

## EDİTÖRLER

*Doç. Dr. Göksel ULAY*

*Doç. Dr. Hatice PEKMEZ*

*Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ*

**MÜHENDİSLİK**

*Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler*

**MART**  
**2025**

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

**Birinci Basım • Mart 2025 / ANKARA**

**ISBN • 978-625-388-279-2**

© copyright

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

**Gece Kitaplığı**

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

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

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

# **Mühendislik Alanında Araştırmalar ve Değerlendirmeler**

**Mart 2025**

**Editörler:**

**Doç. Dr. Göksel ULAY  
Doç. Dr. Hatice PEKMEZ  
Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ**



# İÇİNDEKİLER

## BÖLÜM 1

### İKİ PARÇALI PLASTİK KLEMENS GÖVDELERİNİN ULTRASONİK PLASTİK KAYNAK YÖNTEMİ KULLANILARAK BİRLEŞTİRİLMESİ,

*Orhan Kara, Aydın ŞIK*..... 1

## BÖLÜM 2

### YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA PERSPEKTİFLERİ

*Ahmet ELBİR, Mehmet Erhan ŞAHİN*..... 19

## BÖLÜM 3

### TARIMSAL İNSANSIZ KARA ARACINDA ELEKTRO-HİDROLİK PULLUK İNCELENMESİ

*Şeymanur USTA, Beytullah BOZALİ* ..... 37

## BÖLÜM 4

### NAR ÇEKİRDEĞİ YAĞININ ÜRETİMİ, BİLEŞİMİ VE SAĞLIK AÇISINDAN ÖNEMİ

*Dilara ASLAN BAKKALBAŞI, İsa CAVİDOĞLU* ..... 63

## BÖLÜM 5

### STOKASTİK ERGONOMİK MONTAJ HATTI DENGEME VE HİYERARŞİK İŞÇİ ATAMASI PROBLEMİ İÇİN BİR MATSEZGİSEL ÖNERİSİ

*Aslıhan KARAŞ ÇELİK, Feriştah ÖZÇELİK* ..... 79

## BÖLÜM 6

### EKSTRAKSİYON İLE AYIRMA İŞLEMİNE CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ VE BOX BEHNKEN MODELİNİN UYGULANABİLİRLİĞİ

*Mehtap ERŞAN, Hilal NALBANTOĞLU,  
Yunus ALTINOK*..... 101

BÖLÜM 7

MİRAS NİTELİĞİNDEKİ JEOLojİK OLUŞUMLARIN,  
KORUNMASI, YAŞATILMASI VE BULUNDUĞU BÖLGE İÇİN  
ÖNEMİ: DEREİÇİ TRAVERTENLERİ (BAŞKALE, VAN)

*Çetin YEŞİLOVA, Güngör YEŞİLOVA,*

*Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ ..... 123*

BÖLÜM 8

AKTİF KARBONUN MÜHENDİSLİKTE KULLANIMI

*Mehtap ERŞAN, Aslı Eda ERDOĞAN ..... 143*

# BÖLÜM 1

## İKİ PARÇALI PLASTİK KLEMENS GÖVDELERİNİN ULTRASONİK PLASTİK KAYNAK YÖNTEMİ KULLANILARAK BİRLEŞTİRİLMESİ

*Orhan KARA<sup>1</sup>*

*Aydın ŞİK<sup>2</sup>*

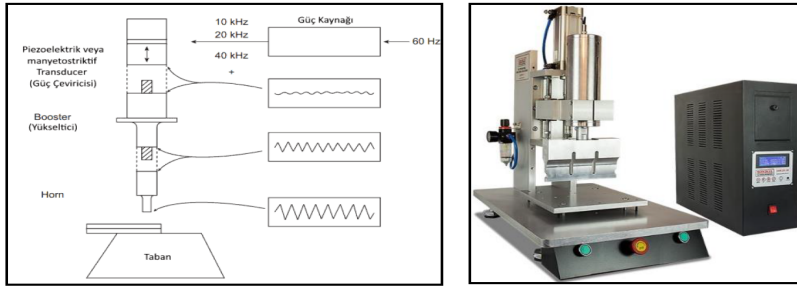
1 Orhan KARA ONKA Elektrik Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. Tasarım Merkezi Müdürü, Kocaeli/Türkiye, ORCID: 0000-0002-0544-5821 orhan.kara@onka.com.tr

2 Prof. Dr. Aydın ŞİK Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Endüstriyel Tasarım Bölümü Ankara/Türkiye ORCID: 0000-0002-8977-9094 aydins@gazi.edu.tr

## 1. GİRİŞ

En yaygın kullanılan kaynak yöntemi olan ultrasonik kaynak, insan işitme aralığının ötesinde olan yüksek frekanslarda (20-40 kHz) ultrasonik enerji kullanarak düşük genlikli (1-25  $\mu\text{m}$ ) mekanik titreşimler üretir. Titreşimler, kaynak yapılan parçaların birleşim arayüzünde ısı üretir ve termoplastik malzemelerin erimesine ve soğuduktan sonra kaynak oluşumuna neden olur. Ultrasonik kaynak, bir saniyeden daha kısa kaynak süreleriyle bilinen en hızlı kaynak tekniğidir. Ultrasonik dalgalar ilk olarak II. Dünya Savaşı'ndan sonra ekipmanlarda kusur tespiti, temizleme ve yağdan arındırma için kullanılmıştır. Sert termoplastiklerin ultrasonik kaynağı 1963 yılında geliştirildi. Ultrasonik kaynak hem yumuşak hem de sert termoplastikler ve termoplastik kompozitler için kullanılır [1].

Hızlanan küresel enerji kriziyle birlikte, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımının teşviki birçok endüstri için önemli bir öncelik haline gelmiştir [2]. Ultrasonik kaynak (UW), yüksek frekanslı titreşim ve normal basınç uygulanarak kaynak arayüzüne benzer veya farklı malzemeleri birleştirmek için kullanılabilen bir “katı hal” kaynak işlemidir [2, 3]. Ultrasonik kaynak işlemi, sürtünme ve titreşim enerjisinin ısıya dönüştürülmesine dayanır. «Sonotrode» adı verilen bir kaynak aleti kullanılarak, yüksek frekanslı ultrasonik akustik titreşimler bileşenlere aktarılır (Şekil 1) [3-5]. Bu titreşimler, alternatif akım gönderen ultrasonik sistem tarafından üretilir. Ultrasonik enerji, iki parça arasındaki temas noktasını eriterek bir birleşim oluşturur.



Şekil 1: Standart ultrasonik kaynak işleminde kullanılan ekipmanlar (Sonikel, 2024)

Şekil 1. Standart ultrasonik kaynak işleminde kullanılan ekipmanlar [3]

Ultrasonik plastik montajı, yüksek frekanslı mekanik hareketten üretilen ısının kullanımıyla termoplastiklerin birleştirilmesi veya yeniden biçimlendirilmesidir. Elektrik enerjisinin, birleştirme bölgesinde sürtünme ısısı oluşturan yüksek frekanslı mekanik harekete (titreşimler) dönüştürülmesiyle gerçekleştirilir. Titreşimler, bir parçaya basınç/kuvvet altında

uygulandığında, arayüzde sürtünme ısısı oluşturur ve birleştirme bölgesindeki plastiğin erimesine neden olarak plastik bileşenler arasında moleküler bir bağ oluşturur.

*Çoğu kişi, bir metal nesneye çekiçle tekrar tekrar vurulduğunda ne olduğunu bilir. Darbe yeterince sertse ve yeterince sık gerçekleşirse, metal nesne ısınmaya başlar. Bu vurma hareketi devam ederse, metal şaşırtıcı derecede ısınabilir. Metal nesne, molekülleri sıcaklıkta artışa neden olan bir oranda hareket ettiği veya titreştiği için ısınır. Temel fizik yasalarına göre, ısının gerçek tanımı, “moleküllerin rastgele hareketleri veya titreşimleriyle ilişkili enerjidir”. Teorik olarak, yalnızca mutlak sıfırda  $-273^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanan ve muhtemelen elde edilmesi imkânsız olan moleküllerin hareketi durur. Bu nedenle pratikte herhangi bir maddenin molekülleri sürekli titreşir. Bir maddedeki moleküler titreşim miktarı, sıcaklığını belirler. Molekülleri ne kadar çok titreşirse, madde o kadar “sıcak” olur [6-8]. Yukarıdaki örnekte, çekicinin darbesi metaldeki moleküler titreşimin artmasına neden olur ve sıcaklıktaki artışı açıklar. Yüksek frekanslı ses titreşimlerini termoplastiğin belirli bir alanına odaklayarak, malzemenin molekülleri “sarsılır” ve malzeme eriyene ve bitişik parçaya bağlanana (kaynak) veya aletin şeklini alana (yeniden şekillendirme) kadar sıcaklık artar.*



Şekil 2. Ultrasonik kaynak uygulamaları [9]

Ultrasonik kaynak, yapıştırıcı veya vida gibi herhangi bir yardımcıya ihtiyaç duyulmadan saniyelerin küçük bir kısmında gerçekleşir. Şekil 2’de ultrasonik kaynak yöntemi ile yapılan örnekler görülmektedir.

Ultrasonik kaynağın bazı uygulama alanları;

- Enjeksiyon kalıplı parçaların birleştirilmesi (Örnek: Oyuncaklar)

- Gömme membranlar (Örnek: Tıbbi bileşenlerdeki filtre membranları)
- Deri, dokusuz kumaşlar ve tekstillerin birleştirilmesi (Örnek: Arabalardaki hava filtreleri)
- Farklı tipteki malzemelerin bir araya getirilmesi (Örnek: Hava yastıkları)
- Şekillendirme tekniği kullanılarak form uyumlu bağlantılar oluşturma (Örnek: Şarj cihazlarındaki mıknatıs temasları)
- Havşalı soketler ve mıknatıslar (Örnek: Sensörleri etkinleştirmek için kapsüllenmiş mıknatıslar)

### **Malzeme Seçimi Hususları**

Doğru malzemeyi seçmek ultrasonik kaynak yapmanın önemli bir parçasıdır. Ancak, ürün için uygun bir malzeme seçerken bazı zorluklar bulunmaktadır.

**Şekiller:** Parçanın bindirme birleştirmelerine izin veren bir şekle sahip olması gerekir çünkü teknik yalnızca bindirme birleştirmeleriyle uyumludur.

*Nem içeren:* Malzemeler nem içermemelidir. Bu kaynaklı parçaların kalitesini engelleyebilir. Bu nedenle, akrilik gibi nemi emebilen malzemelere dikkat edilmelidir.

*Sertlik:* Doğru malzeme yumuşak olmalıdır, örneğin ABS. Kaynak tekniği, sertlikleri nedeniyle polipropilen ve polikarbonat gibi malzemeler için uygun olmayabilir.

*Kalınlık:* Kalın malzemeler titreşim ve moleküler bağı kırmak için daha fazla enerji gerektirir ve makine bunu üretemeyebilir. Bu durumda, işlem yalnızca ince parçalar (0,38-3 mm) için uygundur.

*Benzer malzemeler:* Ultrasonik kaynak işlemi, kimyasal olarak uyumlu olacakları için iki benzer termoplastik parçayı kaynak yapmak için uygundur. Erime sırasında, birlikte moleküler bir bağ oluşturabilirler.

*Benzer olmayan malzemeler:* Kaynak işlemi farklı malzemelerin kaynak yapılması için de uygundur. Ancak, 40 °F içinde erimeleri ve benzer moleküler yapıya sahip olmaları gerekir. Örneğin, ABS ve akrilik iyi bir kombinasyondur. Polietilen ve polipropilen ise kimyasal olarak uyumlu değildir.

Malzemelerin benzerliğinin yanı sıra, doğru malzemeyi seçmek yağlayıcıların, dolgu maddelerinin, pigmentlerin, vb. varlığına bağlıdır. Bu nedenle, malzeme seçimi çok önemlidir.

### **Ultrasonik Kaynağın Avantajları:**

Ultrasonik kaynak işlemi, işlevleri etkilemeden estetiği iyileştiren dolaylı ısıtma teknikleri nedeniyle diğer sac metal kaynak ve kaynak dışı işlemlere göre avantajlara sahiptir. Bunun dışında, işlemin diğer avantajları şunlardır:

*Hız:* Uyumlu parçalarla, yüksek frekanslı ultrasonik titreşim parçaları hızlı bir şekilde kaynaklayabilir. Sonuç olarak, ultrasonik kaynak teknolojisi hızlı bir üretim süreci, yüksek verim ve kısa teslim süreleri oluşturur.

*Yüksek güvenlik seviyesi:* Isının dolaylı uygulanması nedeniyle, işletme tehlikelerinde azalma olur. Ayrıca, işleme oluşan ısı lokalize olur ve hızla dağılır. Bu nedenle, kaynak yapılacak malzemelerin kaynak bağlantılarına ve çevresine zarar gelmez.

*Güvenilirlik:* Kaynak işleminde kullanılan makineler, minimum arıza ve hata yaşadıkları için güvenilirdir. Ayrıca otomasyonla, operasyonel ve insan hatasında azalma, işletme maliyetinde azalma ve kaynaklı birleştirme kalitesinde iyileşme meydana getirir.

*Farklı malzemeler için uygundur:* Farklı malzemelerin kaynaklanması için uygun bir işlemdir. Plastik kaynakta ihtiyaç duyulan önemli bir özelliktir. Buna karşılık, diğer plastik kaynak işlemleri farklı plastik malzemeler için uygun değildir. Çünkü moleküler bağ oluşumu yoktur.

*Minimum malzeme maliyetleri:* Bu işlem, bağlayıcı cıvatalar, lehimler ve diğer yapıştırıcı malzemeler kullanan diğer birleştirme işlemlerinden (kaynak ve perçinleme arasındaki fark) farklı olarak sarf malzemeleri gerektirmez. Bu nedenle maliyeti uygundur.

*Ortak Kalite:* Kaynaklı birleştirmede plastik parlama, deformasyon veya hata gibi kusurlar yoktur. Sonuç olarak, kaynaklı birleştirme yüksek kaliteli, temiz ve görünmez bir dikişe sahiptir.

### **Ultrasonik Kaynağın Dezavantajları:**

Sürecin ayrıca dikkate alınması gereken dezavantajları da bulunmaktadır. Aşağıda birkaçı yer almaktadır:

*Sert ve nem içeren plastikler için uygun değildir:* Kaynak tekniğinin malzeme uyumluluğu açısından bir sınırlaması vardır. Örneğin, yüksek

nem içerikli termoplastikler, sert ve güçlü plastik polimerler, polipropilen için uygun değildir.

*Parça boyutu:* Bu teknik, 150 mm'den daha büyük bir birleştirme işlemine sahip parçaları kaynak yapmak için uygun değildir. Bunun nedeni, dönüştürücünün 100-150 mm aralığında olmasıdır. Ayrıca, bu tür malzemeleri eritmek için gereken enerji nedeniyle kalın malzemeler için uygun değildir.

*Yüksek ilk yatırım:* Ultrasonik kaynak makinelerinin maliyeti yüksektir. Sonuç olarak, tekniği kullanmak isteyen işletmeler yüksek ilk yatırıma hazırlıklı olmalıdır. Ayrıca otomasyonla maliyet artmaktadır.

*Birleştirme şekillerini sınırlar:* Bu işlem yalnızca bindirme birleştirmeli parçaların kaynak yapılması için geçerlidir. Yani parçaların düz bir yüzeyde üst üste bindirilmesiyle yapılan birleştirmelerdir. Bu durumda, köşe, alın, T ve kenar gibi birleştirmeler için doğru kaynak tekniği değildir [10].

### 1.1. Ultrasonik Kaynak ekipmanı

Tipik bir ultrasonik kaynak makinesi bir güç kaynağı, bir dönüştürücü, bir güçlendirici ve bir horn'dan oluşur. Güç kaynağı, 50 Hz veya 60 Hz'lik normal elektrik besleme frekansını 20 kHz'e dönüştürür. Dönüştürücü veya piezoelektrik dönüştürücü, yüksek frekanslı elektrik enerjisini mekanik harekete dönüştürür. Hareket, hareketin genliğini artıran güçlendirici aracılığıyla horn'a iletilir. Horn, titreşim enerjisini birleştirilen parçalara aktarır.

### 1.2. Temel Teori

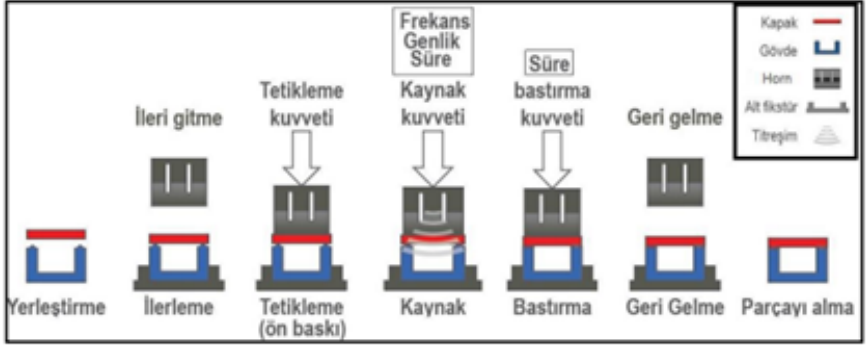
Ultrasonik kaynak yöntemin temel teorisine göre, belirli bir kaynak bağlantısının gücü toplam enerji miktarına bağlıdır.

$$\text{Enerji (e)} = \text{Güç (p)} \times \text{Zaman (t)}$$

$$\text{Güç (p)} = \text{Kuvvet (f)} \times \text{Hız (v)}$$

Kuvvet uygulanan basınçtan, hız ise titreşimin frekansı ve genliğinden türetilir. Bağlantıda oluşan ısı, genliğin karesiyle orantılıdır. Bu nedenle, genlikteki herhangi bir değişiklik, diğer herhangi bir parametrenin değişmesinden daha büyük bir etkiye sahiptir. Genlik, dönüştürücünün genliğinin güçlendirici ve hornun kazanç faktörünün çarpılmasıyla hesaplanır [11].

Ultrasonik kaynak, ultrasonik montajın en yaygın uygulamasıdır. Kaynakta, horn iş parçalarından biriyle temas ettirilir, basınç uygulanır ve titreşimli ultrasonik enerji, iki parça arasındaki birleşim bölgesinde sürtünme ısı oluşturarak malzeme boyunca ilerler. Plastik malzeme erir ve iki parça yüzeyi arasında akar. Titreşimler durduğunda, plastik katılaştır ve iki iş parçası birbirine bağlanır. Şekil 3'te ultrasonik kaynak işlemini daha ayrıntılı olarak gösterilmiştir [5-8].



Şekil 3 Ultrasonik kaynak işlemi [12]

- Birleştirilecek iki termoplastik parça, bir fişör adı verilen destekleyici bir yüzey üzerine, üst üste gelecek şekilde yerleştirilir.
- Horn adı verilen titanyum veya kaplamalı alüminyum bir bileşen üst plastik parçayla temas ettirilir.
- Horna kontrollü bir basınç uygulanır ve iki plastik parça fişöre karşı birlikte sıkıştırılır.
- Horn, kaynak süresi adı verilen önceden belirlenmiş bir süre boyunca, saniyede 15.000 (15 kHz) veya 30.000 (30 kHz) kez, bir inçin binde biri (mikron) cinsinden ölçülen mesafelerde dikey olarak titreştirilir. Dikkatli parça tasarımıyla, bu titreşimli mekanik enerji iki parça arasındaki sınırlı temas noktalarına yönlendirilir. Mekanik titreşimler, sürtünme ısı oluşturmak için termoplastik malzemeler aracılığıyla eklem arayüzüne iletilir. Eklem arayüzündeki sıcaklık erime noktasına ulaştığında, plastik erir, akar ve titreşim durdurulur. Bu erimiş plastiğin soğumaya başlamasını sağlar.
- Sıkıştırma kuvveti, erimiş plastik soğuyup katılaştırken parçaların kaynaşmasına izin vermek için önceden belirlenmiş bir süre boyunca korunur. Bu tutma süresi olarak bilinir. (Not: Tutma süresi

boyunca daha yüksek bir kuvvet uygulanarak daha iyi birleşim mukavemeti ve sızdırmazlık sağlanabilir.

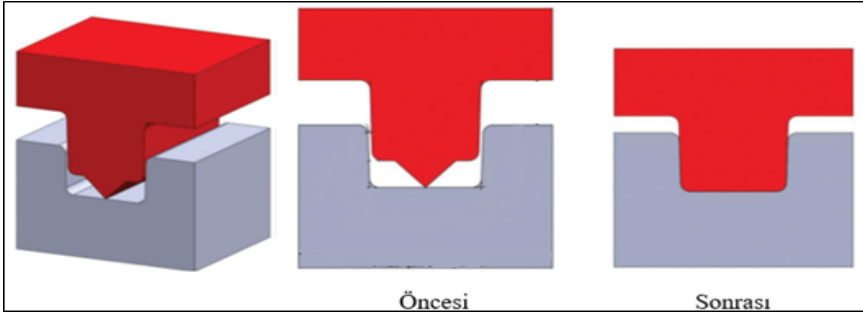
- Erimiş plastik katılaştığında, sıkıştırma kuvveti kaldırılır ve horn geri çekilir. İki plastik parça artık birlikte kalıplanmış gibi birleştirilir ve fiktürden tek bir parça olarak çıkarılır [12-16].

## 2. MATERYAL VE METOT

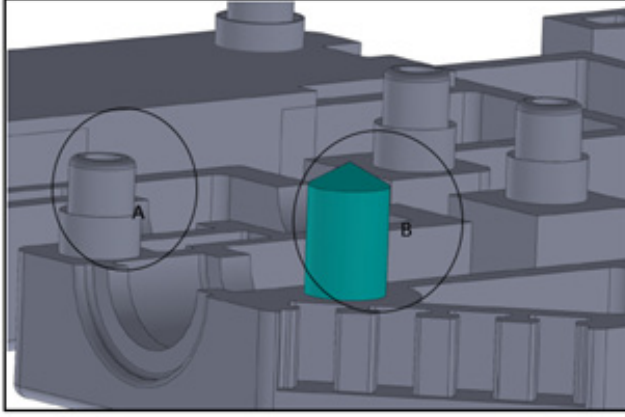
Çalışmada, gövde ve kapak parçalarının ayrılmadan dayanması gereken çekme kuvvetinin tespit edilmesi için TS EN 60947-7-1 standardı incelenmiş ve ürünlerin çekme dayanımını test edebilecek aparatlar tasarlanmasına karar verilmiştir.

Gövde ve kapak parçalarının birleşmesinin, birçok üründe bulunduğu üzere perçin pimleri üzerinden girintili-çıkıntılı birleştirme tasarımı kullanılarak (Şekil 4) sağlanmasına karar verilmesinin ardından, Solidworks (Profesyonel 2019 SP4.0) programı kullanılarak ürün ön tasarımı yapılmıştır (Şekil 5 ve Şekil 6).

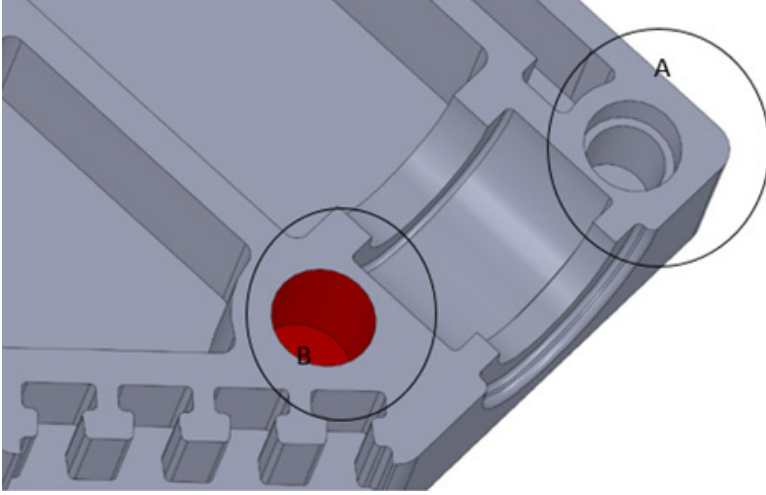
Ürün tasarımı sonrası temel gereksinimlerin karşılandığından emin olmak ve tasarımı onaylamak için 3D yazıcı ile ilk prototip (Şekil 7) üretimi gerçekleştirilmiş ve tasarımın yeterli olduğuna karar verilmiştir. Tasarlanan ürün parçalarının prototip üretiminde hammadde olarak, basım kolaylığı, elastisite ve yanmazlık özelliklerini karşılayan naylon (PA 6.6) kullanılmıştır.



