karışımların neme karşı hassasiyetleri değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, nanokil ve SBS polimeri kullanmak baz bağlayıcının reolojik davranışını geliştirdiği görülmüştür.

Ziari vd. (2019) %2, %4 ve %6 nanokil ve %25, %50, %75 geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) içeren karışımlara dinamik sünme testi yapmış ve karışıma gençleştirici katkı eklenmesine bağlı olarak akma değerinde meydana gelen azalmanın, nanokil modifiye edilmiş saf bitüm kullanılarak telafi edilebileceğini göstermiştir.



Jahromi vd. (2019) saf bitüm ve nanokil modifiyeli bitümün tekerlek izine karşı direncini belirlemek için yaptığı çalışmada, %3 ile %7 arasında %1 aralıklarla hazırlanan nanokil modifiyeli bitümlerin akma sıcaklığının arttığı ve tekerlek izi direncini artırdığı tespit edilmiştir.

Sedaghat vd. (2020) çalışmasında sıcak asfalt karışım katkı malzemesi olarak sasobiti %0, %2.5, %3.5, %4 ve nanokili %0, %2.5, %3.5, %5 oranlarında kullanılmış ve dönel viskozite (RV), dinamik kayma reometresi (DSR), eğilme kirişi reometresi (BBR) ile saf ve modifiye edilmiş bitümlerin özelliklerini karakterize etmek için doğrudan çekme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, nanokilin reolojik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir.

Ayyıldız vd. (2021) çalışmasında, farklı SBS oranlarında (%1, %2, %3, %4 ve %5) sabit %2 ve %3 nanokil ilavesinin su hasarı, tekerlek izi ve çatlama direnci üzerindeki etkilerini incelemiş ve test sonuçlarına göre, %2 nanokil-%3 SBS oranının daha yüksek su hasarı ve deformasyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

Omar vd. (2021) modifikasyon öncesi ve sonrası yaşlanmanın bitüm üzerindeki etkisini araştırmıştır. Katkı olarak nanokilin kullanıldığı bitüm modifikasyonunda bağlayıcının yaşlanma direncinin iyileştiği görülmüştür.

Josphineleela vd. (2023) taş mastik asfalt tipi bitümlü karışımın nanokil ile modifiye edilmesinin etkilerini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, modifiye taş mastik asfalt karışımının yorulmaya karşı daha yüksek direnç, dolaylı çekme mukavemetinde artış, kalıcı deformasyona karşı daha az hassasiyet ve daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

Patra vd. (2023) bitüm modifikasyonunu %3 ile %6 arasında nanokil ile yapmış ve optimum dozajı %4.5 olarak bulmuştur. Performans parametrelerine bakıldığında ise, tekerlek izi ve yorulma çatlağına karşı direncinde önemli bir gelişme olduğu belirtilmiştir.

Yılmaz vd. (2023), bitümü %2, %4, %6 ve %8 oranlarında nanokil ilavesiyle modifiye ederek nanokil ilavesinin bitümün yüksek sıcaklığa duyarlılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bulgular, nanokil modifikasyonunun sıcaklık hassasiyetini, yüksek sıcaklık performansını ve bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncini artırdığını göstermiştir.

Usman vd. (2023) polietilen tereftalat (PET) + nanokil karışımı ile modifiye edilmiş bitümün özelliklerini araştırdıkları çalışmada, PET (%0.5-%4, %0.5 aralıklarla) ve nanokil (%1-%8, %1 aralıklarla) ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bitümün penetrasyonunun modifiye edici içeriğin artmasıyla azaldığı ve bitümün özgül ağırlığı ve viskozitesinde artış olduğu gözlenmiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda artan dingil yükleri ve çevre koşullarının etkisiyle karayolu üst-yapısında bozulmalar meydana gelmekte bu da yolun performansını ve hizmet ömrünü etkilemektedir. Üstyapının performansını artırmak ve bozulmaların önüne geçmek için bitümlü sıcak karışımlar çeşitli katkı malzemeleriyle modifiye edilmektedir. Bununla beraber bitümün modifiye edilmesi de son yıllarda artış göstermiş ve sayısız çalışmada yer almıştır.

Bitüm modifikasyon işleminde amaç bitümün yaşlanmasını geciktirmek ve böylece karışımın uzun ömürlü olmasını sağlamaktır. Modifiye bitüme geleneksel bağlayıcı deneylerinin yanında superpave bağlayıcı deneyleri de uygulanmaktadır. Superpave bağlayıcı deney programında yer alan yaşlandırma adımıyla hem şu an hem de uzun yıllar sonraki bitümde görülebilecek durumlar laboratuvar ortamında test edilmektedir.

Modifiye bitümün karışım içerisindeki durumunu test etmek amacıyla Marshall stabilite, nem hasarı, donma-çözülme, sünme-rijitlik gibi çeşitli deneyler yapılmaktadır. Her birinde amaç öngörülen ortam koşullarını BSK numunesine uygulamaya çalışarak dayanımını belirleyebilmektir.

Polimerler, elyaflar ve son zamanlarda ise nanopartiküller ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı ile kaplamada oluşabilecek sorunları çözmeye yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Nanoteknoloji alanındaki bilgi birikimi ile asfalt endüstrisi gibi farklı endüstrilerde nanopartikül olarak uygulama kabiliyeti ve çekiciliği son yıllarda büyük ilgi görmüştür.

Yeni malzemelerin bulunması, atık malzemelerin kullanımı ve yeni tekniklerin geliştirilmesi devam ettikçe bitüm ve bitümlü sıcak karışım modifikasyonu üzerine çalışmalar da devamlılığını sürdürecektir.