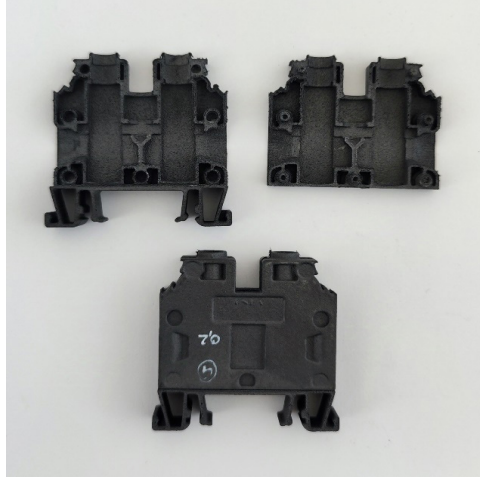
Şekil 4. Girintili-çıkıntılı birleştirme tasarımı



Şekil 5. Mevcut ürünlerde kullanılan perçin pimi tasarımı (A) ve girintili-çıkıntılı birleştirme yöntemi için kullanılması planlanan çıkıntı tasarımı (B)



Şekil 6. Mevcut ürünlerde kullanılan perçin yuvası tasarımı (A) ve girintili-çıkıntılı birleştirme yöntemi için kullanılması planlanan girinti tasarımı (B)

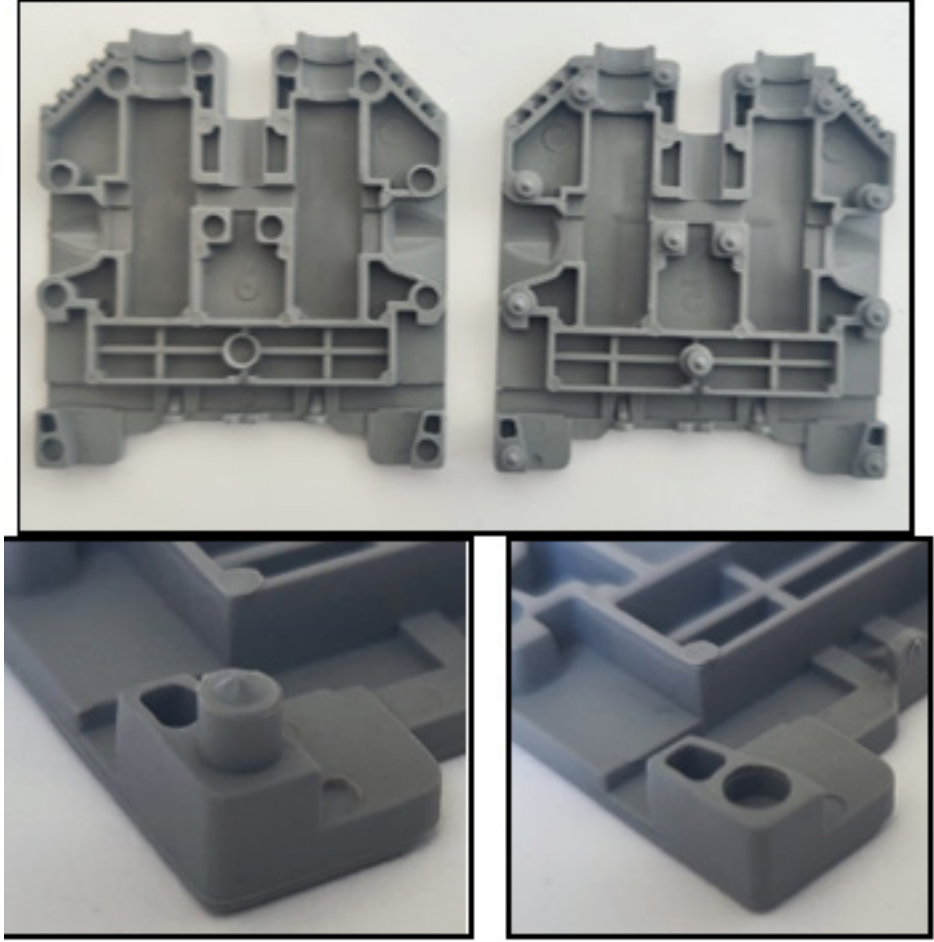


Şekil 7. Planlanan ürün tasarımına göre yapılan ön prototip örneği (3D Baskı)

## 2.1. Prototip Üretim Süreci

**Çalışmada**, ürün tasarımının onaylanmasının ardından ürüne yönelik plastik enjeksiyon kalıbı Solidworks (Profesyonel 2019 SP4.0) programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan parçalara uygun malzemeler tedarik edilmiş ve işlenmiştir. Kalıp, işlenen parçaların birleştirilmesi ile deneme üretimine hazır hale getirilmiştir.

Prototip çalışmaları kapsamında ilk numuneler (Şekil 8), teknik resimlerde belirtilen ölçülere göre ilk deneme **üretimi** yapılmıştır. Daha sonra çeşitli test ve denemelerde kullanılmak üzere 100 adetlik numune baskısı yapılarak prototip üretim süreci tamamlanmıştır.



*Şekil 8. Üretimi tamamlanan prototip numuneler ve girintili-çıkıntılı kaynak tasarımı görüntüsü*

## **2.2. Kaynak Makinesi Temin Süreci**

Daha önce çeşitli fuar katılımları ve araştırmalar neticesinde uygun olduğu tespit edilen, Türkiye, Almanya ve Çin’de bulunan 3 farklı ultrasonik kaynak makinesi sağlayıcı/üretici firmalara kaynak denemeleri için numuneler gönderilmiştir. Firmalarda basınç, kaynak süresi, baskı süresi ve frekans parametreleri ile çeşitli denemeler yapılmış ve numuneler incelenmiştir.

### 2.3. Proje Çıktısı Olarak Elde Edilen Teknik Veriler/Test Sonuçları

Kaynak numunelerine yapılan görsel incelemeler sonucunda;

- Türkiye ve Almanya firmalarından gelen numunelerde bazı pimlerin kaynarak yuvaya tutunduğu, bazı pimlerin ise kaynak tutmayarak yapışmadığı veya çok az miktarda kaynak tuttuğu görülmüştür. Kaynak tutmayan pimlerin farklı numunelerde farklı bölgelerde olduğu; olumsuzluğun belirli bir pimden kaynaklanmadığı tespit edilmiştir. Bazı numunelerin kolaylıkla birbirinden ayrıldığı görülürken bazı numunelerin daha zor ayrıldığı görülmüştür.
- Çin firmasından gelen numunelerde ise pimlerin çok az kaynak tuttuğu aynı zamanda gövde ve kapak arasında boşluk kaldığı görülmüştür.



Şekil 9. Çekme deneyi makinesi

Şekil 9’da çekme dayanımı testlerin gerçekleştirilebilmesi için, kesta- mid malzeme kullanılarak iki adet ürün tutucu uç yapılmıştır. Ürün uçlara tutturularak çekme test cihazına bağlanmış ve testler gerçekleştirilmiştir

Çalışmada, Tasarım Merkezindeki testler en sağlıklı neticelerin alındığı belirlenen Alman firmasından gelen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Firmadan gelen bilgilere göre ürünlerin birleştirilmesinde kullanılan teknik bilgiler aşağıdaki gibidir;

Kaynak yapılan makine: Ultrasonic MP Generator SAPHIR 2, 20 kHz

Makine parametreleri:

- Basınç: 87 PSI
- Kaynak Süresi: 0,7-1 sn
- Baskı Süresi: 1 sn
- Frekans: 20 khz

Çalışmada, çekme testleri kapsamında perçinli/vidalı ürünler ile ultrasonik kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin ayrılma mukavemetleri karşılaştırılmıştır. EN 60947-7-1 standardında, çekme testi kablonun ürüne tutunma mukavemetini ölçtüğü için uygulanamayacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle ürünün gövde ve kapağının birbirine tutunma mukavemetini ölçebilecek standart dışı bir düzenek oluşturulmuştur (Şekil 9). Yapılan testler sonucunda aşağıdaki tespitler yapılmıştır:

Perçinli/vidalı ürünler, ultrasonik kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere göre çok daha yüksek mukavemet göstermektedir (Şekil 10).

Ultrasonik kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde pimler aynı ölçüde yapışmadığı ya da az yapıştığı için zayıf nokta önce açılmakta; bu durum sağlam yapışmış kaynakların daha kolay ayrılmasına sebep olmaktadır. Bu durum çekme testi grafiğinde daha açık görülebilmekte olup her pim açılışı mukavemet kaybına neden olmaktadır (Şekil 11).



**Şekil 10.** Vidalı/perçinli tip kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan çekme testi neticesinde alınan kuvvet/süre grafikleri



**Şekil 11.** Ultrasonik kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelere uygulanan çekme testi neticesinde alınan kuvvet/süre grafikleri

Vidalı/perçinli tip ürünlerde çekme kuvveti 900 N değerine ulaştığı halde açılma görülmemiştir. Ultrasonik kaynak yöntemi ile birleştirilen ürünlerde ise çekme kuvveti 100 N değerinde iken kaynak noktaları açılmaya başlamıştır. Tam açılma 500 N değerinin az üzerinde gerçekleşmiş olsa da tekil açılmalar kabul edilemeyeceğinden ürünün çekme dayanım değeri 100 N kabul edilmiştir.

### 3. SONUÇ

Çalışmada yapılan test ve analizler sonucunda, ultrasonik kaynak yöntemi için belirlenen girintili-çıkıntılı birleştirme tasarımı ile perçinli/vidalı birleştirilmiş ürünlerden daha yüksek ayrılma mukavemetine sahip ürün yapılamayacağı anlaşılmıştır. Girintilerin her birinin aynı düzeyde yapışmayabileceği, plastik enjeksiyon sırasında yaşanabilecek eksik bas-kı, çapak gibi sorunların mevcudiyeti nedeniyle girintili-çıkıntılı tasarım ile ultrasonik kaynak yöntemin üretim prosesine katkı sağlayamayacağı tespit edilmiştir. Klemens yapısının detaylı kıvrımlardan oluşmasından dolayı kalıp üzerinde büyük çapta revizyon gerekmesi, işlemlerin zor olması, uzun süreler gerektirmesi, işlem maliyeti ve revize edilmesi gerekecek kalıp sayısının çok olmasından dolayı ultrasonik kaynak metodunda diğer birleştirme tasarımları değerlendirilmemiştir. Çalışma sonucunda ultrasonik kaynak metoduyla üretilen numuneler arasında kusurlu olanlar olsa dahi prototip geliştirilmiş olup çalışma sayesinde ilgili yöntem hakkında teknik bilgi birikimi sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR

- Ebnesajad, S., (2024). *Melt Processible Fluoroplastics*, Book, ISBN 978-1-884207-96-9 2002
- Albers, A., Holoch, J., Revfi, S., Spadinger, M., (2021). Lightweight Design in Product Development: A Conceptual Framework For Continuous Support in The Development Process, *Procedia Cirp*, 100:494-499, <https://doi.org/10.1016/J.Procir.2021.05.109>
- [HTTPS://SONİKEL.COM.TR/](https://sonikel.com.tr/) Erişim tarihi: 28.01.2025
- Benatar, M., Marcus, M., (2023). Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites, *Power Ultrasonics*, Applications of High-Intensity Ultrasound Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, (Second Edition), Chapter 11, (pp: 205-225)
- Wang, S., Lin, S., (2019). Optimization on ultrasonic plastic welding systems based on two-dimensional phononic crystal, *Ultrasonics*, 99:105954
- Thapliyal, S., (2021). Ultrasonic welding-a modern welding technology for metals and plastics, *Advanced Welding and Deforming Handbooks in Advanced Manufacturing*, Chapter-1, pp:1-22, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822049-8.00001-3>
- Daniels, H.P.C., (1965). *Ultrasonic Welding Ultrasonics*, Volume 3, Issue 4, (pp:190-196), [https://doi.org/10.1016/0041-624x\(65\)90169-1](https://doi.org/10.1016/0041-624x(65)90169-1)
- António, B., Pereira Joana, D., Batista Nélia, M., Silva Bernardo M., (2024 ). The Sealing of Copper Pipes By Ultrasonic Welding For Heat Pump Applications Conference: *4th International Conference On Electrical, Computer, Communications And Mechatronics Engineering (Iceccme)*, November 2024, <https://doi.org/10.1109/Iceccme62383.2024.10796265>
- [HTTPS://WWW.HERRMANNULTRASCHALL.COM/EN/WELDİNG-U-SİNG-ULTRASONİCS/ULTRASONİC-WELDİNG](https://www.herrmannultraschall.com/en/welding-ultrasonic-ultrasonic-welding)
- [HTTPS://WWW.RAPİDDİRECT.COM/BLOG/ULTRASONİC-WELDİNG/](https://www.rapiddirect.com/blog/ultrasonic-welding/) Erişim tarihi: 28.01.2025
- [HTTPS://WWW.SOLVAY.COM/SİTES/G/FİLES/SRPEND221/FİLES/2018-08/Ryton-PPS-ULTRASONİC-WELDİNG\\_EN-V1.0\\_0.PDF](https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2018-08/RYTON-PPS-ULTRASONİC-WELDİNG_EN-V1.0_0.PDF) Erişim tarihi: 28.01.2025
- Şık, A., Kara, O., (2024). Ultrasonik Kaynak Yöntemi. *Makine Mühendisliğinde Deneysel ve Sayısal Çalışmalar*, (pp.6-47), Ankara: BİDGE Yayınevi.
- <https://www.rapiddirect.com/blog/ultrasonic-welding/> Erişim tarihi: 28.01.2025
- Kıyılı, O., (2023). Plastic joining methods: Ultrasonic and vibration welding, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, Vol. 28, No. 2, Review <https://doi.org/10.17482/Uumfd.1278128665>
- Krause, P.C. Et Al., *Welding Science and Technology, Welding Handbook*. 8 Ed. Amerika: American Welding Society

Slami, N., Ischer, Y., Arms, A., Lauterbach, D., Böhm, S., (2019). Influence of Copper-Sided Tin Coating on the Weldability and Formation of Friction Stir Welded Aluminum-Copper-Joints, *Metals*, 9(2), 179, <https://doi.org/10.3390/Met9020179>



# BÖLÜM 2

## YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA PERSPEKTİFLERİ

*Ahmet ELBİR<sup>1</sup>*

*Mehmet Erhan ŞAHİN<sup>2</sup>*

---

1 Süleyman Demirel Üniversitesi, YEKARUM, Isparta, Turkey

\*ahmetelbir@sdu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-8934-7665

2 Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Isparta, Türkiye

erhansahin@isparta.edu.tr

ORCID: 0000-0003-1613-7493

## 1. Giriş

Enerji, ekonomik kalkınmanın temel yapı taşlarından biridir. Sanayi Devrimi'nden bu yana fosil yakıtlar dünya enerji sisteminin ana kaynağı olmuştur. Ancak fosil yakıtların neden olduğu karbon emisyonları ve diğer çevresel etkiler, iklim değişikliğiyle mücadeleyi zorlaştırmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için enerji üretim ve tüketim alışkanlıklarımızı yeniden değerlendirmemizi zorunlu kılmaktadır (IEA, 2021).

Sürdürülebilir kalkınma, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğini tehlikeye atmadan, mevcut neslin ihtiyaçlarını karşılamayı hedefleyen bir kalkınma modelidir (UN, 2015). Bu bağlamda, enerji üretimi ve tüketimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerji, düşük karbon emisyonları ve çevre dostu özellikleri nedeniyle sürdürülebilir kalkınmanın desteklenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, güneş ve rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara kıyasla daha az çevresel etkiye sahiptir ve enerji arz güvenliğini artırmada etkilidir (REN21, 2022).

Bununla birlikte, yenilenebilir olmayan ancak çevre dostu teknolojilerle sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilen enerji kaynakları da dikkate alınmalıdır. Bu kaynaklar arasında katran kumları, şeyl gazı, hidrojen, biyoyakıtlar (etanol) ve helyum-3 bulunmaktadır. Katran kumları ve şeyl gazı gibi fosil yakıt türevleri, gelişen teknolojiler sayesinde daha çevre dostu yöntemlerle çıkarılabilmekte ve işlenebilmektedir (Zhang et al., 2020). Özellikle şeyl gazı, son yıllarda enerji sektöründe önemli bir yere sahip olmuştur. ABD'de geliştirilen hidrolik kırma teknolojileri, bu kaynağın büyük ölçekli çıkarılmasını mümkün kılmıştır (EIA, 2023). Ancak, şeyl gazının çevresel etkileri arasında yeraltı su kaynaklarının kirlenmesi ve metan gazı salınımı gibi sorunlar bulunmaktadır. Bu nedenle, enerji arz güvenliği açısından önemli bir seçenek olsa da, çevresel etkileri dikkate alınmalıdır (EPA, 2022).

Hidrojen, enerji geçişinde önemli bir rol oynayan ve sıfır karbon emisyon potansiyeline sahip bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojenin en yaygın üretim yöntemi suyun elektrolizidir ve bu süreç yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenirse çevresel açıdan tamamen sürdürülebilir bir seçenek sunar (IRENA, 2021). Bununla birlikte, hidrojenin depolanması ve taşınması konusundaki teknik zorluklar, bu kaynağın geniş çapta kullanımını sınırlamaktadır. Taşımacılık ve ağır sanayide hidrojenin gelecekteki rolü önemli bir araştırma alanıdır (Wang et al., 2022).

Biyoyakıtlar, özellikle tarımsal ürünlerden elde edilen ve fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon emisyonuna sahip yakıtlardır. ABD ve Bre-

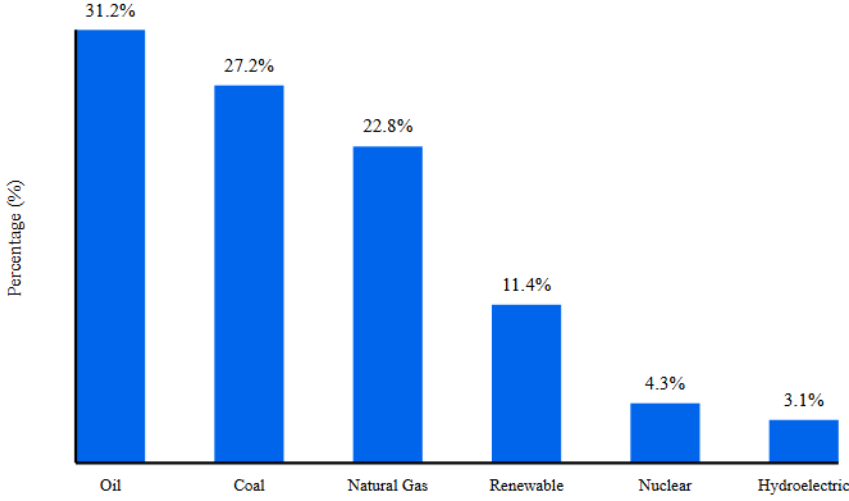
zilya, mısır ve şeker kamışından üretilen etanol ile biyoyakıt üretiminde liderdir (Goldemberg, 2008). Ancak biyoyakıtların üretimi, tarım arazilerinin kullanımını artırarak gıda fiyatları üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu kaynakların sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayabilmesi için üretim süreçlerinin verimliliği artırılmalı ve gıda güvenliğine yönelik riskler en aza indirilmelidir (FAO, 2020).

Helyum-3, Ay yüzeyinde bulunan ve nükleer füzyon için ideal bir yakıt kaynağı olarak görölen bir izotoptur. Dünya dışı madencilik alanında devrim yaratma potansiyeline sahip olan helyum-3, şu an için çıkarılması ve taşınması açısından yüksek maliyetli bir kaynaktır. Ancak, uzun vadede füzyon enerjisi kullanımıyla karbon emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılması hedeflenmektedir (Kulcinski, 2008). Bu teknoloji, enerji sektöründe sürdürülebilirliğin sınırlarını yeniden tanımlayabilir.

Enerji, ekonomik kalkınmanın temel yapı taşlarından biridir. Sanayi Devrimi'nden bu yana fosil yakıtlar, dünya enerji sisteminin ana kaynağı olmuştur. Ancak, fosil yakıtların neden olduğu karbon emisyonları ve çevresel etkiler, iklim değişikliğiyile mücadeleyi zorlaştırmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir kalkınma hedeflerini destekleyen enerji kaynaklarına geçişi zorunlu kılmaktadır. Geleneksel yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar, hidroelektrik) önemli bir potansiyele sahip olsa da, yenilenebilir olmayan ancak çevre dostu teknolojilerle sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilen enerji kaynaklarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, katran kumları, şeyl gazı, hidrojen, biyoyakıtlar ve helyum-3 gibi enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınma açısından potansiyelleri tartışılacaktır.

şekil 1'de Bu grafik, fosil yakıtların enerji tüketimindeki baskın rolünü ve alternatif enerji kaynaklarının kullanım oranlarını göstermektedir.

### Global Energy Consumption Distribution by Source



Şekil 1. Dünya genelinde enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı (Vikipedi. (2023).

Tablo 1, farklı enerji kaynaklarının çevresel etkilerini değerlendirme- de yardımcı olmak için farklı enerji kaynaklarının karbon emisyon yoğunluklarını karşılaştırmaktadır:

**Tablo 1.** Farklı enerji kaynaklarının karbon emisyon yoğunluklarını karşılaştırma (Gazbir, (2016).

Enerji Kaynağı	Karbon Emisyon Yoğunluğu (gCO <sub>2</sub> /kWh)
Kömür	820
Petrol	650
Doğal Gaz	490
Biyokütle	78
Güneş Enerjisi	48
Rüzgar Enerjisi	11
Nükleer Enerji	12

Sonuç olarak, enerji üretiminde çeşitliliğin artırılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmada kritik bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra, yenilenebilir olmayan ancak çevre dostu teknolojilerle sürdürülebilir bir şekil-

de kullanılabilen enerji kaynaklarının da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, katran kumları, şeyl gazı, hidrojen, biyoyakıtlar ve helyum-3 gibi enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınma açısından potansiyelleri detaylı bir şekilde incelenmelidir.

## 2. Yenilenebilir Olmayan, Ancak Sürdürülebilir Enerji Kaynakları

### 2.1. Katran Kumları

Katran kumları, dünya enerji rezervlerinin önemli bir bölümünü oluşturan ve bitüm içeren bir kaynaktır. Özellikle Kanada'nın Alberta eyaletinde yoğun olarak bulunan bu kaynaklar, geleneksel petrol rezervlerine kıyasla daha karmaşık çıkarma ve işleme süreçleri gerektirmektedir. Bitüm, katran kumlarından ayrıştırılarak sentetik ham petrol veya rafine ürünlere dönüştürülür.

Katran kumlarından bitüm elde etmek için iki ana yöntem kullanılmaktadır: yüzey madenciliği ve in-situ (yerinde) yöntemler. Yüzey madenciliği, yüzeye yakın rezervlerde uygulanırken, derinlerdeki rezervler için in-situ yöntemler tercih edilir. Buhar Destekli Yerçekimi Drenajı (SAGD), in-situ yöntemler arasında en yaygın olanıdır. SAGD, bitümün viskozitesini azaltmak ve üretim kuyusuna doğru akmasını sağlamak için rezervuara yüksek basınçlı buhar enjekte etmeyi içerir. Bu yöntemin, daha derin ve daha az erişilebilir birikintilerden bitümün geri kazanılmasında oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır (ZBOTEK, 2022).

Katran kumlarının çıkarılması ve işlenmesi, geleneksel petrol üretimine göre daha yüksek karbon emisyonlarına neden olmaktadır. Tablo 2, katran kumları ve diğer enerji kaynaklarının karbon emisyon yoğunluklarını karşılaştırmaktadır. Katran kumları, geleneksel petrole göre %17 daha fazla karbon emisyonu üretmektedir (Environment Go!, 2023). Ayrıca, bu süreçler büyük miktarda su tüketimi ve arazi tahribatına yol açmaktadır.

**Tablo 2:** Enerji Kaynaklarının Karbon Emisyon Yoğunlukları (Environment Go!, 2023)

Enerji Kaynağı	Karbon Emisyonu (gCO <sub>2</sub> /kWh)
Katran Kumları	1040
Geleneksel Petrol	890
Doğal Gaz	490
Rüzgar Enerjisi	11
Güneş Enerjisi	48

Katranlı kum madenciliği, asla temizlenemeyecek devasa miktarlarda zehirli atık oluşturmaktadır. Açıkta kalan katran kumları çıkarıldıktan sonra, petrol şirketleri asfaltı kum ve çakıldan ayırmak için sıcak su ve kimyasallardan oluşan bir karışım kullanır. Bu ayırma işlemi tamamlandığında, artık kurşun, cıva, arsenik ve diğer kimyasalları içeren su ve kimyasal karışım, katran kumunun açık atık havuzlarına pompalanır (EUROLAB).

Modern teknolojiler, katran kumlarının çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri, üretim sırasında açığa çıkan karbon emisyonlarını azaltmak için kullanılmaktadır. Shell'in Alberta'daki Quest projesi, katran kumlarından elde edilen bitümün işlenmesi sırasında oluşan CO<sub>2</sub> emisyonlarını yakalayarak yer altına depolamaktadır. Ayrıca, buhar üretimi için yeni nesil mikro modüler reaktörlerin kullanımı gibi yenilikçi yöntemler de enerji verimliliğini artırmayı ve çevresel etkileri azaltmayı hedeflemektedir.

Katran kumları, Kanada'nın enerji üretiminde ve ihracatında stratejik bir öneme sahiptir. Alberta katran kumları rezervleri ve petrol kumları yatakları sayesinde Kanada'nın günlük petrol üretimi hızla artmaktadır. Bu kaynakların etkin kullanımı, enerji güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Taner, A. C., 2011, Gözetim.org). Katran kumları, dünya enerji arzında önemli bir yere sahip olmakla birlikte, çevresel etkileri ve yüksek karbon emisyonları nedeniyle eleştirilmektedir. Modern teknolojilerin entegrasyonu ve çevresel etkilerin azaltılması yönündeki çabalar, bu kaynakların sürdürülebilir kullanımını mümkün kılabilir. Ancak, katran kumlarının çıkarılması ve işlenmesi sırasında oluşan çevresel etkiler ve karbon emisyonları dikkate alındığında, bu kaynakların sürdürülebilir bir enerji çözümü olarak değerlendirilmesi tartışmalıdır.

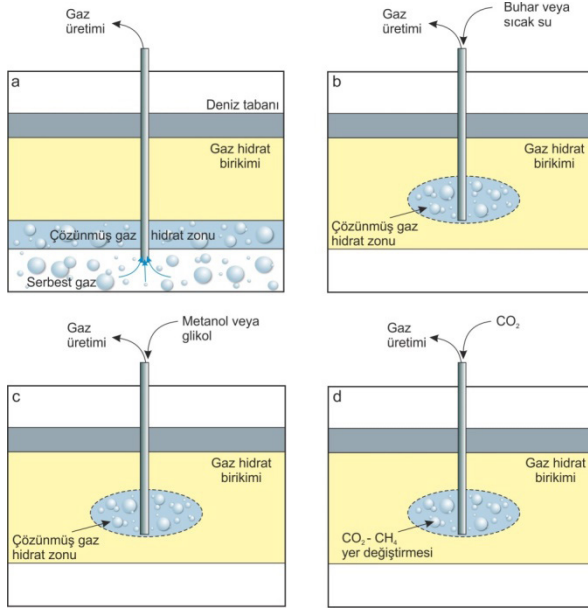
## 2.2. Şeyl Gazı

Şeyl gazı, son yıllarda enerji sektöründe önemli bir konuma yükselmiştir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) geliştirilen hidrolitik kırma (fracking) ve yatay sondaj teknolojileri, bu kaynağın büyük ölçekli çıkarılmasını mümkün kılmıştır. ABD'de 2000 yılında yaklaşık 9 milyar metreküp olan şeyl gazı üretimi, 2011 yılında 222 milyar metreküpe ulaşmıştır (Yalçın-Erik, 2016). Bu artış, ABD'nin enerji arz güvenliğini güçlendirmiş ve enerji ithalatını azaltmıştır.

Şeyl gazı üretimi, enerji arz güvenliği açısından önemli avantajlar sunmaktadır. ABD'deki üretim artışı, ülkenin enerji ithalatını azaltmış ve enerji bağımsızlığını artırmıştır. Benzer şekilde, şeyl gazı rezervlerine sahip diğer ülkeler de (örneğin, Çin, Kanada, Arjantin) bu kaynağı değer-

lendirerek enerji güvenliklerini artırmayı hedeflemektedirler (Yalçın-Erik, 2016).

Ancak, şeyl gazı üretiminin çevresel etkileri de dikkate değerdir. **Şekil 2**, şeyl gazı üretimi sırasında oluşan metan salınımını ve bu salınımın çevresel etkilerini göstermektedir. Hidrolik kırma sırasında kullanılan kimyasalların yeraltı su kaynaklarına sızma riski, su kaynaklarının kirlenmesine yol açabilir (Yalçın-Erik, 2016). Ayrıca, üretim sürecinde metan gazı salınımı, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğine katkıda bulunabilir. Bu çevresel endişeler, şeyl gazı üretiminin sürdürülebilirliği konusunda tartışmalara neden olmaktadır.



**Şekil 2:** Şeyl Gazı Üretimi ve Metan Salınımı (Yalçın-Erik, 2016).

Avrupa ve Asya'da da şeyl gazı potansiyeli üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle Polonya, Fransa ve İngiltere gibi Avrupa ülkelerinde şeyl gazı rezervleri tespit edilmiştir. Ancak, Avrupa'da nüfus yoğunluğunun yüksek olması ve çevresel endişeler nedeniyle şeyl gazı üretimi daha yavaş ilerlemektedir (Yalçın-Erik, 2016). Tablo 3, seçili ülkelerdeki şeyl gazı rezerv miktarlarını göstermektedir. Asya'da ise Çin, dünyanın en büyük şeyl gazı rezervlerine sahip olup, bu kaynağı enerji güvenliği stratejilerinde önemli bir bileşen olarak değerlendirmektedir (Yalçın-Erik, 2016).

**Tablo 3:** Seçili Ülkelerde Şeyl Gazı Rezervleri (Yalçın-Erik, 2016)

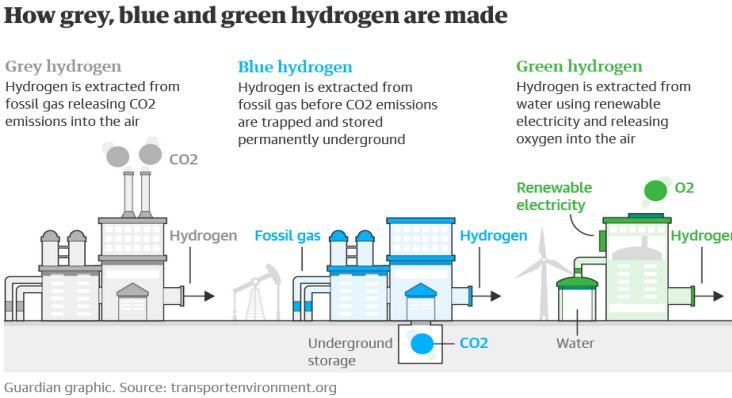
Ülke	Rezerv Miktarı (Trilyon m <sup>3</sup> )
Çin	31
ABD	24
Arjantin	21
Kanada	17
Polonya	5

Şeyl gazının enerji sektöründeki yükselişi, küresel enerji piyasalarını ve politikalarını da etkilemektedir. Özellikle ABD'nin şeyl gazı üretimindeki artış, enerji ihracatçısı ülkelerin pazar paylarını ve fiyatlarını etkilemiştir. Ayrıca, şeyl gazı üretimi, enerji arz güvenliği açısından alternatif bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Yalçın-Erik, 2016).

Sonuç olarak, şeyl gazı, enerji arz güvenliği açısından önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Ancak, üretim süreçlerinin çevresel etkileri ve sürdürülebilirliği konusundaki endişeler, bu kaynağın kullanımını sınırlayabilir. Bu nedenle, şeyl gazı üretiminde çevresel etkilerin minimize edilmesi ve sürdürülebilir üretim yöntemlerinin geliştirilmesi önem taşımaktadır.

### 2.3. Hidrojen

Hidrojen, enerji geçişinde kritik bir rol oynayan ve sıfır karbon emisyon potansiyeline sahip bir enerji taşıyıcısıdır. En yaygın üretim yöntemi, suyun elektrolizi olup, bu süreç yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklendiğinde çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunar (Özdemir, 2019). Ancak, hidrojenin depolanması ve taşınması konusundaki teknik zorluklar, geniş çaplı kullanımını sınırlamaktadır. Şekil 3, hidrojen üretim yöntemlerini özetlemektedir.

**Şekil 3:** Hidrojen Üretim Yöntemleri (Özdemir, 2019)

Hidrojen üretimi için başlıca yöntemler şunlardır:

- **Suyun Elektrolizi:** Elektrik enerjisi kullanarak suyun hidrojen ve oksijene ayrıştırılmasıdır. Eğer kullanılan elektrik yenilenebilir kaynaklardan elde edilirse, süreç tamamen çevre dostu olur (Özdemir, 2019).
- **Fosil Yakıtlardan Üretim:** Doğal gazın buharla reformasyonu gibi yöntemlerle hidrojen üretilebilir; ancak bu süreçler karbon emisyonlarına neden olur.
- **Biyolojik Yöntemler:** Mikroorganizmaların kullanıldığı biyofotoliz ve karanlık fermantasyon gibi yöntemlerle hidrojen üretimi mümkündür (MMO, 2020).

**Tablo 4**, hidrojen üretim yöntemlerinin karbon emisyonları ve verimlilik açısından karşılaştırmasını sunmaktadır.

**Tablo 4:** Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Özdemir (2019), MMO (2020))

Üretim Yöntemi	Karbon Emisyonu (gCO <sub>2</sub> /kWh)	Verimlilik (%)
Suyun Elektrolizi	0	70–85
Fosil Yakıtlardan Üretim	300–500	60–75
Biyolojik Yöntemler	50–100	40–60

Hidrojenin düşük yoğunluğu ve yüksek yanıcılığı, depolama ve taşımada çeşitli zorluklar yaratır:

- **Depolama:** Hidrojenin gaz formunda depolanması için yüksek basınçlı tanklar veya sıvı formunda depolanması için çok düşük sıcaklıklar gereklidir. Bu durum, maliyetleri artırır ve teknik zorluklar oluşturur (EIF 2050, 2021).
- **Taşıma:** Hidrojenin boru hatlarıyla taşınması mümkündür; ancak mevcut doğal gaz altyapısının hidrojen için uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir (Tek Sis, 2022). Ayrıca, sıvı hidrojenin taşınması için -253°C gibi çok düşük sıcaklıkların korunması gerekir, bu da enerji ve maliyet açısından zorluklar yaratır (Türk Çimento, 2021).

Tablo 5, farklı hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırmasını sunmaktadır:

**Tablo 5:** Farklı hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırılması

Depolama Yöntemi	Enerji Yoğunluğu (kWh/kg)	Depolama Basıncı/Sıcaklığı	Avantajlar	Dezavantajlar
Gaz Halinde Depolama	33.3	200–700 bar	Teknolojik olarak olgun, yaygın kullanımda	Düşük hacimsel yoğunluk, yüksek basınç gereksinimi
Sıvı Halinde Depolama	33.3	-253°C	Yüksek enerji yoğunluğu	Düşük sıcaklık gereksinimi, enerji maliyeti yüksek
Katı Halde Depolama	5–10	Ortam koşulları	Güvenli depolama, düşük basınç	Düşük depolama kapasitesi, yüksek maliyet

Hidrojen, özellikle taşımacılık ve ağır sanayi sektörlerinde fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahiptir:

- **Taşımacılık:** Yakıt hücreli araçlar, hidrojen kullanarak sıfır emisyonla çalışabilir. Ağır ticari araçlar ve uzun mesafe taşımacılık için hidrojenli yakıt hücreleri üzerine araştırmalar devam etmektedir (AA, 2022).
- **Ağır Sanayi:** Demir-çelik, çimento ve petrokimya gibi enerji yoğun sektörlerde hidrojen kullanımı, karbon emisyonlarını azaltmada önemli bir rol oynayabilir (Enerji Bakanlığı, 2023).

**Tablo 6,** hidrojenin taşımacılık ve ağır sanayide kullanım potansiyelini özetlemektedir.

**Tablo 6:** *Hidrojenin Taşımacılık ve Ağır Sanayide Kullanımı (AA, 2022), Enerji Bakanlığı, 2023))*

Sektör	Kullanım Alanı	Karbon Emisyon Azalımı (%)
Taşımacılık	Yakıt hücreli araçlar	90–100
Ağır Sanayi	Çimento ve demir-çelik üretimi	50–70
Petrokimya	Proses ısısı ve enerji üretimi	40–60

Hidrojen, enerji sektöründe sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. Üretim, depolama ve taşıma konusundaki mevcut teknik zorlukların aşılması ve maliyetlerin düşürülmesi, hidrojenin geniş çaplı kullanımını mümkün kılacaktır. Özellikle taşımacılık ve ağır sanayi sektörlerinde fosil yakıtların yerini alarak karbon emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynayabilir.

#### 2.4. Biyoyakıtlar (Etanol)

Biyoyakıtlar, fosil yakıtlara kıyasla daha düşük karbon emisyonuna sahip olmaları nedeniyle sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle etanol, tarımsal ürünlerden elde edilerek enerji üretiminde kullanılmaktadır. Dünya etanol üretiminin yaklaşık %70'ini ABD ve Brezilya sağlamaktadır; ABD'de mısır, Brezilya'da ise şeker kamışı etanol üretiminin başlıca hammaddeleridir (Balat, 2011).

Etanol üretimi, enerji güvenliğine katkı sağlarken, tarım arazilerinin biyoyakıt üretimi için kullanılması gıda fiyatları üzerinde baskı oluşturabilmektedir. Enerji tarımı amaçlı biyoyakıt üretiminin gıda fiyatları üzerinde olumsuz etki yarattığı eleştirileri üzerine, ikinci ve üçüncü nesil biyoyakıtların yaygınlaştırılması ve ticarileştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Avrupa Birliği ve Türkiye'de Biyoetanol Üretimi ve CO<sub>2</sub> Emisyonunun Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisinin Panel Veri Analizi Aracılığıyla İncelenmesi, 2019).

Brezilya, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak etanol üretimini ve kullanımını desteklemektedir. Ancak, etanol üretimi için tarım arazilerinin kullanımı, gıda üretimi ve fiyatları üzerinde etkili olabilmektedir (Yıldırım, 2023).

Biyoyakıtların sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayabilmesi için üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılması ve gıda güvenliğine yönelik risklerin en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ikinci ve üçüncü nesil biyoyakıtların geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi önem arz etmektedir.

(Avrupa Birliği ve Türkiye’de Biyoetanol Üretimi ve CO<sub>2</sub> Emisyonunun Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisinin Panel Veri Analizi Aracılığıyla İncelenmesi, 2019).

Tablo 7, farklı biyoyakıt türlerinin enerji verimliliği ve karbon emisyonları açısından karşılaştırmasını sunmaktadır:

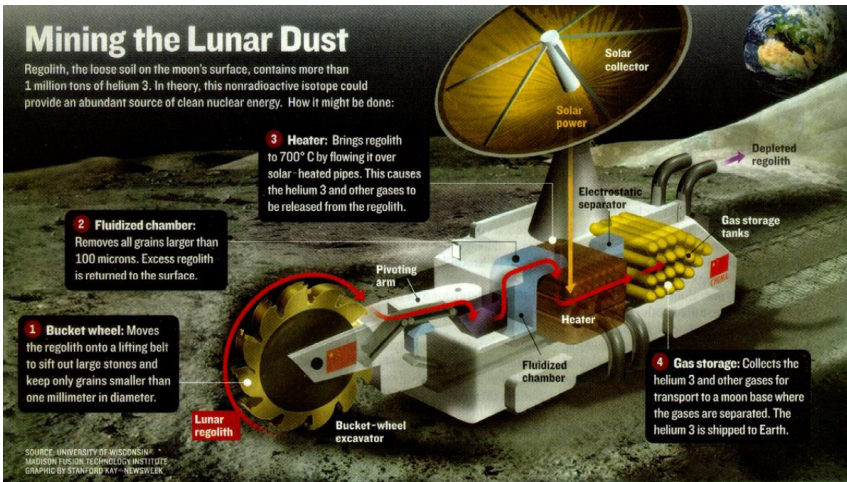
**Tablo 7.** Farklı biyoyakıt türlerinin enerji verimliliği ve karbon emisyonları açısından karşılaştırması

B i y o y a k ı t Türü	Enerji (MJ/L)	Verimliliği	Karbon (gCO <sub>2</sub> /MJ)	Emisyonu
Etanol	21.1		74	
Biyodizel	33.3		83	
Biyogaz	25.0		20	

Bu veriler, biyoyakıtların enerji verimliliği ve çevresel etkileri hakkında genel bir bakış sunmaktadır.

### 2.5. Helyum-3

Helyum-3 (He-3), Ay yüzeyinde bol miktarda bulunan ve nükleer füzyon için ideal bir yakıt olarak değerlendirilen bir izotoptur. Dünya’da sınırlı miktarda bulunan He-3, Ay’da yaklaşık 500 milyon ton civarında tahmin edilmektedir (Ekşi Sözlük, 2008). Bu izotop, nötron üretmeyen füzyon reaksiyonlarına girerek çevre dostu enerji üretimi sağlar (Vikipedi, 2005). **Şekil 4**, Ay yüzeyinde He-3 rezervlerini ve çıkarma süreçlerini özetlemektedir.



**Şekil 4:** Ay Yüzeyinde Helyum-3 Rezervleri ve Çıkarma Süreci (Demircan ,2016)

Ay'dan He-3 çıkarma ve Dünya'ya getirme çalışmaları, özellikle Çin tarafından 2030 yılı hedeflenerek planlanmaktadır (Demircan, 2016). Bu süreç, yüksek maliyetler ve teknolojik zorluklar içermektedir. Örneğin, He-3'ün Dünya'daki maliyeti litre başına birkaç bin doları bulmaktadır (Dijital İyidir, 2024). Ancak, başarılı olunması halinde, He-3 ile çalışan füzyon reaktörleri, geleneksel nükleer enerjiden dört kat ve fosil yakıtlardan milyonlarca kat daha fazla enerji üretebilir (Demircan, 2016). Tablo 8, He-3 ve diğer enerji kaynaklarının karşılaştırmalı enerji üretim verimliliğini göstermektedir.

**Tablo 8:** Helyum-3 ve Diğer Enerji Kaynaklarının Karşılaştırmalı Verimliliği (Dijital İyidir, 2024), Vikipedi, 2005))

Enerji Kaynağı	Enerji Üretim Verimliliği (MJ/kg)	Karbon Emisyonu (gCO <sub>2</sub> /kWh)
Helyum-3	2,000,000	0
Geleneksel Nükleer	80,000	10
Fosil Yakıtlar	40,000	820

He-3'ün füzyon reaksiyonları sırasında nötron üretmemesi, radyoaktif atık sorununu büyük ölçüde azaltır ve enerji üretimini daha güvenli hale getirir (Vikipedi, 2005). Bu özellik, gelecekte enerji sektöründe sürdürülebilirliğin artırılması ve karbon emisyonlarının azaltılması açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır. **Şekil 5**, He-3'ün füzyon reaksiyonlarındaki avantajlarını diğer füzyon yakıtlarıyla karşılaştırmaktadır.

**Tablo 9.** Helyum-3 ve Diğer Füzyon Yakıtlarının Karşılaştırması (Demircan, 2016)

Özellikler	Helyum-3 (He-3)	Döteryum-Trityum (D-T)	Döteryum-Helyum-3 (D-He3)
Nötron Üretimi	Yok	Yüksek	Düşük
Radyoaktif Atık	Yok	Yüksek	Çok Az
Enerji Verimliliği	Yüksek	Orta	Yüksek
Yakıt Bulunabilirliği	Kısıtlı (Ay)	Yaygın	Kısıtlı
Teknik Zorluk	Yüksek	Orta	Yüksek
Maliyet	Yüksek	Düşük-Orta	Yüksek

Ancak, He-3 madenciliği ve füzyon teknolojilerinin geliştirilmesi, yüksek maliyetler ve teknik engeller nedeniyle henüz erken aşamalarda.

Bu nedenle, He-3'ün enerji üretiminde yaygın olarak kullanılması, uzun vadeli bir hedef olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, He-3, gelecekte enerji sektöründe devrim yaratma potansiyeline sahip bir kaynak olarak görülmektedir. Ay'dan He-3 çıkarma ve füzyon enerjisi üretme çalışmaları, enerji sektöründe sürdürülebilirliğin sınırlarını yeniden tanımlayabilir.

### 3. Sonuç

Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve çevresel etkilerinin en aza indirilmesiyle mümkündür. Geleneksel enerji kaynaklarının sınırlılıkları ve çevresel maliyetleri, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir olmayan ancak sürdürülebilir olarak değerlendirilebilecek enerji kaynakları, enerji geçiş sürecinde stratejik bir role sahiptir.

Katran kumları, şeyl gazı, hidrojen, biyoyakıtlar ve helyum-3 gibi kaynaklar, yenilikçi teknolojiler ve enerji verimliliği artırıcı yatırımlarla daha çevre dostu ve ekonomik olarak uygulanabilir hale getirilebilir. Ancak, bu kaynakların kullanımında çevresel etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi ve ekonomik sürdürülebilirlik ilkelerinin gözetilmesi kritik öneme sahiptir. Örneğin, katran kumları ve şeyl gazı gibi fosil yakıt türevleri, enerji güvenliğine katkı sağlarken karbon emisyonları ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle hassas bir yönetim gerektirir.

Benzer şekilde, hidrojen ve biyoyakıtlar gibi kaynaklar, sıfır karbon emisyon hedeflerini destekleyerek taşımacılık, ağır sanayi ve enerji üretimi gibi sektörlerde fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyel taşımaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin depolanması ve taşınması gibi teknik zorlukların aşılması ve biyoyakıt üretiminin tarım arazileri üzerindeki etkilerinin minimize edilmesi, bu kaynakların sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak için gereklidir.

Helyum-3 gibi daha ileri düzeyde teknolojik uygulamalar ise, uzun vadeli enerji stratejilerinde çığır açma potansiyeline sahiptir. Ay yüzeyinden helyum-3 çıkarma ve Dünya'da füzyon enerjisi üretimi gibi hedefler, yüksek maliyetlere ve teknolojik engellere rağmen enerji sektöründe karbon emisyonlarının tamamen ortadan kaldırılmasına yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Enerji geçiş sürecinde, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılabilmesi için yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan tüm enerji kaynaklarının entegre bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunun için devletler, özel sektör, bilim insanları ve sivil toplum kuruluşları arasında iş birliği ve politika uyumu sağlanmalıdır. Özellikle karbon emisyonlarını

azaltıcı yenilikçi teknolojilerin yaygınlaştırılması ve ekonomik uygulanabilirliğin sağlanması, enerji geçişinin başarısı için kritik olacaktır.

Sonuç olarak, enerji sistemlerinde dönüşüm, yalnızca ekonomik ve teknolojik yeniliklere değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal sorumluluk bilincine de dayanmalıdır. Gelecek nesiller için daha yaşanabilir bir dünya yaratma hedefi, enerji geçiş süreçlerinde bütüncül bir yaklaşım benimsenmesini gerektirir. Bu bağlamda, enerji kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi, ekonomik büyüme ile çevresel koruma arasındaki dengeyi sağlayarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesine önemli katkılar sunacaktır.

## Kaynakça

- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Understanding the impacts of hydraulic fracturing on the environment. Retrieved from <https://www.epa.gov>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). Biofuels and food security: Balancing priorities. Retrieved from <https://www.fao.org>
- Goldemberg, J. (2008). The promise of biofuels in the energy transition. *Energy Policy*, 36(11), 4376-4381. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.033>
- International Energy Agency (IEA). (2021). World Energy Outlook 2021. Retrieved from <https://www.iea.org>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Hydrogen: A renewable energy perspective. Retrieved from <https://www.irena.org>
- Kulcinski, G. (2008). Helium-3: A sustainable fuel for fusion energy. *Fusion Technology*, 49(6), 789-799. <https://doi.org/10.1016/j.fuseng.2008.09.045>
- REN21. (2022). Renewables 2022 Global Status Report. Retrieved from <https://www.ren21.net>
- U.S.
- Energy Information Administration (EIA). (2023). Shale gas development in the United States. Retrieved from <https://www.eia.gov>
- United Nations (UN). (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Retrieved from <https://www.un.org>
- Wang, T., Zhang, Y., & Li, M. (2022). Challenges in hydrogen storage and transportation: An overview. *Renewable Energy*, 190, 237-245. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.008>
- Zhang, X., Liu, Y., & Chen, Z. (2020). Oil sands and sustainable development: The case of Canada. *Energy Reports*, 6, 1049-1061. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.019>
- Environment Go! (2023). Katran Kumlarının Çevresel 10 Etkisi. Erişim adresi: <https://tr.environmentgo.com/katran-kumlar%C4%B1n%C4%B1n-%C3%A7evresel-etkileri/>
- Taner, A. C. (2011). Kanada Alberta Eyaleti Katran Kumları (Tar Sands) ve Petrol Kumları (Oil Sands) İhracat Yolları ve Amerika Keystone XL Petrol Boru Hattı Projesi. Fizik Mühendisleri Odası. Erişim adresi: <https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2011/07/Kanada-Alberta-Eyaleti-Katran-Kumlar%C4%B1-Tar-Sands-ve-Petrol-Kumlar%C4%B1-Oil-Sands-%C4%B0hracat-Yollar%C4%B1-ve-Amerika-Keystone-XL-Petrol-Boru-Hatt%C4%B1-Projesi-1.pdf>
- Katranlı Kum - Atık Hizmetleri - EUROLAB. (2024)Erişim adresi: <https://www.kalite.com/eurolab/katranli-kum-atik-hizmetleri>

- ZBOTEK. (2022). Kanada'da Yağlı Kumlar ve Enerji Sorunları. Erişim adresi: <https://zbotek.com/tr/oil-sands-and-energy-challenges-in-canada/>
- Kanada Petrol Kumları Kaynaklı Ağır Ham Petrol Bitumen Eldesi İçin Buhar Üretimi AR-GE Çalışmaları ve Yeni Kuşak Mikro Modüler Reaktörler Kullanımı. (2024). Erişim adresi: <https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2011/07/Kanada-Petrol>
- Yalçın-Erik, N. (2016). Şeyl Gazı; Jeolojik Özellikleri, Çevresel Etkileri ve Küresel Ekonomik Anlamı. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59(2), 109-126.
- Özdemir Z.Ö. & Mutlubaş H., "Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri, Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences JONAS, 2019, 2 (1): 16-34
- Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. (2024). Retrieved from [Enerji Bakanlığı](#)
- Hidrojen üretim yöntemleri. (2024). Retrieved from [MMO](#)
- Hidrojen ve kullanım potansiyeli. (2024). Retrieved from [Türk Çimento](#)
- Hidrojen enerjisi bilgilendirme notu. (2024). Retrieved from [Türkiye Sakatlar Derneği](#)
- Uluslararası Hidrojen Stratejileri Raporu. (2024). Retrieved from [Dünya Enerji](#)
- Avrupa Birliği ve Türkiye'de Biyoetanol Üretimi ve CO<sub>2</sub> Emisyonunun Ekonomik Büyüme Üzerindeki Etkisinin Panel Veri Analizi Aracılığıyla İncelenmesi. (2019). Retrieved from <https://avesis.ogu.edu.tr/yayin/2af4039c-8a49-4e54-9924-bac7354863e7/avrupa-birligi-ve-turkiyede-biyoetanol-uretimi-ve-co2-emisyonunun-ekonomik-buyume-uzerindeki-etkisinin-panel-veri-analizi-araciligiyla-incelenmesi/document.pdf>
- Yıldırım, A. E. (2023). Başka Ülkelerde Tarım: Brezilya. Retrieved from <https://www.tarimdunyasi.net/2023/10/07/baska-ulkelerde-tarim-brezilya/>
- Demircan, K. (2016). Çin Ay'dan Helyum-3 Füzyon Yakıtı Getirecek. Khosann. Erişim adresi: <https://khosann.com/cin-aydan-helyum-3-getirecek/>
- Helyum-3. (2005). Vikipedi. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Helyum-3>
- Helyum-3. (2008). Ekşi Sözlük. Erişim adresi: <https://eksisozluk.com/helyum-3--1475915>
- Ay'daki Helyum-3 Madenciliği Projesiyle Yeni Bir Pazar Doğuyor. (2024). Dijital İyidir. Erişim adresi: <https://dijitaliyidir.com/2024/03/16/aydaki-helyum-3-madenciligi-projesiyle-yeni-bir-pazar-doguyor/>
- AA. (2022). Yakıt hücreli araçlar ve hidrojenin taşımacılıkta kullanımı. *Anadolu Ajansı*. Erişim adresi: <https://www.aa.com.tr>
- Enerji Bakanlığı. (2023). Hidrojen teknolojilerinin sanayi sektöründe uygulanabilirliği. *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*.