## KAYNAKÇA

- Arslan, M., Durmuş, G., Subaşı, S., Can, Ö., & Yıldız, K. (2010). Beton Yol Kaplamalarında Vakum Uygulaması Üzerine Bir Çalışma. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 3(3), 215-223.
- Ayyıldız, D., Aksoy, A., & Iskender, E. (2021). Investigation of optimum composition ratio for SBS/nanoclay/bitumen nanocomposites in stone mastic asphalt mixtures. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4).
- Babagoli, R., Mohammadi, R., & Ameri, M. (2017). The rheological behavior of bitumen and moisture susceptibility modified with SBS and nanoclay. *Petroleum Science and Technology*, 35(11), 1085-1090.
- Batman, A. (2015). Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 8-9.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(7), 589-594.
- Farias, L. G. A., Leitinho, J. L., Amoni, B. D. C., Bastos, J. B., Soares, J. B., Soares, S. D. A., & de Sant'Ana, H. B. (2016). Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. *Construction and building materials*, 125, 873-883.
- Ghaffarpour Jahromi, S. (2019). Introduction of a simple method for prediction of the rutting resistance factor of nanoclay-modified bitumen. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(2), 216-221.
- Ghile, D. B. (2006). Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures. Yüksek Lisans Tezi, Delft University of Technology, Delft
- Golestani, B., Nejad, F. M., & Galooyak, S. S. (2012). Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. *Construction and building materials*, 35, 197-203.
- Günay, T. (2016). Nano Malzemelerin Bitümlü Bağlayıcılarda Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Ege Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hunter, R. N. (Ed.). (1994). *Bituminous mixtures in road construction*. Thomas Telford.
- Jasso, M., Bakos, D., MacLeod, D., & Zanzotto, L. (2013). Preparation and properties of conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite clay. *Construction and Building Materials*, 38, 759-765.

- Josphineleela, R., Diwakar, G., Senthilnathan, T., Singh, H. S., Kumar, K. S., & Anusuya, M. (2023). Experimental study on the effects of modification with nanoclay on the properties of an SMA mixture. *Materials Today: Proceedings*.
- Karakaya, M.Ç. (2006). Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri. Bizim Büro Basımevi, Ankara, 541-595.
- Malayoğlu, U. ve Akar, A. (1995), Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranılan Kriterlerin İrdelenmesi. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- Malkoç, G. (2002). Yol üst yapılarında kullanılan modifiye asfaltlar ve modifiye bitüm şartnamesi. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara*.
- Omar, H. A., Katman, H. Y., Bilema, M., Ahmed, M. K. A., Milad, A., & Md Yusoff, N. I. (2021). The Effect of Ageing on Chemical and Strength Characteristics of Nanoclay-Modified Bitumen and Asphalt Mixture. *Applied Sciences*, 11(15), 6709.
- Orhan, F. (2012). Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları. *Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara*.
- Önalp, A. (2007). Geoteknik Bilgisi I Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekaniği (3. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti., 32.
- Öztürk, Y. E. (2012). Kil Mineralleri Açısından İnce Daneli Zeminlerin Fiziko-Kimyasal Özellikleri ile Kıvam Limitleri Arasındaki İlişkiler. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 4, 6.
- Patra, S. K., Panda, M., Das, A. K., & Bhuyan, P. K. (2023). Performance evaluation of surface-treated montmorillonite nanoclay-modified bitumen binder at high-and intermediate-temperature conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 24(5), 1330-1352.
- Sedaghat, B., Taherian, R., Hosseini, S. A., & Mousavi, S. M. (2020). Rheological properties of bitumen containing nanoclay and organic warm-mix asphalt additives. *Construction and Building Materials*, 243, 118092.
- Sünneci, M. O. (2015). Cevizdere (Ünye, Ordu) Yöresi Killerinin Konsolidasyon Parametrelerinin ve Şişme Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5-7.
- Torun S. (2015). Bitümlü Sıcak Karışımlarda Katkı Maddesi Olarak Pr Plast S Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas, İstanbul.

- Uncu D. (2017). Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nanomalzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Usman, M. I., Murana, A. A., Kaura, J. M., Ochepe, J., & Otuoze, S. H. (2023). Properties of Bitumen Modified with Nanoclay/Pet (Polyethylene Terephthalate) Blend. *Saudi J Civ Eng*, 7(8), 192-203.
- Van de Ven, M. F. C., Molenaar, A. A. A., & Besamusca, J. (2009). Nanoclay for binder modification of asphalt mixtures. In *Advanced testing and characterization of bituminous materials, two volume set* (pp. 149-158). CRC Press.
- Yang, J., & Tighe, S. (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 96, 1269-1276.
- Yao, H., You, Z., Li, L., Goh, S. W., Lee, C. H., Yap, Y. K., & Shi, X. (2013). Rheological properties and chemical analysis of nanoclay and carbon microfiber modified asphalt with Fourier transform infrared spectroscopy. *Construction and Building Materials*, 38, 327-337.
- Yiğit, N. (2021). Polipropilen Lif Boyutlarının Asfalt Aşınma Tabakası Taşıma Kapasitesine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, B., Özdemir, A. M., & Gürbüz, H. E. (2023). Assessment of thermal properties of nanoclay-modified bitumen. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4), 4595-4607.
- Ziari, H., Moniri, A., & Norouzi, N. (2019). The effect of nanoclay as bitumen modifier on rutting performance of asphalt mixtures containing high content of rejuvenated reclaimed asphalt pavement. *Petroleum Science and Technology*, 37(17), 1946-1951.