- EIF 2050. (2021). Hidrojenin enerji sektörü için önemi. *Enerji İnovasyon Forumu*.
- MMO. (2020). Biyolojik hidrojen üretim yöntemleri. *Makine Mühendisleri Odası*.
- Özdemir, H. (2019). Hidrojen ve enerji geçiş süreçleri. *Enerji Bilimleri Dergisi*, 12(4), 45-56.
- Tek Sis. (2022). Hidrojenin boru hattı taşımacılığındaki teknik zorluklar. *Teknoloji ve Sistem*.
- Türk Çimento. (2021). Hidrojen depolama ve taşıma maliyetleri. Türkiye Çimento Endüstrisi.
- Demircan, K. (2016). Çin Ay'dan Helyum-3 Füzyon Yakıtı Getirecek. *Khosann*. Erişim adresi: <https://khosann.com/cin-aydan-helyum-3-getirecek/>
- Dijital İyidir. (2024). Ay'daki Helyum-3 Madencilği Projesiyle Yeni Bir Pazar Doğuyor. *Dijital İyidir*. Erişim adresi: <https://dijitaliyidir.com/2024/03/16/aydaki-helyum-3-madenciligi-projesiyle-yeni-bir-pazar-doguyor/>
- Ekşi Sözlük. (2008). Helyum-3. *Ekşi Sözlük*. (Erişim adresi: <https://eksisozluk.com/helyum-3--1475915>)
- Vikipedi. (2005). Helyum-3. Vikipedi. (Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Helyum-3>)
- Vikipedi. (2023). Dünya enerji tüketimi. (Erişim adresi: [https://tr.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCnya\\_enerji\\_t%C3%BCketimi](https://tr.wikipedia.org/wiki/D%C3%BCnya_enerji_t%C3%BCketimi).)
- GAZBİR. (2016). Karbon emisyonu. Erişim adresi: <https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/karbon%20emisyonu-rev-son.pdf>
- Şeyl Gazı Teknolojileri ve Çevresel Etkiler: Çalışma Raporu, 2022.
- Hidrojen Enerjisi: Sıfır Karbonlu Gelecek İçin Yenilikçi Çözümler, 2023.
- Kanada'nın Katran Kumları: Enerji Güvenliği ve Çevresel Maliyetler, 2021.
- Biyoyakıtların Küresel Enerji Politikalarındaki Yeri, 2020.
- Helyum-3 ve Füzyon Enerjisi: Gelecek Perspektifleri, 2024.

# BÖLÜM 3

## TARIMSAL İNSANSIZ KARA ARACINDA ELEKTRO-HİDROLİK PULLUK İNCELENMESİ

*Şeymanur USTA<sup>1</sup>*

*Beytullah BOZALİ<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Şeymanur USTA, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye. anlamsizyazar@gmail.com, Orcid ID: 0009-0009-1961-5447

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Düzce, Türkiye. beytullahbozali@duzce.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-3633-5780

## 1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinde, av-avcı dinamiğine dayalı hayatta kalma mücadelesi, barınak yapımı ve avlanma tekniklerinin gelişimi ile ivme kazanmış; yerleşik hayata geçiş ve tarımsal faaliyetlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bireyler verimli topraklara dayalı yaşam biçimleri benimsemiştir. Tarıma dayalı toplum yapısının getirdiği zorluklar, ticaretin gelişimini, makineleşmeyi ve sanayileşmeyi zorunlu kılmış; bu süreç, tarımsal verimliliğin artırılmasına ve küresel ticaretin genişlemesine katkıda bulunmuştur. Küreselleşmeyle ivmelenen teknolojik ilerlemeler, endüstriyel üretimde insan kaynaklı maliyetleri azaltma amacıyla otomasyon sistemlerinin önemini artırmıştır. Bu doğrultuda, robot teknolojileri endüstriyel otomasyonun temel unsurlarından biri haline gelmiş; birçok üretim tesisi, yarı veya tam otonom sistemlere geçiş yaparak üretim süreçlerini «karanlık fabrika» konsepti çerçevesinde yönetmeye başlamıştır. Yüksek değerli mahsuller için hasat robotlarının mevcut durumunu ve karşılaşılan zorlukları ele aldıkları çalışmalarında, tarımsal otomasyonun gelişimini detaylandırmıştır. Çalışmada, robotik sistemlerin tarım sektöründe kullanımının artmasının verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından önemli olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca, hasat robotlarının hassas tarım teknikleri ile entegrasyonunun, iş gücü maliyetlerini azaltarak üretim süreçlerini optimize edebileceğini belirtmişlerdir (Bac & van Henten, 2014). Yüksek değerli mahsuller için hasat robotlarının mevcut durumunu ve karşılaşılan zorlukları ele aldıkları çalışmalarında, tarımsal otomasyonun gelişimini detaylandırmıştır. Jukema ve Van de Meer çalışmalarında, robotik sistemlerin tarım sektöründe kullanımının artmasının verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından önemli olduğu vurgulanmakta ve özellikle hasat robotlarının hassas tarım teknikleri ile entegrasyonunun, iş gücü maliyetlerini azaltarak üretim süreçlerini optimize edebileceğini belirtmektedirler. Tarımsal üretimde yüksek iş gücü maliyetleri, otomasyon ihtiyacını artıran temel etkenlerden biri olduğunu vurgulamışlardır (Jukema & Van de Meer, 2009). Teknoloji kullanımı, verim ve ürün kalitesini artırarak ekonomik ve sürdürülebilir tarımı mümkün kılmakta, bu sayede minimum girdi kullanımı ile üretici gelirleri artırılabilir, maliyetler düşürülebilir ve doğal kaynaklar ile çevre korunabilir olduğunu vurgulamışlardır (Özgüven et al., 2020). Yüksek maliyetler, yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda sosyal, çevresel ve gıda kalitesiyle ilgili faktörler nedeniyle de hasat işlemlerinde otomasyonu teşvik ettiğini belirtmişlerdir (Lewis, Watts, & Nagpal, 1983; Van Henten, 2006). Bununla birlikte, tarımsal otomasyon sistemlerinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için teknik ve ekonomik gereksinimlerin dikkatlice belirlenmesi gerekmektedir. Çevrim süresi, başarı oranları ve sistem maliyetleri gibi değişkenler arasında karmaşık bir etkileşim bulunmakta olup, bu faktörler birbirlerini doğrudan etkilemektedir. Bu doğrultuda Pekkeriet, ekonomik

açından uygulanabilir senaryoların belirlenmesi, otomasyon sistemlerinin tarımsal üretimde yaygınlaştırılması açısından kritik bir rol oynadığını ifade etmiştir (Pekkeriet, 2011). Doğa ile insan arasındaki iş birliği her geçen gün artmakta ve sürdürülebilir teknoloji alanında yeni çalışmaların temelini atmaktadır. Ancak, bir robotu nitelendirebilmek için, çevreyle etkileşim kurma, fiziksel işlevleri yerine getirme, programlana bilirlik ve insanlarla iletişim kurabilme gibi belirli fonksiyonları yerine getirmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır (Vardin et al., 2022).

Tarımsal üretimde karşılaşılan zorlukları çözmek amacıyla bir robotun nitelendirilebilmesi için çevreyle etkileşim kurabilme, fiziksel işlevleri yerine getirme, programlana bilirlik ve insanlarla iletişim kurma gibi belirli fonksiyonların yerine getirilmesi gerekmektedir (Vardin et al., 2022). Tam otonom sistemlerin ilk örnekleri, genellikle insansız kara araçları (İKA) üzerinde geliştirilmiştir (Young et al., 2017). İKA'lar gelişmiş donanım ve yazılım bileşenleriyle donatılmış, insan müdahalesi olmaksızın önceden belirlenmiş görevleri yerine getirebilen otonom makineler olarak tanımlanabilir (Güzey et al., 2020).

İKA'lar, kendi kararlarını alabilme, verileri analiz etme ve karşılaştırma yetenekleri ile çevre tarama, tanıma ve araştırma gibi fonksiyonları etkili bir şekilde yerine getirebilir. Bu araçlar, endüstriyel ve savunma sanayi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmakta ve sürekli olarak geliştirilmektedir. Bununla birlikte, İKA'ların mekanik yapıları karmaşık olup, geometrik tasarımları, durağan cisimlerin çokluğu ve düşük tolerans değerleri gibi faktörler, mühendislik açısından önemli tasarım zorlukları oluşturur (Kıvanç et al., 2019; Kiliç & Kapucu, 2017). Vardin ve arkadaşlarının çalışmalarında, kompakt şasili ve dört tekerlekten tahrikli bir insansız kara aracı incelenmiştir. Araştırmada, insansız kara araçlarının güçlü ve zayıf yönleri karşılaştırılmış; zorlu hava koşullarında mükemmel operasyonel yeteneklere sahip olan bu araçların, sınırlı esneklikle daha yavaş tepki sürelerine sahip oldukları belirtilmiştir. Ayrıca, insansız yer araçlarının arazideki performansları ve potansiyel geliştirilebilirliklerini ele almışlardır (Vardin et al., 2022).

Tarım makineleri alanında yapılan çeşitli çalışmalar, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından önemli yenilikler ortaya koymaktadır. Aksoy tarafından yürütülen çalışmada, GPS destekli sistemler kullanılarak ekin sıraları arasındaki yabancı otların mikro dozda herbisit püskürtme yöntemiyle imha edilmesini hedeflemiştir (Aksoy, 2024). Savaşır tarafından gerçekleştirilen çalışmada, dizel traktörlerin elektrikli hale dönüştürülmesi süreci incelenmiş ve tasarım değişiklikleri ile performans analizleri ele alınmıştır. Traktörlerin düşük hızda çalışması nedeniyle ivmelenme ve rüzgâr dirençleri ihmal edilirken, yuvarlanma, yokuş ve pulluk çeki dirençleri değerlendirilmiştir (Savaşır, 2013). Bunun yanı sıra, traktör hidrolik kaldırıcılarında

kullanılan elektro-hidrolik çeki kontrol sistemleri de önemli bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır. Uymaz ve Uymaz, mevcut sistemlerde kullanılan karmaşık ve maliyetli yük pimlerine alternatif olarak entegre bir çeki algılama sistemi geliştirmişlerdir (Uymaz & Uymaz, 2024).

Bu çalışmada, tarımsal üretimde karşılaşılan toprak işleme ve verim kaybı sorunlarına yönelik yenilikçi bir çözüm sunmak amacıyla, elektro-hidrolik kontrollü pulluk sistemine sahip bir Tarımsal İnsansız Kara Aracı (TİKA) tasarlanmaktadır. Tarımsal üretimde otonom sistemlerin kullanımının artmasıyla birlikte, TİKA'lar hasat, zararlı ot kontrolü, toprak işleme ve ekim gibi süreçleri optimize ederek verimliliği artırmakta ve sürdürülebilir tarımı desteklemektedir.

Bu çalışma, tarımsal insansız kara araçları (TİKA) alanında önemli bir yenilik sunmaktadır. İlk olarak, engebeli ve yüksek kaya yoğunluğuna sahip arazilerde toprak işleme zorluklarını aşmak için elektro-hidrolik kontrollü pulluk sistemi ile entegre edilmiş bir otonom çözüm önerisi sunulmuştur. Bu sayede, toprak havalandırma ve işleme süreçlerinde insan gücü eksikliğinden kaynaklanan sorunlar ortadan kaldırılmakta ve arazinin daha verimli işlenmesi sağlanmaktadır.

Çalışma, GPS tabanlı topografik haritalama ve hidrolik adaptasyon mekanizmalarının entegrasyonu ile topografik analiz ve dinamik ayar sistemlerinin birlikte kullanılmasını literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak ele almıştır. Bu, arazi eğim verilerinin analiz edilmesi ve tekerlek yüksekliklerinin dinamik olarak ayarlanması için kullanılan yenilikçi bir yaklaşımdır. Ayrıca, sekiz parçalı bıçaklı sürme modülü ve lineer hareket kabiliyeti ile toprak işleme süreçlerinin yüksek verimlilikle gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Bu araştırma, insansız kara araçlarının tarımsal uygulamalarda etkinliğini artırmak amacıyla literatüre katkı sağlayan, yenilikçi sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve dinamik analizi üzerine odaklanmaktadır. Simülasyon ortamında doğrulanan performans değerlendirmeleri, sistemin gerçek saha uygulamalarında etkinliğini ve potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir tarım uygulamaları için insansız kara araçlarının kullanım potansiyelini önemli ölçüde artırmaktadır. Böylece, bu araştırma, tarımsal İKA'ların gelecekteki kullanımı için önemli bir model oluşturmakta ve literatürdeki boşlukları doldurmayı hedeflemektedir.

## 1. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, tarımsal insansız kara aracının tasarımı ve simülasyonu için çeşitli materyaller ve yöntemler kullanılmıştır. Aşağıda, kullanılan başlıca materyaller, araçlar ve simülasyon süreçleri detaylandırılmaktadır.

- 1. Araç Tasarımı:** Tarımsal insansız kara aracının tasarımında, GPS sistemi ve hidrolik ayarlamalar gibi modern teknolojiler kullanılacaktır. Araç, engebeli ve kaya yoğunluğu fazla arazilerde tarım işlemlerini kolaylaştırmak amacıyla sekiz parçalı bıçaklı bir sürme modülü ile donatılmıştır. Sürme modülünün amacı, arazinin eğimine uygun olarak toprağı işlemek ve işleme verimliliğini artırmaktır.
- 2. Matematiksel Modelleme:** Araç için matematiksel modelleme yapılmıştır. Modelleme, aracın dinamik hareketlerini, tekerleklerdeki hidrolik ayarlamaları ve sürme modülünün çalışma prensibini içermektedir. Bu model, simülasyonun doğruluğunu sağlamak için gereklidir ve aracın farklı arazi koşullarında nasıl performans göstereceğini analiz etmeyi amaçlamaktadır.
- 3. Dinamik Analiz ve Simülasyon:** Araç ve modülün dinamik analizi yapılmış olup, bu analizlerin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla simülasyon ortamı kullanılmıştır. Simülasyon, **Ubuntu** işletim sistemi üzerinde yapılması planlanan yazılım platformu ile gerçekleştirilecektir. Bu platformda, aracın arazi üzerindeki hareketleri, GPS tabanlı haritalama, hidrolik sistemin kontrolü ve sürme modülünün işlevselliği simüle edilecektir. Simülasyon, araç ve modülün engebeli arazilerde toprak sürme işlemini başarıyla gerçekleştirebilmesi için gerekli parametreleri belirleyecektir.
- 4. GPS ve Haritalama Sistemi:** Araç, arazinin haritalanmasını sağlamak için GPS teknolojisinden yararlanacaktır. GPS, aracın doğru konumunu belirleyerek, arazinin topografyasına göre işlem yapılacak bölgeleri tespit edecektir. Bu sayede, aracın hareketleri ve işleme alanı dinamik olarak güncellenebilecektir.
- 5. Hidrolik Sistem ve Tekerlek Ayarlamaları:** Araç, eğimli arazilerde düzgün hareket edebilmek için tekerleklerinde hidrolik sistemler kullanacaktır. Bu sistemler, aracın her bir tekerleğinin eğime bağlı olarak bağımsız bir şekilde ayarlanmasını sağlayarak, aracın stabilitesini ve verimliliğini artıracaktır.
- 6. Simülasyon Ortamı ve Yazılım:** Araç ve modülün simülasyonu, **Ubuntu** işletim sistemi üzerinde geliştirilen bir yazılım ile yapılacaktır. Bu yazılım, araç hareketlerini, GPS verilerini, hidrolik ayarları ve sürme modülünün etkileşimini birleştiren bir simülasyon ortamı sağlayacaktır. Ayrıca, simülasyon verileri toplanarak aracın performansı analiz edilecek ve farklı parametrelerin etkisi değerlendirilecektir.

## 2.1 Toprak İşleme Yöntemleri ve TİKA'nın Rolü

Günümüzde tarımda kullanılan toprak işleme makineleri, bitkisel üretimin ilk aşamasını oluşturan toprak işleme işlemini gerçekleştirirken, ekolojik dengeyi gözeterek yapılan mekanizasyon işlemleri arasında yer almaktadır. Bu süreçte, toprağın aşırı şekilde toz haline getirilmeden işlenmesi büyük önem taşır (**Öztekin, 2025**)

Toprak işlemenin temel amaçlarını şu şekilde özetlemek mümkündür: Toprağın fiziksel özelliklerinin optimize edilerek, önceki gübreleme işleminden kalan organik atıkların toprakla karıştırılması, yabancı otların kontrol altına alınması, ekime uygun tohum yatağının hazırlanması ve böylece sağlıklı bir toprak ortamının oluşturulması. Ayrıca, toprağın havalandırılması sayesinde toprak yapısının iyileştirilmesi ve verimliliğin artırılması hedeflenmektedir.

## 2.2. Toprak Fiziksel Özelliklerinin En Uygun Hale Getirilmesi

Toprağa uygulanan herhangi bir mekanik işlem sonucunda, dört farklı olasılık izlenebilir:

1. Katı parçacıkların durumu
2. Gözeneklerde bulunan gazların faz değişimi
3. Gözenekte bulunan gaz ve sıvıların değişimi
4. Topraktaki elementlerin yeniden düzenlenmesi

Toprağın belirli bir andaki fiziksel durumu, boşluk oranı (porozite), hacimsel kütle, hacimsel ağırlık ve nem içeriği gibi temel özelliklerle tanımlanabilir. Bu özellikler, toprak yapısının ve fiziksel davranışlarının anlaşılmasında önemli bir rol oynar. Kütle ve hacimle ilgili temel özellikler şu formüllerle ifade edilebilir:

1. **Porozite (Boşluk Oranı):** Topraktaki boşluk hacminin, toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Formülü şu şekilde yazılabilir:

$$\phi = \frac{V_{\text{boşluk}}}{V_{\text{toplam}}} \quad (1)$$

Denklem 1'de  $V_{\text{boşluk}}$  boşluk hacmi,  $V_{\text{toplam}}$  ise toplam hacmi ifade eder.

**2. Hacimsel Kütle (Bulk Density):** Toprağın toplam kütesinin, toplam hacmine oranıdır. Hacimsel kütle şu formülle hesaplanır:

$$\rho_b = \frac{M_{toprak}}{V_{toplam}} \quad (2)$$

Denklem 2’de  $M_{toprak}$  toprak örneğinin kütlesi,  $V_{toplam}$  ise toplam hacmindir.

**3. Hacimsel Ağırlık:** Hacimsel kütle ile aynı anlamı taşır, ancak genellikle kilogram yerine gram cinsinden ifade edilir. Formülü şu şekildedir:

$$\gamma_b = \rho_b \cdot g \quad (3)$$

Denklem 3’te  $\gamma_b$  hacimsel ağırlık,  $\rho_b$  hacimsel kütle ve  $g$  yerçekimi ivmesidir.

**4. Nem İçeriği (Volumetrik Nem İçeriği):** Toprağın içeriğinde bulunan su miktarını ifade eder ve genellikle şu şekilde hesaplanır:

$$\theta = \frac{V_{su}}{V_{toplam}} \quad (4)$$

Denklem 4’te  $V_{su}$  topraktaki su hacmi,  $V_{toplam}$  ise toplam hacmi ifade eder.

Bu formüller, toprak işleme süreçlerinin etkinliğini değerlendirmek ve toprağın fiziksel özelliklerinin optimize edilmesini sağlamak için kullanılabilir (SSSA, 2014).

## 2.2. Zemin Mekanikinde Temel Tanımlar

### 1. Boşluk Oranı (e)

Boşluk oranı, zemindeki boşluk hacminin ( $V_s$ ) katı hacme ( $V_m$ ) oranı olarak ifade edilir ve Denklem 5’teki bağıntı ile tanımlanmaktadır (Das, 2013).

$$e = \frac{V_s}{V_m} \quad (5)$$

## 2. Porozite ( $k$ )

Porozite, boşluk hacminin ( $V_s$ ) toplam hacme ( $V$ ) oranıdır ve Denklem 6'da olduğu gibi ifade edilmektedir (Holtz et al., 2011).

$$k = \frac{V_s}{V} \quad (6)$$

## 3. Boşluk Oranı ve Porozite Arasındaki İlişki

Boşluk oranı ile porozite arasındaki matematiksel ilişkisi Denklem 7'de olduğu gibi ifade edilmektedir (Budhu, 2015).

$$e = \frac{k}{1-k} \quad (7)$$

## 4. Hacimsel Kütle ( $\rho$ )

Hacimsel kütle, zeminin toplam kütesinin ( $m$ ) toplam hacme ( $V$ ) oranıdır. Denklem 8'de bu oran verilmektedir (Craig, 2004).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

## 5. Hacimsel Ağırlık ( $\gamma$ )

Hacimsel ağırlık, zeminin toplam ağırlığının ( $W$ ) toplam hacme ( $V$ ) oranı olarak tanımlanır ve Denklem 9'da olduğu gibi ifade edilmektedir (Terzaghi et al., 1996).

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} \quad (9)$$

## 6. Kuru Baza Göre Nem İçeriği ( $w, \%$ )

Zemindeki suyun kütesinin ( $m_w$ ) kuru zemin kütesine ( $m_s$ ) oranı olarak tanımlanır ve yüzde cinsinden ifadesi Denklem 10'da verilmektedir (Lambe & Whitman, 1969).

$$\omega = \left( \frac{m_w}{m_s} \right) * 100 \quad (10)$$

Zemin mühendisliği açısından bu fiziksel parametreler, zeminin mekanik davranışını doğrudan etkileyen adezyon, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve penetrasyon direnci gibi önemli mühendislik özellikleri ile ilişkilidir (Mitchell & Soga, 2005; TMMOB ZMO 2020). Toprak işleme yöntemleri açısından ideal toprak yoğunluğu ve boşluk hacmi, zeminin tane dağılımı, mineralojik yapısı ve nem içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu bağlamda, ideal hacim ağırlığı ve boşluk hacmine ilişkin veriler Tablo 1'de verilmektedir (Bowles, 1996; Doğan, 2005).

**Tablo 1.** Farklı toprak türlerine göre hacim ağırlığı ve boşluk hacmi

Toprak Türü	Hacim Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	Boşluk Hacmi (% Hacimsel)
Kumlu	1.60	40
Tınlı	1.45	45
Killi	1.20	47

Tablo 1'de, farklı toprak bünyelerinin hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) ve boşluk hacmi ( $e$ ) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kumlu topraklar daha yüksek hacim ağırlığına sahipken, killi topraklar daha fazla boşluk hacmine sahiptir. Bu farklılıklar, toprakların su tutma kapasitesi, drenaj özellikleri ve mühendislik davranışları üzerinde önemli etkilere sahiptir (Das, 2013; Holtz et al., 2011).

Toprağın fiziksel ve mekanik özellikleri, uygun toprak işleme yöntemlerinin belirlenmesine olanak tanır. Günümüzde toprak işleme işlemleri ağırlıklı olarak traktörler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Arkadan tahrikli traktörler dikkate alındığında, çeki kuvvetinin yatay doğrultuda olduğu ve traktörün orta eksenine etki ettiği, ayrıca düşey toprak reaksiyonlarının aks eksenlerinden geçtiği varsayılmaktadır (Yıldırım, 2019; Uzun, 2009).

Traktör üzerinde etki eden kuvvetler, statik, dinamik ve eğimli arazi koşulları olmak üzere üç farklı durumda değerlendirilir (Kara & Demir, 2021; Savaşır, 2013).

## 1. Statik Durumda Traktör Üzerine Etki Eden Kuvvetler

Statik analiz, durağan cisimler üzerindeki kuvvetlerin dengesiyle ilgilenen bir mekanik dalıdır. Traktör sabit hızda hareket ettiğinde veya durduğunda, ivme sıfır kabul edilir ve bu durumda traktörün geliştirdiği net kuvvet sıfırdır.

### Traktörde Ağırlık ve Kuvvet Dağılımı

Bir traktörün toplam ağırlığı ( $G$ ), ön ve arka tekerleklerde oluşan düşey toprak reaksiyonlarının toplamına eşittir. C noktasına göre moment denklemi Denklem 11 ile ifade edilmektedir.

$$G.b = G_{s\bar{o}}.a \quad (11)$$

Denklem 11’de, ön tekerleklerde oluşan düşey toprak reaksiyonu ( $G_{s\bar{o}}$ ) aşağıdaki Denklem 12 ile hesaplanabilir.

$$G_{s\bar{o}} = \frac{G.b}{a} \quad (12)$$

Benzer şekilde, B noktasına göre moment denklemi Denklem 13 ile hesaplanmaktadır.

$$G.c = G_{sa}.a \quad (13)$$

Denklem 13’te, arka tekerleklerde oluşan düşey toprak reaksiyonu ( $G_{sa}$ ) Denklem 14 ile hesaplanır.

$$G_{sa} = \frac{G.c}{a} \quad (14)$$

Denklem 11-14’te  $G$  traktörün toplam ağırlığı ( $N$ ),  $G_{s\bar{o}}$  durağan halde ön tekerleklerde oluşan düşey toprak reaksiyonu ( $N$ ),  $G_{sa}$  durağan halde arka tekerleklerde oluşan düşey toprak reaksiyonu ( $N$ ),  $a$  arka ve ön akslar arasındaki mesafe (m),  $b$  ağırlık merkezinin ön aksa olan yatay uzaklığı (m),  $c$  ağırlık merkezinin arka aksa olan yatay uzaklığı (m),  $y$  ağırlık merkezinin toprak seviyesine olan düşey mesafesi (m)

Bu analiz, traktörün denge koşullarını belirlemek ve optimum ağırlık dağılımını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Ağırlık merkezinin konumu ve traktörün farklı yüklenme durumlarındaki davranışı hem çekiş performansını hem de stabiliteyi doğrudan etkilemektedir (Kara & Demir, 2021; Yıldırım, 2019).

## 2. Dinamik Durumda Traktör Üzerinde Etki Eden Kuvvetler

Dinamik analiz, traktörün çekiş performansını, yol tutuşunu ve tarladaki manevra kabiliyetini belirlemek açısından büyük öneme sahiptir. Bu değerlendirmeler, traktör tasarımında ve uygun işletme koşullarının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır (Kara & Demir, 2021; Yıldırım, 2019).

### Dinamik Durumda Traktör Üzerinde Etki Eden Kuvvetler ve Eşitlik Dengesi

Çalışan bir motordan elde edilen moment, traktörün tekerleklerinde bir çevre kuvveti oluşturarak traktörün hareketini sağlar. İşletici kuvvet, çevre kuvvetine karşılık gelen ve topraktan uygulanan tepki kuvveti olarak tanımlanır. Özellikle arka tekerleğe gelen yük, toprağa saplanmayı sağlarken, sürtünme ile oluşan tutunma kuvveti, traktörün ileri hareketini sağlar ve aynı zamanda römork ya da pulluk gibi ekipmanların çekilmesine olanak tanır (Kara & Demir, 2021; Yıldırım, 2019).

## 3. Traktörlerde Çeki Kuvveti ve Güç Gereksinimi

Toprak işleme sırasında traktörlerin ihtiyaç duyduğu güç gereksinimi, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişir. Bu faktörler arasında toprak kesilme direnci, pulluğun iş genişliği, iş derinliği, gövde sayısı, gövde şekli, toprak cinsi ve ilerleme hızı yer almaktadır. Çeki kuvveti, Denklem 15'teki formül ile hesaplanabilir.

$$F_p = a_p \cdot b_p \cdot n_p \cdot k_o \cdot V' \quad (15)$$

Denklem 15'te,  $F_p$  Pulluk çeki kuvveti (daN),  $V'$  Pulluğun ilerleme hızı (km/h),  $b_p$  Bir gövdenin iş genişliği (dm),  $a_p$  İş derinliği (dm),  $n_p$  Pulluk gövde sayısı,  $k_o$  Özgül toprak direnci (N/dm<sup>2</sup>) ifade etmektedir.

### Traktörlerde Patinaj ve Tutunma Kuvveti

Patinaj, traktör tekerleklerinin her bir devirde alması gereken yolun, aldığı yol kadar olmaması durumudur. Arazi koşullarında %15 - 25 arasında bir patinaj değeri normal kabul edilir. Patinajın azaltılması için çeşitli yöntemler bulunmaktadır:

1. Ek ağırlıklar takılması
2. Lastiklerin su ile doldurulması
3. Asma aletlerin kullanılması

4. Dayanma yükleri (örneğin dingilli tarım arabası)
5. Hidrolik yardım kullanılması

#### **Tutunma katsayısının artırılması için ise:**

1. Uygun yürüme organı seçimi (tırtıl, paletli zincir vb.)
2. Lastik seçimi (ölçü, profil, diagonal/radyal yapı)
3. Tüm tekerleklerin tahriki

Uygun olmayan zemin koşullarında ise dört tekerlekten çekişli traktörler tercih edilmelidir (Acar, Güner, & Öztürk, 2011).

#### **Engelli ve Eğimli Arazide Traktör Üzerine Etki Eden Kuvvetler**

Engelli ve eğimli arazilerde traktör üzerine etki eden kuvvetler, arazinin eğimi ve engel durumu gibi faktörlere göre değişkenlik gösterir. Engellemeli ve eğimli arazilerde traktörlerin çekiş performansı üzerinde büyük etkiler olabilir (Savaşır, 2013).

#### **2.4. Elektro-Hidrolik Çeki Kontrol Sistemi**

Elektro-hidrolik çeki kontrol sisteminin temel işleyişi, traktörün güvenliğini sağlamak ve toprak işleme ekipmanlarının etkili bir şekilde çalışmasını mümkün kılmak amacıyla önemli bir rol oynamaktadır (Yıldırım & Demir, 2020). Traktörün hareketini etkileyen kuvvetler incelendiğinde, yatay bileşen  $F_b$ , traktörü arkaya doğru devirmeye çalışırken, toprak yüzeyine dik olan normal kuvvet  $N$ , traktörü toprağa saptırmaya çalışmaktadır (Kara & Güner, 2018). Bu kuvvetler Denklem 16'daki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} F_b &= G \cdot \sin(\alpha) \\ N &= G \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

Denklem 16'da,  $\alpha$  eğim açısını temsil eder ve eğimin türevine eşittir (Yıldırım & Demir, 2020).

$$\tan(\alpha) \geq \frac{b}{y} \quad (17)$$

Denklem 16'da  $a$  Traktörün ön ve arka aks aralığı (m),  $b$  Traktörün ağırlık merkezinin arka aksa olan uzaklığı (m),  $y$  Traktör ağırlık merkezinin yerden yüksekliği (m). Traktörün devrilmemesi için,  $y$  değerinin kü-

çekme ve  $b$  değerinin büyük olması gerektiği belirtilmektedir (Kara & Güner, 2018). Ayrıca, çeki kuvvetinin ayarlanabilir olmasıyla birlikte, elektro-hidrolik sistemler aracılığıyla pulluk ve römorklara verilecek çeki kuvveti, dinamik olarak ayarlanabilir hale gelmektedir (Yıldırım & Demir, 2020). Bu sistemin ana bileşenleri: Yük pimi, Oransal selenoidler tarafından kontrol edilen kontrol valfleri, Konum sensörü, Reaksiyon mesnedi, diğer mekanik alt parçalar

Çeki kuvvetinin ayarlanabilir olmasıyla, elektro-hidrolik sistemler aracılığıyla pulluk ve römorklara verilecek çeki kuvvetinin ayarlanabilir sisteme dönüşümü incelenmektedir. Bu çeki sistemi, elektro-hidrolik kaldırıcılarının ana bileşenleri arasında yer alan yük pimi, oransal selenoidler tarafından kontrol edilen kontrol valfleri, konum sensörü, reaksiyon mesnedi ve diğer mekanik alt parçalarla birlikte çalışmaktadır (Kara & Güner, 2018; Uymaz & Uymaz, 2024). Ayrıca, önerilen tasarım, elektro-hidrolik kaldırıcı üzerinde çalışarak tasarımı basitleştirmeyi ve maliyeti düşürmeyi amaçlamaktadır (Yıldırım & Demir, 2020).

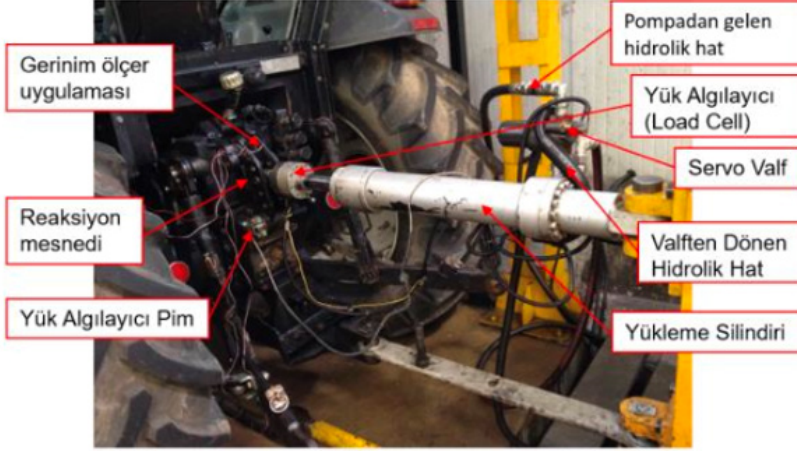
Reaksiyon mesnedi, arazide topraktan gelen çeki kuvvetlerine maruz kalan mekanik-hidrolik ve elektro-hidrolik kaldırıcıların en önemli parçasıdır. Çeki algılama yönteminden bağımsız olarak, çeki kontrol sisteminin verimli çalışmasını sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır (Kara & Demir, 2021). Reaksiyon mesnedinin malzemesi, GGG50—küresel grafitli dökme demir olarak tanımlanmış ve bu malzeme kullanılarak oksidasyon ve korozyon riski azaltılmıştır (Yıldırım & Demir, 2020). Ayrıca, kullanılan hidrolik kaldırıcılarda reaksiyon mesnedi, hidrolik kaldırıcı gövdesine sabit tutan pimler aracılığıyla sabit kinematik çift olarak tanımlanmıştır. Bu pimler ile reaksiyon mesnedi arasındaki sürtünme ihmal edilmiş, sürtünmesiz olduğu kabul edilmiştir (Kara & Güner, 2018).

## 2.5. Elektro-Hidrolik Kaldırıcı Sistemlerinde Çeki Kuvveti Algılama ve Gerinim Analizi

Elektro-hidrolik kaldırıcılar, tarımsal mekanizasyon sistemlerinde önemli bir yer tutmakta olup, alt bağlantı kollarının uçlarında 4.400 kg kaldırma kapasitesine sahiptir. Şekil 1’de verilen fikstür üzerine monte edilen sistemin çalışma sırasında, reaksiyon mesnedine bağlı orta kola etki eden maksimum çeki kuvveti 2.500 kg olarak ölçülmüştür. Bu sistem, Valtra A serisi traktöre ait olup, üzerinde bulunan yük pimlerinin algılayabildiği en yüksek çeki kuvveti 25 kN olarak belirlenmiştir (Kara & Güner, 2018; Yıldırım & Demir, 2020; Uymaz & Uymaz, 2024).

Bu çalışmada, elektro-hidrolik kaldırıcı sistemlerinde çeki kuvveti algılama mekanizmalarının performansını değerlendirmek amacıyla gerinim analizi (strain analysis) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular,

elektro-hidrolik kaldırıcı sistemlerinin optimizasyonuna yönelik tasarım parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda yapılan analizler, çeki kuvveti algılama sistemlerinin hassasiyetini artırmak ve mekanik dayanımı optimize etmek açısından önemli veriler sunmaktadır.



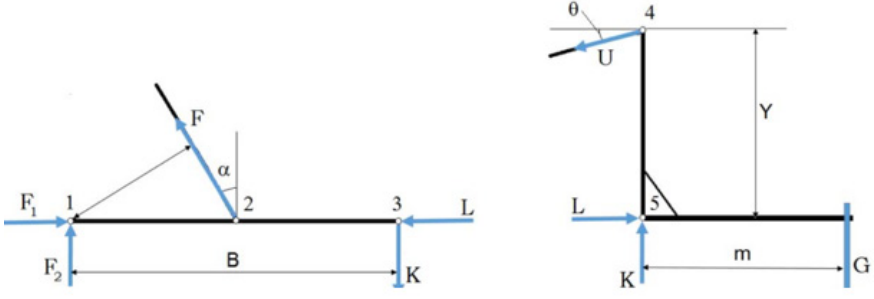
Şekil 1. Alt bağlantı sisteminin gösterimi (Uymaz & Uymaz, 2024).

Şekil 1’de alt bağlantı sisteminin gösterimi, elektro-hidrolik kaldırıcı ile bağlantılı olan bileşenlerin yerleşimini ve çeki kuvvetine maruz kalan elemanları detaylı olarak sunmaktadır (Kara & Güner, 2018).

Kaldırma mekanizmasının geleneksel modelleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Aletlerin traktöre bağlanması ve çözülmesi
2. Aletlerin kaldırılıp indirilmesi
3. Çeki gücünün aktarılması
4. Aletlerin düşey ve yatay yönde kullanılabilmesi (Kara & Güner, 2018; Keçecioğlu & Gülsoylu, 2003).

Kinematik sistemlerde üç nokta asma sistemi yapısı, Şekil 2’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu sistemi, tarımsal insansız kara aracına entegre ederken, traktörlerde mevcut olan bu yapıyı kullanılmaktadır. Traktörlerde aletlerin traktöre bağlanması ve çözülmesi işlemleri, insansız kara aracında da benzer şekilde uygulanmıştır.



Şekil 2. Üç nokta askı düzeninin kuvvetleri ve kinematik yapısının gösterimi  
(Keçecioglu & Gülsoylu, 2003)

Şekil 2’de üç nokta askı düzeninin kuvvetleri ve kinematik yapısının gösterimi, sistemin kuvvet ve moment dengelerini detaylı bir şekilde açıklamaktadır (Kara & Güner, 2018). Kaldırma Kuvvetleri ve Moment Eşitlikleri denklemi Denklem 18’de verilmektedir.

$$G + U \cdot \sin(\alpha) = K \quad (18)$$

Denklem 18’de  $G$  Kaldırılacak yük,  $U$  Üst bağlantı kolundaki kuvvet,  $\alpha$  Üst bağlantı kolunun yatayla yaptığı açı,  $K$  Alt bağlantı noktalarında kolların ucunda ölçülen kaldırma kuvveti ifade etmektedir.

#### Moment Eşitlikleri:

5 numaralı noktaya göre moment alındığında:

$$Y \cdot U \cdot \cos(\alpha) = G \cdot M \quad (19)$$

1 numaralı noktaya göre moment alındığında Denklem 20 elde edilir.

$$F \cdot X = K \cdot B \quad (20)$$

Denklem 20’de  $F$  Kaldırma çubuğundaki kuvvet,  $X$  Kaldırma çubuğunun alt bağlantı noktasına olan dikey uzaklık,  $B$  Alt bağlantı kolu uzunluğu.

#### İndirgenmiş kuvvet ve moment ilişkisi Denklem 21’de verilmektedir.

$$G = \frac{F \cdot X}{B} \left( 1 + \frac{M \cdot \tan(\alpha)}{\gamma} \right) \quad (21)$$

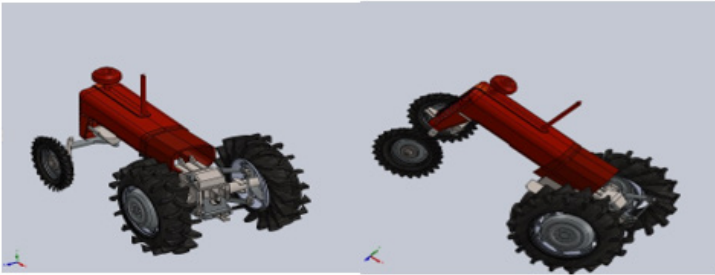
Bu sistemde, traktör üzerindeki kuvvetler incelenmiş olup, traktörün kendinden oluşan kuvvetlerin yanı sıra pulluklara bağlı olarak oluşacak çeki kuvvetleri de dikkate alınmıştır. Bu kuvvetlerin, tarımsal insansız kara aracına entegre edilmesiyle sistemin dönüşümü sağlanacaktır. Kullanılacak hidrolik sistem sayesinde, parametreler dikkate alınarak sistemin parçaları üretilecek ve sistem bütün olarak değerlendirilecektir (Kara & Güner, 2018)

### 3. GERÇEKLEŞTİRİLEN MODELLEME, SIMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 3.1. Tarımsal İnsansız Kara Araçlarının Mekanik ve Elektronik Tasarımı

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında modellenen aracın dış gövde yapısı, günümüz konvansiyonel traktörlerine benzer şekilde tasarlanmıştır ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında modellenen sistem şeması Şekil 3'te verilmektedir. Bu yapı sayesinde, gerçekleştirilen statik ve dinamik analizler ile tarımsal faaliyetler sırasında oluşabilecek yük koşulları karşılanmaktadır. Toprak işleme ve tarımsal üretimde kullanılan insansız kara araçlarının etkinliği, toprak yapısının fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, tarımsal insansız kara araçlarına entegre edilen pulluk mekanizması aracılığıyla toprağın sürülmesi sağlanarak havalandırma ve verimlilik artırılmaktadır.

Araç, engebeli ve taş yoğunluğu yüksek arazilerde optimum performans gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, dört tekerlekten çekiş (4×4) prensibinden esinlenerek yay destekli süspansiyon sistemi kullanılmıştır. Her bir tekerleğe entegre edilen 200 W gücündeki elektrik motorları, elektronik hız kontrolcüsü (Electronic Speed Controller, ESC) ile tork ve hız optimizasyonu sağlanarak kontrol edilmektedir.



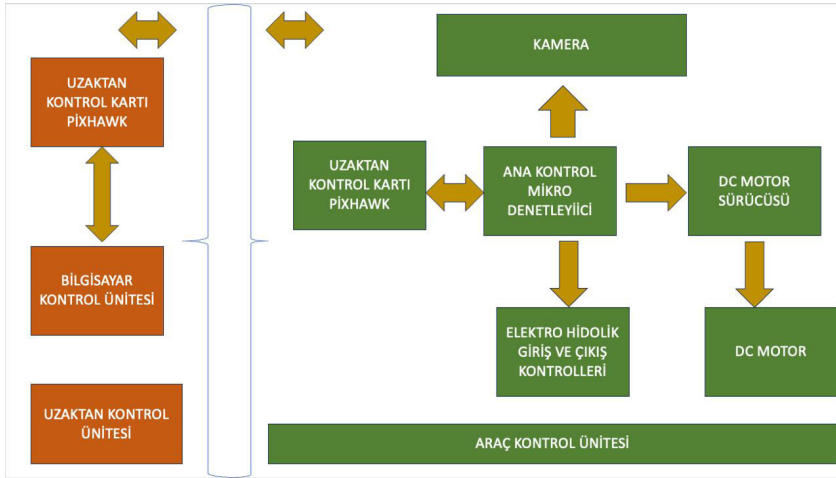
Şekil 3. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında modellenen sistem şeması

Otonom hareket kabiliyeti ve uzaktan kumanda işlevleri, 168 MHz işlem hızına sahip Pixhawk kontrol kartı ile sağlanmaktadır (ArduPilot, 2025). Bu kontrol kartı içerisinde GPS, ataletsel ölçüm birimi (IMU), jiroskop, barometre ve pusula gibi sensörler bulunmaktadır. Otonom hareket algoritmalarının işlenmesi ve karar mekanizmasının yönetimi, Nvidia Jetson Nano kartı tarafından gerçekleştirilen kart kullanılabilir (Nvidia, 2025). Jetson Nano, motor sürücülerini ile haberleşerek hareket kontrolünü sağlarken, uzaktan kumanda komutları Pixhawk kartı üzerinden işlenmektedir.

Görüntü işleme ve hareket analizi için 2.1 GHz işlemci frekansına ve 4 GB RAM kapasitesine sahip Jetson Nano kullanılabilir. Derinlik algılama ve çevresel analiz için Intel RealSense D435i kamera entegre edilmiştir. Bu kamera, 28 mm derinlik algılama kapasitesine ve 30 FPS yenileme hızına sahiptir (Intel, 2025). Ek olarak, 1080p/30 FPS çözünürlükte ve 78° görüş açısına sahip Logitech G920 Pro kamera, çevresel görüntülerin işlenmesi amacıyla sisteme dahil edilmiştir (Logitech, 2015). Şekil 4'te, sistem bileşenlerinin otonom hareket kabiliyetleri ve uzaktan kumanda işlevlerine yönelik olarak kullanılacak malzemeler detaylı şekilde sunulmuştur. Şekil 5 de mekanik iç aksam akış diyagramı verilmiştir.



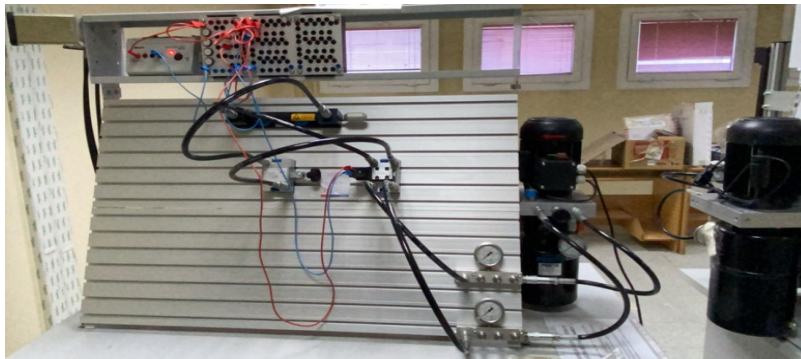
**Şekil 4.** Sistem bileşenlerinin otonom hareket kabiliyetleri ve uzaktan kumanda işlevlerine yönelik olarak kullanılacak malzemeler



Şekil 5. Sistem bileşenlerinin otonom hareket kabiliyetleri ve uzaktan kumanda işlevlerine yönelik mekanik iç aksam akış diyagramı

### 3.2. Hidrolik Sistem Tasarımı ve Elektro-Hidrolik Entegrasyonunun Deneysel Analizi

Hidrolik sistem tasarımı, Laboratuvarı'nda piston hareketleri üzerinden dinamik simüle edilerek test edilmiştir. Şekil 6'da, piston ile gerçekleştirilen simülasyon deney ortamı gösterimi verilmiştir. Bu deney kapsamında, basınç kontrol valfi kullanılarak pistonun ileri-geri hareketi sağlanmış ve çıkış tank hattına bağlanarak sistemin elektrik bağlantısı kurulmuştur. Böylece, piston hareketleri üzerinden sistemin çalışma prensibi detaylı bir şekilde test edilmiştir.



Şekil 6. Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen piston hareketlerinin dinamik simülasyonu

### 3.3. Elektro-Hidrolik Entegrasyon ile Tasarlanan Pulluk Sisteminin Model Analizi

Şekil 7’de gösterildiği üzere, pulluk sistemi elektro-hidrolik bir mekanizma ile entegre edilmiştir. Bu entegrasyon sayesinde, yüksek kuvvetlerin aktarımı optimize edilerek kuvvet koluna etki eden yük azaltılmış ve sistemin verimliliği artırılmıştır. Böylece, istenilen güç seviyesine ulaşmak için minimum seviyede bir hareket yeterli hale getirilmiştir. Deneysel analiz kapsamında, çift etkili hidrolik silindir, tank hattına bağlı bir elektrik sürücü aracılığıyla kontrol edilmiştir. Basınç kontrol valfi kullanılarak piston hareketleri simüle edilmiş, bu sayede sistemin dinamik tepkisi ve enerji verimliliği detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler, sistem tasarım sürecinde değerlendirilmiş ve hidrolik bileşenlerin entegrasyonu ile genel sistem verimliliği artırılmıştır. Böylece, sistemin gerçek çalışma koşullarındaki performansı kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiş ve tasarımın işlevselliği optimize edilmiştir.



Şekil 7. Elektro-Hidrolik sistem entegrasyonu ile tasarlanan pulluk sisteminin model görseli

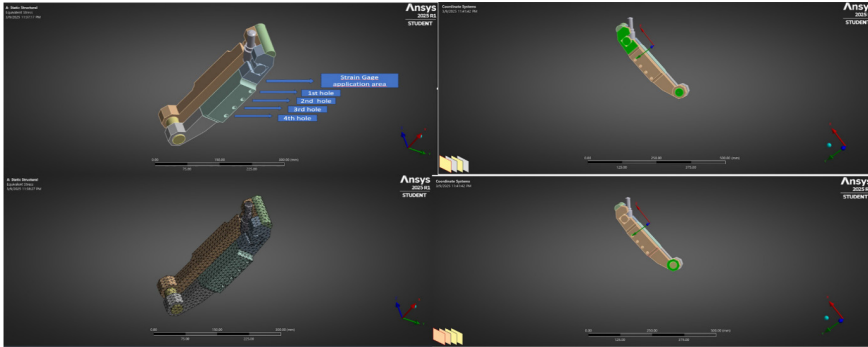
### 3.4. Çeki Kuvvetinin Ayarlanabilir Hale Getirilmesine Yönelik Elektro-Hidrolik Sistem Tasarımı ve Analizi

Çeki kuvvetinin ayarlanabilir hale getirilmesi amacıyla, pulluk ve römorklara entegre edilebilecek elektro-hidrolik sistemler üzerine kapsamlı bir inceleme gerçekleştirilmektedir. Bu sistemin temel bileşenleri arasında yük pimi, oransal selenoidler tarafından kontrol edilen kontrol valfleri, konum sensörü, reaksiyon mesnedi ve diğer mekanik alt parçalar yer almaktadır.

Önerilen tasarım, elektro-hidrolik kaldıracının yapısını optimize ederek sistemin daha basit ve düşük maliyetli hale getirilmesini amaçlamaktadır. Reaksiyon mesnedi, araziden gelen çeki kuvvetlerine maruz kalan ve hem mekanik-hidrolik hem de elektro-hidrolik kaldıracı sistemlerinde kullanılan çeki kontrol mekanizmasının kritik bir bileşeni olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, reaksiyon mesnedinin üç boyutlu (3D) modeli sonlu elemanlar analizi (FEA) ile incelenmiştir. Malzeme olarak dökme karbon çeliği (Cast Carbon Steel) tercih edilmiş, bu sayede oksidasyon ve korozyon direnci artırılmıştır. Hidrolik kaldıracılarda reaksiyon mesnedinin gövdeye sabitlenmesini sağlayan pimler, analizlerde sabit kinematik çift olarak tanımlanmış ve pim ile reaksiyon mesnedi arasındaki sürtünme ihmal edilerek sistemin sürtünmesiz olduğu kabul edilmiştir.

Bu çerçevede gerçekleştirilen analizler, çeki kontrol sisteminin daha verimli ve dayanıklı hale getirilmesine yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Şekil 8’de reaksiyon mesnedi üzerine yapılan ANSYS analizi detaylandırılmış olup, ilgili bileşenler verilmiştir. Bu kapsamda elde edilen analiz sonuçları, elektro-hidrolik sistemin dayanıklılığını ve performansını artırmaya yönelik kritik veriler sağlamaktadır.

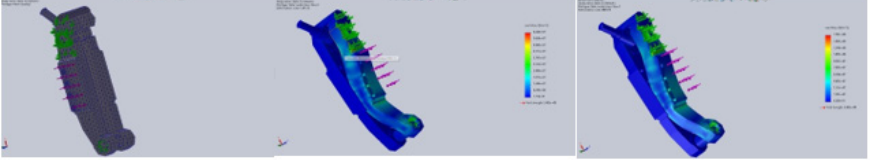


**Şekil 8.** Reaksiyon mesnedi üzerine yapılan ANSYS analizi detaylandırılmıştır. Bu kapsamda, (a) CAD ortamında oluşturulan reaksiyon mesnedi modeli, (b) sabit mesnet (Fixed Support) olarak tanımlanan pimlerin gösterimi, (c) meshleme aşamasında pimin ağ yapısındaki gösterimi ve (d) pimler ile sürtünme etkisinin ihmal edildiği bölge (alt bağlantı noktası)

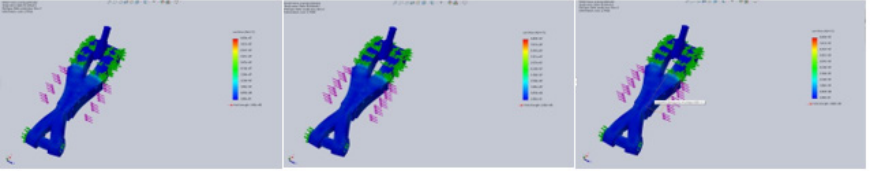
### 3.5. Pim Bağlantılarında Farklı Yük Koşulları Altında Gerilme Dağılımının SolidWorks ve ANSYS ile Analizi

Şekil 9 ve Şekil 10’da sunulan analiz sonuçları, pim bağlantılarında farklı yük koşulları altında oluşan gerilme dağılımını göstermektedir. Şekil 9, SolidWorks analizleri kapsamında gerçekleştirilen mesh atamasını (a)

ve 10 kN (b) ile 25 kN (c) yükleri altında etki altında kalan bölgeleri detaylandırmaktadır. Şekil 10'da ise farklı yük seviyelerinde etki alanlarını karşılaştırmalı olarak sunmakta olup, 5 kN (a), 10 kN (b) ve 25 kN (c) kuvvetleri altında iki bölgede meydana gelen gerilme dağılımını göstermektedir.



Şekil 9. SolidWorks analiz sonuçları: (a) Mesh ataması, (b) 10 kN yük altında etkiyen bölge, (c) 25 kN yük altında etkiyen bölge



Şekil 10. SolidWorks analiz sonuçları: (a) 5 kN yük altında iki bölgede etki alanı, (b) 10 kN yük altında iki bölgede etki alanı, (c) 25 kN yük altında iki bölgede etki alanı

SolidWorks ve ANSYS yazılımlarında ayrı ayrı gerçekleştirilen bu analizlerde, malzeme olarak dökme karbon çeliği (Cast Carbon Steel) kullanılmış ve pimler sabit mesnet (fixed support) olarak modellenmiştir. Pim ile alt bağlantı noktası arasındaki sürtünme ihmal edilerek gerçekleştirilen yükleme senaryolarında 5 kN, 10 kN ve 25 kN kuvvetler sırasıyla pime uygulanmıştır. Şekil 9'da başlangıçta tek yüzey üzerinde yapılan analizler gösterilirken, Şekil 10'da ise bu çalışmanın iki yüzey arasında gerçekleştirilen versiyonu sunulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, 2. ve 3. delik bölgeleri üzerinde analiz gerçekleştirilmiş ve en yüksek hasarın 3. delikte meydana geldiği belirlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tarımsal insansız kara araçlarında (TİKA) elektro-hidrolik pulluk sisteminin tasarımı, matematiksel modellenmesi, dinamik analizi ve performans değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem, özellikle engebeli ve yüksek kaya yoğunluğuna sahip arazilerde toprak işleme zorluklarını gidermek ve insan gücü eksikliğinden kaynaklanan toprak havalandırma problemlerine otonom bir çözüm sunmak amacıyla geliştirilmiştir. GPS tabanlı topografik haritalama sistemi kullanılarak arazi

eğim verileri analiz edilmiş ve elektro-hidrolik sistem aracılığıyla tekerlek yükseklikleri dinamik olarak ayarlanmıştır.

Önerilen sistemde kullanılan sekiz parçalı bıçaklı sürme modülü, farklı arazi koşullarına uyum sağlayarak toprak işleme süreçlerinin yüksek verimlilikle gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Elektrik motorları, süspansiyon sistemi ve elektronik kontrol üniteleri ile sistemin optimum tork ve hız kontrolü sağlanmış, Jetson Nano ve Pixhawk kontrol kartları aracılığıyla otonom hareket algoritmaları işlenmiştir. Ayrıca, sistemde kullanılan Intel RealSense D435i ve Logitech G920 Pro kameraları ile çevresel analiz gerçekleştirilmiş, derinlik algılama ve görüntü işleme kabiliyetleri test edilmiştir.

Elektro-hidrolik sistem tasarımı kapsamında, hidrolik silindirlerin dinamik tepkisi ve enerji verimliliği analiz edilmiş, basınç kontrol valfi kullanılarak piston hareketleri simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ile yapılan değerlendirmelerde, reaksiyon mesnedi ve pim bağlantılarında oluşan gerilme dağılımı incelenmiş, farklı yük koşulları altında sistem bileşenlerinin dayanıklılığı analiz edilmiştir. SolidWorks ve ANSYS ortamlarında gerçekleştirilen yapısal analizler, malzeme seçimleri ve tasarım optimizasyonları için önemli veriler sağlamıştır.

Ubuntu işletim sistemi üzerinde yürütülen simülasyon çalışmaları, önerilen elektro-hidrolik kontrollü pulluk sisteminin toprak işleme kabiliyetini artırdığını ve TİKA'nın engebeli arazilerde etkin bir şekilde çalışabildiğini göstermektedir. Çalışmanın bulguları, GPS tabanlı topografik analiz ve hidrolik adaptasyon mekanizmalarının entegrasyonunun, tarımsal insansız kara araçlarının performansını artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu araştırma, zorlu arazi koşullarında insansız kara araçlarının tarımsal uygulamalardaki etkinliğini artırmaya yönelik önemli bir katkı sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, elektro-hidrolik sistem ile GPS destekli topografik analiz ve dinamik adaptasyon mekanizmaları entegre edilerek yenilikçi bir model ortaya konulmuştur. Bu sayede, tarımsal İKA'ların sürdürülebilir tarım uygulamalarındaki potansiyelinin artırılmasına yönelik önemli bir adım atılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, sistem performansının saha testleri ile doğrulanması ve yapay zekâ destekli adaptif kontrol mekanizmalarının geliştirilmesi üzerine odaklanabilir.

### **Teşekkür:**

DeneySEL çalışmanın gerçekleştirilmesindeki değerli destek ve rehberliği için, Doç. Dr. GürCAN SAMTAŞ'a içten teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Aksoy, S. (2024). *Delta kollu tarımsal ilaçlama robotunun mekanik tasarımı ve analizi* (Thesis). DOI: 10.13140/RG.2.2.25478.75846.
- Acar, A., Güner, M., & Öztürk, R. (2011). *Tarım Alet ve Makineleri*. Tarım Yayıncılık.
- Ardupilot. (2025). <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>, (Erişim Tarihi:12.02.2025).
- Bac, C. W., & van Henten, E. J. (2014). Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead. *Journal of Field Robotics*, 31(6), 888–911. <https://doi.org/10.1002/rob.21525>
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill.
- Budhu, M. (2015). *Soil mechanics and foundations* (3rd ed.). Wiley.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics* (7th ed.). Taylor & Francis.
- Das, B. M. (2013). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Doğan, M. (2005). Türkiye ziraatında makineleşme: Traktör ve biçerdöverin etkileri. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Dergisi*, 14, 66-75.
- Developer. (2025). <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/get-started-jetson-nano-devkit>, (Erişim Tarihi:10.02.2025).
- Güzey, A., Akıncı, M. M., & Altan, Ş. (2020). Otonom Kara ve Hava Araçları ile Akıllı Tarım: Hasat Optimizasyonu Üzerine Bir Uygulama. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Özel Sayı*, 207-220. e-ISSN 2667-405X.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.
- Intelrealsense. (2025). <https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2022/05/Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-April-2022.pdf>, (Erişim Tarihi:12.02.2025).
- Jukema, G., & Van de Meer, R. (2009). *Labor costs in arable farming and greenhouse horticulture*;

*in Dutch: Arbeidskosten in de akkerbouw en glastuinbouw.* The Hague, The Netherlands: Landbouw Economisch Instituut (LEI).

J. G., & Bontsema, J. (2006). An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-

wire cultivation system. *Biosystems Engineering*, 94(3), 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.001>

Keçecioglu, G., & Gülsoylu, E. (2003). Traktör ve tarım makineleri hidroliği. *III. Ulusal Hidrolik*

*Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, 57-66.

Kiliç, A., & Kapucu, S. (2017). Electronic system and software architecture of modular

reconfigurable robot module OMNIMO. *Acta Physica Polonica A*, 132(3-II), 913-918. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.913>

Kara, M., & Demir, S. (2021). *Traktör dinamiği ve arazi koşullarına etkisi.* Akademik Yayıncılık

Kara, M., & Güner, R. (2018). *Tarım makinelerinde elektro-hidrolik sistemler ve uygulama teknikleri.*

Tarım Teknolojileri Yayıncılık.

Kara, M., & Demir, R. (2021). *Hidrolik ve elektro-hidrolik sistemler: Teknoloji ve uygulamalar.*

Mühendislik Yayınları.

Kıvanç, Ö. C., Mungan, T. E., Atila, B., & Tosun, G. (2019). An integrated approach to development

of unmanned ground vehicle: Design, analysis, implementation and suggestions. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 1957-1973.

Lewis, A., Watts, P. L., & Nagpal, B. K. (1983). *Investment analysis for robotic applications.*

Technical Paper—Society of Manufacturing Engineers (MS).

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics.* Wiley.

Logitech. (2025). <https://www.logitech.com/tr-tr/products/driving/driving-force-shifter.941-000130.html>, (Erişim Tarihi: 11.02.2025).

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). Wiley.

Özgüven, M. M., Türker, U., Akdemir, B., Çolak, A., Acar, A. İ., Öztürk, R., & Eminoğlu, M. B.

(2020). *Tarımda dijital çağ.* In *Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi* (pp. 55-78).

TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası. ISBN 978-605-01-1321-1.

Öztekın, S. (2025). *Toprak İşleme Makinaları*. Çukurova Üniversitesi.

<https://tarimmakinalari.cu.edu.tr/storage/Serdar%20%C3%B6ztekın%20ders%20notu/Tarmek%20%20toprak%20i%C5%9Fleme.pdf> (Erişim Tarihi: 20.01.2025).

Soil Science Society of America. (2014). *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for*

*making and interpreting soil surveys* (3rd ed.). U.S. Government Printing Office.

Savaşır, B. (2013). *Elektrikle Tahrikli Bir Tarım Traktörünün Tasarım ve Analizi* (Yüksek lisans tezi).

İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programı.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.

TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası. (2020). *Türkiye Ziraat Mühendisliği IX. Teknik Kongresi*

*Bildiriler Kitabı-1*. Ankara: TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası. ISBN: 978-605-01-1321-1.

Uzun, A. M. (2009). Tarımsal verimlilik ve Türkiye'deki durum: Tarımsal verimliliğin artırılmasına

dönük tedbirler üzerine bir inceleme. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 2, 24-40.

Uymaz, G., & Uymaz, B. (2024). Traktörlerde kullanılan elektro-hidrolik kaldırıcılar için tasarlanan

alternatif bir çeki algılama sistemi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12, 1398-1409. <https://doi.org/10.29130/dubited.1180954>

Van Henten, E. J., Van Tuijl, B. A. J., Hoogakker, G. J., Van Der Weerd, M. J., Hemming, J., Kornet,

Pekkeriet, E. J. (2011). *CROPS project deliverable 12.1: Economic viability for each application*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen UR Greenhouse Horticulture.

Vardin, S., Demircioğlu, P., & Böğrekci, İ. (2022). *Arazi uygulamaları için insansız yer aracı*

*geliştirilmesi*. Uluborlu Journal of Vocational Sciences, 5(1), 1-13.

<http://dergipark.gov.tr/umbd>

Young, S. H., Mazzuchi, T. A., & Sarkani, S. (2017). A framework for predicting future system

performance in autonomous unmanned ground vehicles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 47(7), 1192-1206. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2658342>

Yıldırım, A. (2019). *Tarım makineleri: Teori ve uygulamalar*. Ziraat Fakültesi Yayınları.

Yıldırım, A., & Demir, S. (2020). *Traktör ve tarım makineleri: Sistemler ve dinamikler*. Ziraat

Fakültesi Yayınları.

# BÖLÜM 4

## NAR ÇEKİRDEĞİ YAĞININ ÜRETİMİ, BİLEŞİMİ VE SAĞLIK AÇISINDAN ÖNEMİ

*Dilara ASLAN BAKKALBAŞI<sup>1</sup>*

*İsa CAVIDOĞLU<sup>2</sup>*

---

1 Dr. Dilara ASLAN BAKKALBAŞI

ORCID ID: 0000-0001-8056-6925

dildara79@gmail.com, 0505 2637184

2 Prof. Dr. İsa CAVIDOĞLU

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü

ORCID ID: 0000-0001-7896-5871

isacavidoglu@yyu.edu.tr, 0539 2814272

## GİRİŞ

Nar (*Punica granatum* L.) Punicaceae familyasına ait, genellikle tropik ve subtropik bölgelerde yetişen bir bitkidir (Kurt & Şahin, 2013). Nar ağacı yapraklarından, kabuğundan, çiçeklerinden, köklerinden, meyvelerinden/çekirdeklerinden ve suyundan yararlanmak için dört bin yıldan fazla bir süredir yetiştirilmektedir. (Melgarejo-Sánchez vd., 2021). Bu bağlamda, nar bitkisinin farklı kısımları ve suyu; antikanser, antidiyabetik, antelmintik, ishal önleyici, ateş düşürücü ve ülseri iyileştirici etkilerinden dolayı kullanılmıştır (Fan, 2015; Kapoor vd., 2015; Wu vd., 2015). Farklı araştırmacılar tarafından anavatanının İran, Himalaya, Pakistan, Hindistan (Jing vd., 2012) ve Akdeniz Bölgesi (Paul & Radhakrishnan, 2020) olarak gösterilen nar, Akdeniz Bölgesi'nin tümünde yetişmektedir (Ahangari & Sargolzaei, 2012). Günümüzde Türkiye en fazla nar yetiştiren ülkelerin arasında yerini almış olup üretimi giderek artmaktadır. Ülkemizde nar üretimi 2010 yılında 208502 ton iken, 2023 yılında 638821 ton, 2024 yılında ise bir önceki yıla göre %10.1 artarak 703425 tona ulaşmıştır. Nar ihracatı 2010 yılında 67514 ton ve 2022 yılında 155780 ton olmuştur (Anonim, 2025).

Nar ülkemizin hemen hemen her bölgesinde yetiştirilmesinin yanı sıra Akdeniz, Ege, Güney Doğu Anadolu ve Marmara bölgeleri nar üretimi açısından önemli bölgelerdir. Bu bölgeler arasında Akdeniz bölgesi toplam nar üretiminin yaklaşık %56.5'ini, Ege bölgesi %30.9'unu ve Güney Doğu Anadolu bölgesi %10.8'ini karşılamaktadır (Anonim, 2022).

## Nar meyvesi

Nar meyvesi (Şekil 1) anatomik olarak dış kabuk, iç kabuk (zar) ve dane (yenilebilir kısım) olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır (Fernandes vd., 2015). Yenilebilir kısım tüm meyvenin yaklaşık %52'sini oluştururken (Mohaghenghi vd., 2011), nar meyvesinin yenilebilir kısmının %75-85'i meyve suyundan, %15-25'i de çekirdekten oluşmaktadır (Melo vd., 2014). Nar çekirdeği, meyvenin tümünün %3.47-7.9'unu oluşturmaktadır (Aslan Bakkalbaşı & Cavidoğlu, 2024; Fernandes vd., 2015). Nar meyvesi hem tadı hem de sağlık üzerine olumlu etkilerinden dolayı sıklıkla tercih edilen bir meyvedir. Nar meyvesi polifenoller, vitaminler, mineraller ve çeşitli kimyasal bileşikler ve biyomoleküller açısından zengindir (Basuny, 2015). Yapılan çalışmalarda narın antioksidan aktivitesinin birçok meyveye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Çin'de 62 çeşit meyvenin antioksidan aktivitesinin incelendiği çalışmada narın bu açıdan ilk 7 meyve arasında yer aldığı belirtilmiştir (Fu vd., 2011).

Nar meyvesi taze olarak tüketilmesinin yanında meyve suyu, konsantre, dane konservesi, jel, ekşi, şarap ve sos gibi birçok ürünün üretiminde

kullanmakla birlikte şıfalı bitki preparatları ve gıda takviyelerinin bileşiminde yer alan ekstraktları geliştirmek için de kullanılmaktadır (Goula & Adamopoulos, 2012). Nar endüstrisinin yan ürünü olan nar çekirdeği, nar ürünlerinin üretiminden sonra posa olarak çıkan kısmın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Fernandes vd., 2015). Bu posa çoğunlukla hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda nar çekirdeğinden elde edilen yağın (şekil 2) tıp ve kozmetik alanlarındaki olumlu etkilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte bu yağa olan ilgi artmıştır.



şekil 1. Nar meyvesi

### Nar çekirdeği yağının ekstraksiyon yöntemleri

Nar çekirdeğinin yağ oranı çeşit, yetiştirme koşulları, iklim ve ekstraksiyon yöntemleri gibi birçok faktöre bağlı olarak %10.18-35.19 arasında değişmektedir (Aslan Bakkalbaşı & Cavidoğlu, 2024; Keskin Çavdar, 2017). Bu oran, bitkisel yağ üretiminde kullanılan pamuk çiğidinde %18-25 ve soyada %18-22 olarak belirtilmektedir (Kayahan, 2004).

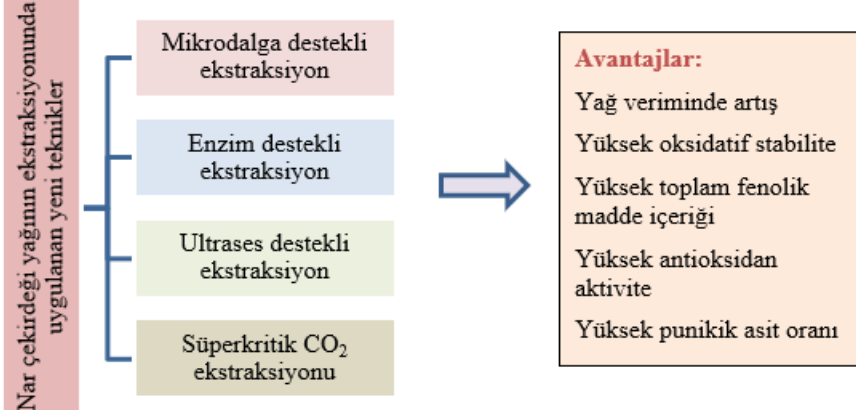


*Şekil 2. Nar ekirdeği yağı*

Ticari olarak nar çekirdeği, posadan elde edilen nar tanelerinin güneŐte ya da kurutucu sistemlerinde kurutulmasıyla elde edilmektedir (Ergin, 2019).

Nar ekirdeği yağının ekstraksiyonu gıda endüstrisi için büyük önem taŐmaktadır. Yağ endüstrisinde yağlı tohumlardan yağ elde etmek amacıyla mekanik presleme ve/veya üzücü ekstraksiyonu olmak üzere iki ana yöntem kullanılmaktadır. Mekanik presleme, yalnızca yağlı tohumların yağ içeriğinin %25 ve küspesinde kalan yağ miktarının %4-5 civarında olduğu durumda avantajlı yöntem olarak kabul edilmektedir. Diğer taraftan, üzücü ekstraksiyonu, düşük yağ içeriğine sahip yağlı tohumlar için ve özellikle kspede kalan yağ miktarının %1'den az olduğu durumlarda, ideal bir seçenek haline gelmektedir (Cravotto vd., 2023; Carr, 2022; Dunford, 2012). Üzücü ekstraksiyonu; yüksek yağ verimi, düşük maliyeti ve büyük ölçekli otomatik üretimi nedeniyle endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılmaktadır (Hamouda & Felemban, 2023). Ancak bu ekstraksiyon yönteminin yüksek miktarda üzücü gerekliliği, uzun işlem süresi ve üzücü kalıntısı gibi sorunları bulunmaktadır. Mekanik preslemenin de yüksek maliyeti, düşük yağ verimi ve presleme öncesi kavurma işleminin gerekliliği gibi birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda, konvansiyonel ekstraksiyon tekniklerinden kaynaklı bu dezavantajlar göz önünde bulundurulurken nar çekirdeği yağının ekstraksiyonu amacıyla geliştirilen bazı yeni teknikler ve bunların sağladığı avantajlar Şekil 3'te

verilmiştir (Aslan Bakkalbaşı, 2024; Kaseke vd., 2021; Natolino & Porto, 2019; Keskin Çavdar, 2017; Moradi vd., 2017; Tian vd., 2013).



Şekil 3. Nar çekirdeği yağının ekstraksiyonunda uygulanan bazı yeni teknikler ve avantajları

### Nar çekirdeği yağının yağ asidi bileşimi

Nar çekirdeği yağının yağ asidi bileşimi özellikle çoklu doymamış yağ asitlerini içermesi nedeniyle kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Fourati vd., 2020). Yapılan farklı çalışmalar, nar çekirdeği yağının çoklu doymamış yağ asitleri açısından önemli bir kaynak olduğunu göstermektedir (Eikani vd., 2012; Jing vd., 2012). Nar çekirdeği yağının %75-90 gibi önemli kısmı konjuge linolenik asitlerden (CLnA) oluşmaktadır (Aslan Bakkalbaşı, 2024; Ahangari ve Sargolzaei, 2012). Konjuge linolenik asitler, bitki çekirdeklerinde bulunan  $\alpha$ -linolenik asidin pozisyonel ve geometrik izomerlerinin karışımıdır. Konjuge linolenik asitlerin kanser gibi hastalıkları önleyebildiği belirtilmektedir (Yasui vd., 2005). Ayrıca çoklu doymamış yağ asitleri açısından zengin olan yağların tüketimi kolorektal, meme ve prostat kanseri gibi hastalıklara karşı koruma sağladığını belirten çalışmalar da mevcuttur (Białek, 2014; Gerber vd., 2005).

Punikik asit (*9-cis, 11-trans, 13-cis*, octadekatrienoik asit) nar çekirdeği yağında bulunan, etkileri diğer konjuge linolenik asitlerden daha fazla olan ve "süper CLnA" olarak anılan önemli bir konjuge linolenik asittir (Aruna vd., 2016). Punikik asit nar çekirdeği yağının toplam yağ asitlerinin yaklaşık %75-85'ini oluşturmaktadır (Aslan Bakkalbaşı & Cavidoğlu, 2024; Rojo-Gutiérrez vd., 2020). Puni-

kik asidin antikanserojenik (Grossmann vd., 2010), antiinflamatuvar (Boussetta vd., 2009) ve hipolipidemik (Arao vd., 2004) etkileri bildirilmiştir.

Aslan Bakkalbaşı & Cavidoğlu (2024), Türkiye’de yetiştirilen 4 farklı nar çeşidinin punikik asit içeriğini %80.98-84.14 arasında saptamışlardır. İncelenen çeşitler arasında Hicaznar çeşidinin en yüksek oranda punikik asit içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Tavakoli vd. (2024), İran’da yetiştirilen üç farklı nar çeşidine ait çekirdeklerin yağ asidi bileşiminin %75.5-80.9 düzeyinde punikik asit içerdiğini saptamışlardır. Fernandes vd. (2015) İspanya’da yetiştirilen 9 nar çeşidinde yaptıkları çalışmada tüm çeşitlerdeki baskın yağ asidinin punikik asit olduğunu belirtmişlerdir. Çeşitlere ait punikik asit değerleri 3523-10586 mg/100 g çekirdek arasında değişmekle birlikte en yüksek değer Katırbaşı çeşidinde tespit edilmiştir. Çin’in Shanxi bölgesinde yetiştirilen 4 farklı nar çeşidine ait çekirdeklerin antioksidan ve fitokimyasal bileşimini inceleyen Jing vd. (2012) toplam yağ asidi içeriğinin %73-79’nun punikik asitten oluştuğunun belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu değerlerin konjuge linolenik asit bakımından zengin çekirdekler olarak kabul edilen acı kabak (%60), aynısefa (%29.5) ve mahlep (27.6) gibi bitkilerden daha yüksek olduğunu, böylece bu nar çeşitlerinin ClnA açısından potansiyel diyet kaynağı olabileceğini vurgulamışlardır. Saveh Nar Araştırma Enstitüsü’nden (İran) temin edilen farklı 5 çeşit nar çekirdeklerine ait yağların kimyasal yapısını inceleyen araştırmacılar (Habibnia vd., 2012) da tüm örneklerdeki baskın yağ asidinin punikik asit olduğunu bildirmişlerdir. Bu yağ asidinin toplam yağ asidi içeriğinin %78.25-82.40’nı oluşturduğu belirlenmiştir. Abbasi vd. (2008) İran’da yetiştirilen Malas nar çeşidinde farklı çözücülerle ekstrakte ettikleri yağların punikik asit içeriğinin % 81.0-83.1 arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Türkiye’de yetiştirilen ve ticari açıdan önemli olan 15 nar çeşidine ait çekirdeklerin yağ ve CLnA içeriğini inceleyen Kıralan vd. (2009) tüm çeşitlerdeki baskın olan punikik asit oranını %70.42-76.17 arasında tespit etmişlerdir. Khoddami vd. (2014), soğuk pres ile elde ettikleri Torshe Malas çeşidine ait nar çekirdeği yağının punikik asit miktarını %76.10, çoklu doymamış yağ asitlerinin miktarını ise %92.57 olarak belirlemişlerdir.

Punikik asit dışında nar çekirdeği yağında linoleik, oleik, palmitik, stearik ve araşidik asit de saptanmıştır (Okan vd., 2020; Hernandez vd., 2011; Melgarejo ve Artes, 2000). Bunlara ek olarak nar çekirdeği yağında

$\alpha$ -eleostearik asit (C18:3-9*cis*, 11*trans*, 13*trans*) ve katalpic asit (C18:3-9*trans*, 11*trans*, 13*cis*) gibi konjuge linolenik asidin diğer izomerlerinin de düşük oranlarda bulunduğu belirtilmektedir. Bu yağ asitlerinin antiobez ve hipolipidemik etkileri rapor edilmiştir (Arao vd., 2004). Nar çekirdeği yağında ayrıca az miktarlarda gadoleik (C20:1), behenik (C22:0) ve lignoserik (C24:0) gibi yağ asitlerin de saptandığı çalışmalar mevcuttur (Okan vd., 2020; Fadavi vd., 2006).

### Nar çekirdeği yağının tokoferol içeriği

Nar çekirdeği yağı, yüksek miktarda konjuge yağ asitleri ile birlikte yüksek oranda tokoferol ve yağda çözünen vitaminleri de içermektedir (Caligiani vd., 2010). Vücudumuzdaki reaksiyonlar veya stres, güneş ışınları, sigara, alkol ve çevre kirliliği gibi dış parametrelerin etkisi ile oluşan ve yaşlanmayı hızlandıran serbest radikalleri işlevsiz duruma getiren tokoferoller gibi antioksidanlar ve vitaminlerin yaşlanma sürecini yavaşlattıkları bilinmektedir (Uncu, 2008). Tokoferoller doğada en çok bulunan yağda çözünen antioksidanlar olup, temel yapılarını tokol halkası oluşturur. Bu halkaya bir yan zincir ve 1-3 adet arasında CH<sub>3</sub> grubunun bağlanması ile tokoferoller oluşmaktadır.  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - ve  $\delta$ - bitkisel kaynaklarda en çok rastlanan tokoferol fraksiyonlarıdır. Tokoferoller E-vitamini grubu olarak da bilinmektedirler. Tokoferollerin antioksidatif etkinlikleri  $\alpha < \beta < \gamma < \delta$  olarak sıralanırken, E-vitamini etkinlikleri  $\alpha > \beta > \gamma > \delta$  olarak bilinmektedir (Kayahan, 2004). Antioksidatif etkilerinden dolayı tokoferoller ve tokotrienoller yemeklik yağların oksidatif stabilitelelerini arttıran önemli biyoaktif bileşenlerdir. Antioksidatif etkileri ile birlikte bu bileşenlerin kalp-damar hastalıkları ve bazı kanser ve kronik hastalıkların riskini azalttığı, LDL ve lipoproteinlerin oksidasyonunu engellediği ve kansızlığı karşı koruyucu etkiye sahip oldukları bildirilmiştir. (Uncu 2008). Yapılan araştırmaların çoğuna göre nar çekirdeği yağında  $\gamma$ -tokoferol baskın iken,  $\alpha$ -tokoferol,  $\beta$ -tokoferol veya  $\delta$ -tokoferolün baskın olduğunu gösteren çalışmalar da mevcuttur (Habibnia vd., 2012; Jing vd., 2012; Caligiani vd., 2010).

Nar çekirdeği yağının toplam tokoferol içeriği 5.31-524.6 mg/100g değerler arasında bulunmaktadır (Silva vd., 2019; Yoshime vd., 2018; Fernandes vd., 2015 Jing vd., 2012). Farklı ekstraksiyon tekniklerinin nar çekirdeği yağının CLnA, fenolik bileşenler ve tokoferol içeriğine etkisini inceleyen Silva vd. (2019) alkolle ekstrakte edilen yağın presleme ve süper kritik CO<sub>2</sub> yöntemleriyle elde edilen yağlara göre daha yüksek fenolik bileşenler, tokoferol içeriklerine, antioksidan kapasiteye ve oksidatif stabiliteye sahip olduğunu vurgulamışlardır. Fernandes vd. (2015) İspanya'da yetişen 9 farklı nar çeşidinin yağ asidi, E vitamini ve sterol bileşimini inceledikleri

çalışmaya göre bu yağlardaki baskın tokoferolün  $\gamma$ -tokoferol olduğunu (123.0-449.7 mg/100 yağ) tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada, toplam tokoferol içeriği 312.1-524.6 mg/100 g yağ arasında tespit edilirken,  $\alpha$ - ve  $\delta$ -tokoferol sırasıyla, 7.3-17.9 mg/100 g yağ ve 4.9-15.2 mg/100 g yağ değerleri arasında değiştiği bildirilmiştir. Jing vd. (2012) Çin'in Shanxi bölgesinde yetişen 4 farklı nar çeşidine ait çekirdeklerin antioksidan özellikleri ve fitokimyasal bileşimini inceledikleri çalışmada, bu çeşitlerdeki baskın tokoferolü  $\delta$ -tokoferol olarak tespit etmişlerdir. Çeşitlere ait yağların  $\delta$ -tokoferol içeriği 1414.42-3513.19  $\mu\text{g/g}$  yağ arasında değişirken  $\gamma$ - ve  $\alpha$ -tokoferol fraksiyonları sırasıyla, 34.15-54.91 ve 718.7-1388.34  $\mu\text{g/g}$  yağ arasında bulunmuştur. İran'da yetiştirilen 5 farklı nar çeşidine ait çekirdek yağlarının kimyasal değerlendirilmesini yapan Habibnia vd. (2012), bu çeşitlere ait  $\alpha$  ve  $\gamma$ - tokoferol fraksiyonlarına ait değerleri sırasıyla, 543.6-1134.6 ve 1856.6-7106.1 ppm arasında bulmuşlardır. Araştırmacılar bu değerleri “beklenmedik konsantrasyonlar” olarak yorumlamışlardır. Caligiani vd. (2010) Wonderful ve İtalyan Dente di cavallo nar çeşitlerine ait yağların tokoferol içeriklerini inceledikleri çalışmada bu 2 çeşitte de baskın olarak  $\beta$ -tokoferolü tespit etmişlerdir. Dente di cavallo ve Wonderful çeşitlerinde  $\beta$ -tokoferol değerleri sırasıyla, 2.794 ve 3.229 mg/kg yağ olarak tespit edilmiştir. Aynı çeşitlerin  $\alpha$ -tokoferol değerleri sırasıyla, 423 ve 135 mg/kg yağ,  $\gamma$ -tokoferol değerleri 27 ve 41 mg/kg yağ;  $\delta$ -tokoferol değerleri ise 207 ve 110 mg/kg yağ olarak belirlenmiştir. Birçok çalışmada nar çekirdeği yağında  $\beta$ -tokoferole rastlanamazken, bu çalışmada yüksek miktarlarda tespit edilmesi dikkat çekmektedir. Verardo vd. (2014) nar çekirdeği yağında  $\gamma$ -tokoferolü 616–2400  $\mu\text{g/g}$  yağ arasında tespit etmişlerdir. Araştırmacılar nar çekirdeği yağındaki  $\gamma$ -tokoferol içeriğini ceviz yağından 2-8 kat daha yüksek, mısır ve soya fasulyesine yakın (Gemrot vd., 2006) olduğunu bildirmişlerdir.

### **Nar çekirdeği yağının skualen içeriği**

Nar çekirdeği yağında, çok önemli organik bileşik olan skualenin saptandığını bildiren çalışmalar bulunmaktadır (Okan vd., 2020; Caligiani vd., 2010). Pahalı bir terpenoid olan skualen öncelikli olarak balıklardan (özellikle köpekbalığı karaciğer yağı) elde edilmesine rağmen, ayrıca zeytin ve amarant yağları gibi bitkisel kaynaklardan da elde edilmektedir (He & Corke, 2003). Skualenin gıda takviyesi olarak önemi, kolesterol ve trigliserit düzeyini doğrudan veya dolaylı azaltmasının yanında bazı kolesterol

düşürücü ilaçların etkisini de arttırmasıyla ortaya çıkmaktadır (Zhang vd., 2002; Chan vd., 1996). Buna ek olarak skualen tümörlerin önlenmesinde de önemli rol oynadığı saptanmıştır (Caligiani vd., 2010). Nar çekirdeği yağı özellikle vejetaryenler için alternatif yeni bir skualen kaynağı olarak düşünölebilmektedir.

Okan vd. (2020) yaptıkları çalışmada nar çekirdeği yağında %2.62 oranında skualen tespit etmişlerdir. Bu değer ayçiçeği, pamuk, zeytin ve Hindistan cevizi gibi önemli ticari yağlar ve pirinç kepeğinden oldukça yüksektir. Caligiani vd. (2010) iki nar çeşidine ait yağlarda skualen düzeyini 800 mg/kg yağ tespit etmişlerdir. Araştırmacılar zeytinyağı ve amarant yağı gibi skualen açısından zengin olarak kabul edilen bitkisel kaynaklarla kıyasladıklarında bu değerin oldukça yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

### **Nar çekirdeği yağının fitosterol içeriği**

Nar çekirdeği yağı önemli bir fitosterol kaynağıdır. Fitosteroller bitki sterolleridir ve memelilerde bulunan kolesterole benzer biyolojik fonksiyonlara sahiptirler. Ancak kimyasal yapılarındaki küçük farklılıklar nedeniyle kolesterole göre daha az emilmektedirler. Fitosteroller bağırsaktan kolesterol emilimini engelleyerek vücutta LDL-kolesterol seviyesini düşürmekte ve bazı kanser türlerinin oluşum riskini azaltmaktadırlar (Fernandes vd., 2015).

Yoshime vd. (2018) nar çekirdeği yağının toplam sterol içeriğini 540.1 mg/100 g olarak bulurken  $\beta$ -sitosterol, kampasterol ve stigmasterol içeriklerini sırasıyla, 315.0, 56.3 ve 3.9 mg/100g olarak belirlemişlerdir. Aynı çalışmada 164.9 mg/100 g değerinde tanımlanamayan bir sterol tespit edilmiştir. Fernandes vd. (2015) İspanya'da yetişen nar çeşitlerine ait yağlarda toplam sterol içeriğinin 363.6-552.7 mg/100 g yağ arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada  $\beta$ -sitosterol 220.1-354.2, kampesterol 25.1-36.3, sitostanol 14.8-25.9 ve stigmasterol 11.8-17.0 mg/100 g yağ olarak saptanmıştır. Habibnia vd. (2012) yaptıkları çalışmada nar çekirdeği yağının toplam sterol içeriğini 5239.44-5757.62 ppm aralığında olduğunu belirtirken, fitosterollerin %85.49-87.71'ini  $\beta$ -sitosterol, %7.56-8.83'ünü kampesterol, %3.14-5.93'ünü stigmasterol ve %0.37-0.40'ını kolesterolün oluşturduğunu saptamışlardır.

### **Nar çekirdeği yağının sağlık açısından önemi**

Nar çekirdeği yağı, içerdiği yağ asitlerinin beslenme açısından önemli olması nedeniyle tüketimi ve kullanımı yaygınlaşan nar ürünleri arasındadır. Nar çekirdeği yağının yüksek oranda konjuge linolenik asit içermesi dışında, hiperkolesterolemiyi düşürmek gibi insan beslenmesi için gelişti-

rilen ve sağlık açısından faydalı olan gıda takviyelerinin formülasyonunda kullanılacak uygun biyoaktif bileşenleri de içermektedir (Caligiani vd., 2010). Diyetle alınan nar çekirdeği yağının, içeriğindeki linolenik asitlerden dolayı, ratlarda kolon kanseri gelişimini büyük ölçüde engellediği tespit edilmiştir (Kohno vd., 2004). Nar çekirdeği, çekirdek yağında bulunan biyoaktif bileşenlerinden dolayı lipid peroksidasyonunu engellemekte, kanser hücresi ve tümör oluşumunu önlemektedir (Albrecht vd., 2004). Nar çekirdeği yağının biyoaktif özellikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Nar çekirdeği yağının sağlık üzerine etkileri (Ashaolu vd., 2025)

## SONUÇ

Nar çekirdeği yağı, zengin içeriği nedeniyle beslenme ve sağlık açısından yüksek potansiyele sahip bir yan ürün olarak değerlendirilmelidir. Nar çekirdeği yağının içerdiği yağ asitlerinin insan sağlığı için gerekli olan, vücutta sentezlenemeyip dışarıdan alınması gereken elzem yağ asitlerini yüksek miktarda içermesi ve bununla beraber yüksek tokoferol içeriğine sahip olmasından dolayı bu yönleri ile ön planla çıkarılmalıdır. Böylece farklı nar kaynaklı ürünlerinin bir atığı olan nar çekirdeğinin değerlendiril-

mesinin sağlık ve ekonomi açısında ülkemize kayda değer bir katkı sağlayacaktır. Bununla birlikte nar çekirdeği yağı ekstraksiyonunda geliştirilen yeni tekniklerin konvansiyonel yağ üretim yöntemlerine iyi bir alternatif olabileceği de açıktır.

## KAYNAKLAR

- Abbasi, H., Rezaei, K., & Rashidi, L. (2008). Extraction of essential oils from the seeds of pomegranate using organic solvents and supercritical CO<sub>2</sub>. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85, 83-89.
- Ahangari, B., & Sargolzaei, J. (2012). Extraction of Pomegranate Seed Oil Using Subcritical Propane and Carbene Dioxide. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(3), 258-265.
- Albrecht, M., Jiang, W., Kumi-Diaka, J., Lansky, E. P., Gommersall, L. M., Patel, A., Mansel, R. E., Neeman, I., Geldof, A. A., & Campbell, M. J. (2004). Pomegranate extracts potently suppress proliferation, xenograft growth, and invasion of human prostate cancer cells. *Journal of Medicinal Food*, 7(3), 274-283.
- Anonim (2025). Nar istatistikleri. Erişim tarihi: 11 Mart 2025. Erişim adresi: <https://www.statagri.com/nar-istatistikleri>
- Anonim (2022). Nar yetiştiriciliği. Erişim tarihi: 11 Mart 2025. Erişim adresi: <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/alata/Belgeler/brosurler/brosur2022/NarYetiştiriciliği-NesrinKARATAŞ.pdf>
- Arao, K., Wnag, Y. M. Inoue, N., Hirata, J., Cha, J. Y., Nagao, K., & Yanagita, T. (2004). Dietary effect of pomegranate seed oil rich in 9cis,11trans,13cis conjugated linolenic acid on lipid metabolism in obese, hyperlipidemic OLETF rats. *Lipid in Health and Disease*, 3(24),1-7.
- Aruna, P., Venkataramanamma, D., Singh, A. K., & Singh, R. P. (2016). Health Benefits of Punicic Acid: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 16-27.
- Ashaolu, T. J., Lydia, D. E., Rehman, A., Karim, A., & Jafari, S.M. (2025). Extraction and stabilization of pomegranate seed oil: a functional oil for the food industry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 19,167-184.
- Aslan Bakkalbaşı, D. (2024). *Kavurma, mikrodalga ve ultrases destekli enzimatik ekstraksiyon işlemlerinin nar çekirdeği yağının verimi, bileşimi ve kalitesi üzerine etkisi*, Doktora tezi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.
- Aslan Bakkalbaşı, D., & Cavidoğlu, İ. (2024). Nar Çekirdeğinin Bazı Fizikokimyasal Özellikleri ve Yağ Asidi Bileşimi. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29(2), 580-588.
- Basuny, A.M. (2015). Utilization from leaves of olive and pomegranate as a source of bioactive components. *Journal of Advances in Biological and Basic Research*, 1,01.
- Białek, A., Teryks, M., & Tokarz, A. (2014). Conjugated linolenic acids (CLnA, super CLA)- natural sources and biological activity. *Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej* (online), 6 (68), 1238-1250.

- Boussetta, T., Raad, H., Lettéron, P., Gougerot-Pocidalò, M. A., Marie, J. C., Driss, F., & El-Benna, J. (2009). Punicic Acid a Conjugated Linolenic Acid Inhibits TNF $\alpha$ -Induced Neutrophil Hyperactivation and Protects from Experimental Colon Inflammation in Rats. *PLoS ONE* 4(7), e6458.
- Caligiani, A., Bonzanini, F., Palla, G., Cirlini, M., & Bruni, R. (2010). Characterization of a Potential Nutraceutical Ingredient: Pomegranate (*Punica granatum* L.) Seed Oil Unsaponifiable Fraction. *Plant Foods for Human Nutrition*, 65, 277–283.
- Carré, P. (2022). New approach for the elucidation of the phenomena involved in the operation of vegetable oil extraction presses. *OCL*, 29, 6.
- Chan, P., Tomlinson, B., Lee, C. B., Lee, & Y. S. (1996). Effectiveness and safety of low-dose pravastatin and squalene, alone and in combination, in elderly patients with hypercholesterolemia. *Journal of Clinical Pharmacology*, 36, 422–427.
- Cravotto, C., Claux, O., Bartier, M., Fabiano-Tixier, A.-S., & Tabasso, S. (2023) Leading edge technologies and perspectives in industrial oilseed extraction. *Molecules*. 28(16), 5973.
- Dunford, N.T. (2012). *Food and Industrial Bioproducts and Bioprocessing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-8138-2105-4.
- Eikani, M. H., Golmohammad, F., & Homami, S. S. (2012). Extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil using superheated hexane. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 32-34.
- Ergin, S. Ö. (2019). Nar meyvesi (*Punica granatum* L.) ile farklı ürünlerinin antioksidan özellikleri. *Akademik Gıda*, 17 (2), 243-251.
- Fadavi, A., Barzegar, M., & Azizi, M. H. (2006). Determination of fatty acids and total lipid content in oilseed of 25 pomegranates varieties grown in Iran. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 674-680.
- Fan, L. (2015). Antimicrobial effect of pomegranate juice on *Listeria innocua* and *Escherichia coli* in different culture systems, in 2015 Annual Meeting (July 25–28, 2015).
- Fernandes, L., Pereira, J. A., Lopez-Cortes, I., Salazar, D. M., Ramalhosa, E., & Casal, S. (2015). Fatty acid, vitamin E and sterols composition of seed oils from nine different pomegranates (*Punica granatum* L.) cultivars grown in Spain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 39, 13-22.
- Fourati, M., Smaoui, S., Hlima, H.B., Elhadef, K., Braïek, O.B., Ennouri, K., & Mellouli, L. (2020). Bioactive compounds and pharmacological potential of pomegranate (*Punica granatum*) seeds-a review. *Plant. Foods Hum. Nutr.* 75, 477–486.
- Fu, L., Xu, B.T., Xu, X.R., Gan, R.Y., Zhang, Y., Xia, E.Q., & Li, H.B. (2011). Antioxidant capacities and total phenolic contents of 62 fruits. *Food Chemistry*, 129, 345-350.

- Gemrot, F., Barouh, N., Vieu, J. P., Pioch, D., & Montet, D. (2006). Effect of roasting on tocopherols of gourd seeds (*Cucurbita pepo*). *Grasas y Aceites*, 57(4), 409–414.
- Gerber, M., Thie'baut, A., Astorg, P., Clavel-Chapelon, F., & Combe, N. (2005). Dietary fat, fatty acid composition and risk of cancer. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 107, 540–559.
- Goula, A. M., Adamopoulos, & K. G. (2012). A method for pomegranate seed application in food industries: seed oil encapsulation. *Food and Bioproducts Processing*, 90, 639–652.
- Grossmann, M. E., Mizuno, N. K., Schuster, T., & Cleary, M. P. (2010). Punicic acid is an  $\omega$ -5 fatty acid capable of inhibiting breast cancer proliferation. *International journal of oncology*, 36(2), 421–6.
- Habibnia, M., Ghavami, M., Ansari-pour, M., & Vosough, S. (2012). Chemical evolution of oils extracted from different varieties of Iranian Pomegranate Seeds. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 2, 35–40.
- Hamouda, A.F., & Felemban, S. (2023) Biochemical pilot study on effects of pomegranate seed oil extract and cosmetic cream on neurologically mediated skin inflammation in animals and humans: a comparative observational study. *Molecules*. 28(2), 903.
- He, H. P., & Corke, H. (2003). Oil and squalene in amaranthus grain and leaf. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 51, 7913–7920.
- Hernandez, F., Melgarejo, P., Martinez, J. J., & Legua, P. (2011). Fatty acid composition of seed oils from important Spanish pomegranate cultivars. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 2, 35–40.
- Jing, P., Ye, T., Shi, H., Sheng, Y., Slavin, M., Gao, B., Liu, L., & Yu, L. (2012). Antioxidant properties and phytochemical composition of Chine-grown pomegranate seeds. *Food Chemistry*, 132 (3), 1457–1464.
- Kapoor, R., Ronnenberg, A., Puleo, E., Jr Chatterton, R.T., Dorgan, J.F., Seeram, N.P., & Sturgeon, S.R. (2015) Effects of pomegranate juice on hormonal biomarkers of breast cancer risk. *Nutr. Cancer*. 67(7), 1113–1119.
- Kaseke, T., Opara, U. L., & Fawole, O. A. (2021). Effect of Enzymatic Pretreatment of Seeds on the Physicochemical Properties, Bioactive Compounds, and Antioxydant Activity of Pomegranate Seed Oil. *Molecules*, 26(15), 4575.
- Kayahan, M., (2004). Yağlı Tohumlardan Ham Yağ Üretim Teknolojisi. TMMOB Gıda Mühendisleri Odası Kitaplar Serisi: 7, Ankara. 234 s.
- Keskin Çavdar, H., Koçak Yanık, D., Gök, U., & Göğüş, F. (2017). Optimisation of Microwave-Assisted Extraction of Pomegranate (*Punica granatum L.*) Seed Oil and Evaluation of Its Physicochemical and Bioactive Properties. *Food Technology and Biotechnology*, 55(1), 86–94.

- Kıralan, M., Gölükçü, M., & Tokgöz, H. (2009). Oil and conjugated linolenic acid contents of seeds from important pomegranate cultivars (*Punica granatum L.*) grown in Turkey. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86, 985-990.
- Khoddami, A., Man, Y.B.C., & Roberts, T.H. (2014). Physico-chemical properties and fatty acid profile of seed oils from pomegranate (*Punica granatum L.*) extracted by cold pressing, *European Journal of Lipid Science and Technology*. 116(5), 553–562.
- Kohno, H., Suzuki, R., Yasui, Y., Hosokawa, M., Miyashita, K., & Tanaka, T. (2004). Pomegranate seed oil rich in conjugated linolenic acid suppresses chemically induced colon carcinogenesis in rats. *Cancer Science*, 95(6), 481-486.
- Kurt, H., & Şahin, G. (2013). Bir Ziraat Coğrafyası Çalışması: Türkiye’de Nar (*Punica Granatum L.*) Tarımı. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27, 551-574.
- Melgarejo, P., & Artes, F. (2000). Total lipid content and fatty acid composition of oilseed from lesser known sweet pomegranate clones. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 1452-1454.
- Melgarejo-Sánchez, P., Núñez-Gómez, D., & Martínez-Nicolás, J.J. (2021). Pomegranate variety and pomegranate plant part, relevance from bioactive point of view: a review. *Biores. Bioproc.* 8, 2.
- Melo, I. L. P., Carvalho, E. B. T., & Mancini-Filho, J. (2014). Pomegranate Seed Oil (*Punica granatum L.*): A Source of Punicic Acid (Conjugated  $\alpha$ -Linolenic Acid). *Journal of Human Nutrition & Food Science*, 2(1), 1024.
- Mohaghenghi, M., Rezaei, K., Labbafi, M., & Mousavi, S. M. E. (2011). Pomegranate seed oil as a functional ingredient in beverages. *European Journal Lipid Science Technology*, 113, 730-736.
- Natolino, A. & Porto, C.D. (2019). Supercritical carbon dioxide extraction of pomegranate (*Punica granatum L.*) seed oil: kinetic modelling and solubility evaluation. *J. Supercrit Fluids*. 151, 30–39.
- Okan, O. T., Kılıç-Pekgözlü, A., Onaran, A., Öz, M., & Deniz, İ. (2020). Determination of chemical composition, antioxidant and antifungal properties of pomegranate (*Punica granatum L.*) seed oil produced in industrial scale. *Artvin Coruh University, Journal of Forestry Faculty*, 21 (2).
- Paul, A., & Radhakrishnan, M. (2020). Pomegranate seed oil in food industry: Extraction, characterization, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 273–283.
- Rojo-Gutierrez, E., Carrasco-Molinar, O., Tirado-Gallegos, J. M., Levario-Gomez, A., Chavez-Gonzalez, M. L., Baeza-Jimenez, R., & Buenrostro-Figueroa, J. J. (2021). Evolution of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(19), 2098-2107.

- Silva, O., L., Ranquine, L., G., Monteiro, M., & Torres, A., G. (2019). Pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil enriched with conjugated linolenic acid (cLnA), phenolic compounds and tocopherols: Improved extraction of a specialty oil by supercritical CO<sub>2</sub>. *The Journal of Supercritical Fluids*, 14, 126-137.
- Tavakoli, J., Ghorbani, A., Sourki, A.H., Ghani, A., Jelyani, A.Z., Kowalczewski, P.V., Aliyeva, A., & Khaneghah, A.M. (2024). Thermal processing of pomegranate seed oils underscores their antioxidant stability and nutritional value: Comparison of pomegranate seed oil with sesame seed oil. *Food Science & Nutrition*, 12(3), 2166–2181.
- Tian, Y., Xu Z., Zheng, B., & Lo, Y. M. (2013). Optimization of ultrasasonic-assisted extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil. *Ultrasochemistry*, 20(1), 202-208.
- Uncu, E.B. (2008). Farklı lamine ambalajların öğütülmüş fındıklarda oksidasyon ve toplam tokoferol düzeyi üzerine etkileri, Yüksek lisans tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Verardo, V., Garcia-Salas, P., Baldi, E., Segura-Carretero, A., Fernandez-Gutierrez, A., & Caboni, M.F. (2014). Pomegranate seeds as a source of nutraceutical oil naturally rich in bioactive lipids. *Food Research and International*, 65, 445-452.
- Wu, P.T. Fitschen, P.J., Kistler, B.M., Jeong, J.H., Chung, H.R., & Aviram, M. (2015). Effects of pomegranate extract supplementation on cardiovascular risk factors and physical function in hemodialysis patients. *J. Med. Food*. 18(9), 941–949.
- Yasui, Y., Hosokawa, M., Sahara, T., Suzuki, R., Ohgiya, S., Kohno, H., Tanaka, T., & Miyashit, K. (2005). Bitter gourd seed fatty acid rich in 9c, 11t, 13t-conjugated linolenic acid induces apoptosis and up-regulates the GADD45, p53 and PPAR $\gamma$  in human colon cancer Caco-2 cells. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids*, 73, 113–119.
- Yoshime, L., T., Melo, I., L., P., Sattler, J., A., G., Torres, R., P., & Mancini-Filho, J. (2018). Bioactive compound and the antioxidant capacities of seed oils from pomegranate (*Punica granatum* L.) and bitter gourd (*Momordica charantia* L.). *Food Science and Technology*, 38, 1-10.
- Yuan, G., F., Chen, X., E., & Li, D. 2014. Conjugated linolenic acids and their bioactivities: a review. *Food and Function*, 5 (7), 1360-1368.
- Zhang, Z., Yeung, W. K., Huang, Y., & Chen, Z. Y. (2002). Effect of squalene and shark liver oil on serum cholesterol level in hamsters. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 53, 411–418.

# BÖLÜM 5

## STOKASTİK ERGONOMİK MONTAJ HATTI DENGELEME VE HİYERARŞİK İŞÇİ ATAMASI PROBLEMİ İÇİN BİR MATSEZGİSEL ÖNERİSİ

*Aslıhan KARAŞ ÇELİK<sup>1</sup>*

*Feriştah ÖZÇELİK<sup>2</sup>*

---

1 Aslıhan Kardeş Çelik, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, aslihan.karas@ogu.edu.tr,

ORCID: 0000-0002-7317-447X

2 Feriştah Özçelik, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, fdurmaz@ogu.edu.tr,

ORCID: 0000-0003-0329-203X

## 1. Giriş

Montaj hattı dengeleme (MHD) probleminde, görevlerin iş istasyonlarına iş yükü açısından dengeli bir şekilde atanması amaçlanmaktadır. Problemin en temel halinde, görevlerin işlem sürelerinin kendisini gerçekleştiren işçiden bağımsız olduğu varsayımı bulunmaktadır. Buna bağlı olarak işçilerin iş istasyonlarına atanması dikkate alınmamaktadır. Gerçek hayat uygulamalarında, işçilerin tecrübe ve beceri düzeyi gibi durumlar sebebiyle aynı görevi farklı sürelerde gerçekleştirebildikleri bilinmektedir. Dolayısıyla, yüksek tecrübeye veya beceriye sahip bir işçinin, görevler konusunda daha az yetkin bireylere göre aynı görevi daha hızlı ve güvenli bir biçimde yerine getirdiği söylenebilir.

Klasik MHD problemindeki işlem sürelerinin sabit olduğu varsayımını kaldırarak, görevlerin yanı sıra işçilerin de iş istasyonlarına atandığı iki problem türü literatürde montaj hattı işçi atama ve dengeleme (MHİAD) ve hiyerarşik işçi ataması ile montaj hattı dengeleme (HİAMHD) problemleri olarak bilinmektedir. MHİAD probleminde, herhangi bir görevin işlem süresi her işçiye göre değişmektedir. Bir işçi belirli bir görevi hızlı bir şekilde yapabilirken, farklı bir görevi yavaş gerçekleştiriyor olabilir. Ayrıca, farklı görevleri gerçekleştirme konusunda beceriye sahip olmaması da mümkündür. HİAMHD probleminde ise işçilerin yetenek düzeyleri doğrultusunda hiyerarşik seviyelere ayrıldıkları varsayılmaktadır. İşçiler, MHİAD probleminin aksine bireysel olarak değerlendirilmemektedir. Hiyerarşik yapıda aynı seviyede bulunan, başka bir deyişle aynı yetenek düzeyine sahip olan işçilerin ortak bir görev kümesi konusunda yeteneği bulunmaktadır ve bu görevler için işlem süreleri eşittir.

Montaj hatlarında, benzer işlerin tekrarlı olarak uzun süre yapılması sonucunda işçiler üzerindeki zorlanma etkisi giderek artmaktadır. İşlem süreleri eşit olan görevlerin dahi zorlayıcılık düzeyleri farklılık gösterebilmektedir. Dolayısıyla, bu hatları dengelerken görevlerin yalnızca işlem sürelerini dikkate alarak toplam yükün düzgün dağıtılması tek başına yeterince anlam ifade etmeyebilir. Ergonomik anlamda iyi tasarlanmamış montaj hatları, verimlilik kayıplarının yanı sıra işçilerde meslek hastalıklarına ve kalıcı hasarlara yol açabilir (Baykasoğlu & Akyol, 2014).

HİAMHD literatüründe; bilindiği kadarıyla ergonomik risklerin enküçüklenmesine odaklanılmamıştır. Bu çalışmada, hiyerarşik seviyelere ayrılan işçilerin görevler için zorlanma düzeylerinin rassal değişkenler olduğu yeni bir HİAMHD uzantısı olan stokastik ergonomik HİAMHD (SE-HİAMHD) problemi önerilmektedir. Ergonomik risklerin rassal değişkenler olarak ele alınmasının sebebi, insan doğasından kaynaklı olarak aynı görevin gerçekleştirildiği farklı zamanlarda sağlık durumu, yorgunluk ve dikkat dağınıklığı gibi nedenlere bağlı olarak zorlanma düzeyinin değişkenlik gösterebilmesidir. Çevrim süresinin ve iş istasyonu

sayısının bilindiği ve işçilerin montaj hattına atanması için belirli bir bütçe sınırının bulunduğu durumda hattın ergonomik riskini enküçüklemek amacıyla doğrusal olmayan bir matematiksel model ve yapay arı kolonisi algoritması (YAKA) tabanlı bir matsezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

İzleyen bölümde, MHİAD ve HİAMHD problemleri konusunda literatürde bulunan çalışmaların özetine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, problemin tanımı ve önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı sunulmuştur. Dördüncü bölümde, geliştirilen matsezgisel algoritmanın adımları açıklanmıştır. Beşinci bölümde, literatürden uyarlanan test problemleri ile ilgili bilgilere ve elde edilen sonuçlara değinilmiştir. Altıncı bölümde, genel bir değerlendirilme yapılarak gelecek çalışma önerileri değerlendirilmiştir.

## 2. Literatür Araştırması

MHD problemlerinde, optimize edilmek istenen amaç doğrultusunda genellikle iş istasyonu sayısının (tip-I) veya çevrim süresinin (tip-II) enküçüklenmesine odaklanılır. Tip-I problemde çevrim süresi, tip-II problemde ise hattaki iş istasyonu sayısı önceden bilinmektedir. İstasyon sayısının ve çevrim süresinin eşzamanlı olarak enküçüklenmesi tip-E, bilinen istasyon sayısı ve çevrim süresi için olurlu bir çözüm bulunup bulunmadığının araştırılması ise tip-F problemine karşılık gelmektedir.

Varsayım özellikleri açısından MHD problemleri ise basit MHD ve genel MHD olmak üzere ikiye ayrılır. Basit MHD’de, işlem sürelerinin sabit olması gibi problemin çözümünü kolaylaştıran bazı temel varsayımlar yapılır. Genel MHD problemi ise basit MHD’nin bazı varsayımlarının kaldırılması ve genelleştirilmesiyle ortaya çıkar. Bu sınıftaki problemler, pratikte görülen farklı problem uzantılarını içerir (Kriengkarakot & Pianthong, 2007). Dolayısıyla, genel MHD problemleri endüstriyel uygulamalara daha gerçekçi bir bakış açısı sunar.

İşçilerin tecrübe ve yeteneğe bağlı olarak görevler konusunda farklı performanslara sahip olduğu MHİAD problemi, bir genel MHD problemi uzantısı olup Miralles, Garcia-Sabater, Andres ve Cardós (2007) tarafından önerilmiştir. İlgili çalışmada, iş istasyonu sayısı belirli iken hattın çevrim süresini optimize etmek amacıyla görevlerin ve işçilerin istasyonlara atanması sağlanmıştır. Literatür incelendiğinde, MHİAD problemi konusunda gerçekleştirilen oldukça az sayıda çalışmada, görevlerin işçiler üzerinde oluşturacağı zorlanma etkileri, enerji tüketimi ve ergonomik riskler göz önünde bulundurulmuştur.

Efe, Kremer ve Kurt (2018), hat performansının artırılması amacıyla işçilerin çalışma koşullarının iyileştirilebilmesi için görevlerin işlem sürelerinin yanında yaşa ve cinsiyete bağlı verimli iş yükü farklılıklarının da hesaba katıldığı MHİAD tip-II problemi üzerinde çalışmıştır. Çalışmada, yaşın ve cinsiyetin etkilediği iş yükü kapasitesini

belirleyebilmek için bir regresyon modeli sunularak farklı yaş kategorileri incelenmiştir. Önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı, test problemlerinin ve bir gerçek hayat probleminin çözümünde kullanılmıştır. Sonuçlar, ortalama yaş artışının hattaki iş istasyonunu sayısını artırdığını, hat performansında ve fiziksel iş yükü kapasitesinin kullanım oranında ise düşüşe yol açtığını göstermiştir.

Akyol ve Baykasoglu (2019), ergonomik riskleri hesaba katmanın önemini belirterek ErgoMHİAD problemini önermiştir. Yazarlar, çevrim süresinin yanı sıra ergonomik risklerle ilgili dört farklı performans kriterini optimize etmeye yönelik çok amaçlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, problemin çözümü için öncelikli hedef programlama yaklaşımı ve kural tabanlı kurma temelli rassallaştırılmış arama algoritması kullanılmıştır. Yapılan testler ile işçiler için iş ortamlarının ergonomik koşullarının makul bir çevrim süresi artışı ile geliştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Zhang, Tang, Ruiz ve Zhang (2020), görevlerin ve işçilerin verimli bir şekilde atanması ve ergonomik risklerin azaltılması hedeflerinin genellikle birbiriyle ilişkili olmadığını savunarak, U-tipi montaj hatlarında çevrim süresini ve ergonomik riskleri eşzamanlı olarak enküçükleme amacıyla açgözlü bir algoritma önermiştir.

Liu, Liu, Chu, Zheng ve Chu (2021), belirli bir çevrim süresi altında ürünlerin çizelgelenmesinde ve farklı performanslara sahip işçilerin iş istasyonlarına atanmasında enerji tüketimini dikkate alan çok amaçlı bir MHİAD çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışmada, toplam maliyetin ve enerji tüketiminin enküçüklenmesi için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli formüle edilmiştir. Küçük boyutlu örneklerin baskın çözümlerini elde edebilmek amacıyla  $\epsilon$ -kısıt yöntemi kullanılmıştır. Büyük boyutlu problemler için sezgisel bir yaklaşım, genetik algoritma ve tavlama benzetimi algoritması önerilmiştir.

Ghorbani, Keivanpour, Sekkay ve Imbeau (2024), bulanık ErgoMHİAD tip-F problemini tanıtmıştır. Çalışmada, kurucu bir sezgisel ile bir ergonomik risk değerlendirme yöntemini bütünleştiren iki aşamalı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin performansı, farklı boyutlardaki test problemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Genel MHD probleminin farklı bir uzantısı olarak işçiler arasındaki performans farklılıklarının hiyerarşik seviyelere bağlı olarak ele alındığı problem türü ise HİAMHD problemidir. Bu problemde, işçiler yetenek düzeylerine göre hiyerarşik seviyelere ayrılmaktadır. Belirli bir seviyedeki bir işçi, kendisinden daha az yetenekli işçilerin yapabildiği tüm görevleri daha kısa işlem sürelerinde gerçekleştirebilir. Yetenek düzeyi daha düşük olan gruptaki işçiler, daha az sayıda görevi gerçekleştirebilmekte ve yapabildikleri görevler için daha uzun işlem sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Yetenek düzeyi arttıkça, ilgili gruptaki işçilerin maliyeti yükselmektedir.

HİAMHD problemini literatüre Sungur ve Yavuz (2015) kazandırmıştır. Bu problem türünde, daha kalifiye bir işçi, daha yüksek maliyetle daha düşük yetenek düzeyinde olanların yerine geçebilir. Ancak, bu durumun tersi geçerli değildir. Yetenek düzeyi yüksek olan işçiler daha yüksek maliyet gerektirdiğinden, dengeleme kararı toplam maliyeti etkilemektedir. Yazarlar, problemi önerdikleri çalışmada, çevrim süresinin bilindiği durumda hattın işçilik maliyetini optimize etmeyi amaçlamış ve problemin çözümü için bir matematiksel modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Önerilen yaklaşım, literatürde bulunan basit MHD tip-I problemlerinden uyarlanan test problemleri kullanılarak sınanmıştır.

Yıldız, Yıldız ve Okyay (2020), paralel iş istasyonlarının bulunduğu HİAMHD problemi üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada, konum ve görev atama kısıtları ile problemin kısıt yapısı genişletilmiştir. Çalışmada, tamsayılı programlama modeline ek olarak yerel arama ile melezlenmiş tavlama benzetimi algoritması önerilerek iş istasyonu açma ve işçilik maliyetlerinin toplamının enküçüklenmesi sağlanmıştır.

Campana, Iori ve Moreira (2022), HİAMHD tip-I probleminin çözümü için bir matematiksel programlama modeli, büyük boyutlu örnekler için farklı öncelik kurallarına dayanan kurucu bir sezgisel ve değişken komşuluk iniş algoritması geliştirmiştir. Sungur ve Yavuz (2015) tarafından türetilen küçük ve orta boyutlu test problemleri ve çalışma kapsamında türetilen büyük boyutlu örnekler üzerinde önerilen yöntemlerin performansını değerlendirmiştir.

İşık ve Yıldız (2023), U-tipi HİAMHD problemini önermiş ve problemi çözmek için bir tamsayılı doğrusal programlama modeli ve bir kısıt programlama modeli geliştirilmiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşımların güçlü yönlerini birleştirmek amacıyla kısıt programlama modelinden elde edilen olurlu çözümün tamsayılı doğrusal modelde başlangıç çözüm olarak kullanılmasını içeren bir başlangıç prosedürü uygulanmıştır. Literatürde bulunan test problemleri, problemin düz ve U-tipi versiyonlarını çözmek için kullanılmıştır.

Karaş Çelik ve Özçelik (2024), problemin tip-II türünü önermiş ve belirli iş istasyonu sayısı için hattın çevrim süresini ve toplam işçilik maliyetini enküçüklemek amacıyla çok amaçlı bir matematiksel modelleme yaklaşımı geliştirmiştir. Amaçları ağırlıklı toplam yöntemiyle birleştiren yazarlar, literatürden uyarladıkları test problemlerini kullanarak farklı ağırlık setleri ile sayısal deneyler gerçekleştirmiştir.

Kang, Lee ve Su (2025), karma modelli HİAMHD tip-II problemi üzerinde çalışarak çevrim süresinin ve toplam işçilik maliyetlerinin eşzamanlı olarak optimize edilmesi için bir matematiksel model ve iki çok amaçlı meta-sezgisel önermiştir. Bu yaklaşımlar, beş farklı vaka çalışması üzerinde test edilmiştir.

HİAMHD alanında araştırmalarda deterministik yapının ele alındığı ve işçiler açısından ergonomik riskleri dikkate alan bir çalışmanın

gerçekleştirilmediği görülmektedir. Bu çalışmada, literatürdeki boşluğu doldurmak amacıyla ergonomik risklerin stokastik yapıda olduğu SE-HİAMHD tip-F problemi önerilmektedir. Çalışmanın bir başka katkısı, HİAMHD literatüründeki ilk matsezigisel çözüm yaklaşımını sunmasıdır.

### 3. Problemin Tanımı ve Matematiksel Model

Bu çalışmada önerilen SE-HİAMHD problemi, HİAMHD probleminin bir türüdür. HİAMHD’de işçiler tecrübe ve yetenek düzeyleri doğrultusunda farklı gruplara ayrılmaktadır. Bu gruplar, hiyerarşik seviyeler olarak ele alınmıştır. Kalifiye düzeyi daha yüksek olan bir işçi grubu, diğer işçilere göre daha fazla görev yapma yetisine sahiptir. Birden fazla seviyenin yapması için uygun olan görevler konusunda ise daha kalifiye işçilerin işlem süresi daha kısadır. İşçilik maliyetleri de seviyeler arasında farklılık göstermektedir.

SE-HİAMHD probleminde, düz bir montaj hattında tek modellenen üretimin yapıldığı varsayılmıştır. İstasyon sayısı ve çevrim süresi önceden bilinmektedir. Tüm istasyonlar gerekli ekipmanlarla donatılmıştır ve farklı seviyelerdeki işçilerin sayısı sınırsızdır. Montaj hattının farklı istasyonlarında aynı veya farklı seviyelerde birer işçi çalışabilir. Her bir işçilik seviyesi bazında görevler için ihtiyaç duyulan işlem süreleri ve işçilerin maliyetleri deterministiktir. Görevlerin işlem süreleri ve işçilik maliyetlerinin yanı sıra belirli bir görev için işçilerin maruz kaldıkları ergonomik yükler işçi seviyelerine göre değişmektedir. Kalifiye düzeyi düştükçe, tecrübe ve yeteneğe bağlı olarak işçilerin zorlanma düzeyinin yani ergonomik yükün arttığı varsayılmıştır. Her bir görev için belirli bir seviyedeki bir işçinin zorlanma düzeyi, normal dağılıma uyan rassal bir değişkendir. Bir istasyonun ergonomik yükü, ilgili istasyona atanan görevlerin o istasyonun işçisi üzerinde oluşturduğu toplam ergonomik yüke karşılık gelmektedir. Ergonomik açıdan en büyük yüke sahip istasyonun yükü, montaj hattının ergonomik riskini oluşturmaktadır. Hattın ergonomik riskini en küçüklemek için doğrusal olmayan bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin notasyonları aşağıdaki gibidir.

#### Notasyonlar

$i, j$ : görev

$s$ : iş istasyonu

$h$ : işçi yetenek seviyesi

$P_i$ :  $i$  görevinin bitişik öncüllerinin kümesi

$K_i$ :  $i$  görevini yapabilen işçi seviyelerinin kümesi

$T$ : görev sayısı

$S$ : iş istasyonu sayısı

$H$ : işçi yetenek seviyesi sayısı

$t_{ih}$ :  $i$  görevinin  $h$  seviyesindeki bir işçi açısından işlem süresi

$\mu_{ih}$ :  $i$  görevinin  $h$  seviyesindeki bir işçi açısından ergonomik riskinin

ortalaması

$\sigma_{ih}$ :  $i$  görevinin  $h$  seviyesindeki bir işçi açısından ergonomik riskinin standart sapması

$c_h$ :  $h$  seviyesindeki bir işçinin maliyeti

$CS$ : çevrim süresi

$x_{ish}$ :  $i$  görevi iş istasyonu  $s$ 'de  $h$  seviyesinde bir işçiye atanırsa 1; dd 0

$y_{sh}$ : iş istasyonu  $s$ 'ye  $h$  seviyesinde bir işçi atanırsa 1; dd 0

$ER$ : hattın ergonomik riski

Ağpak ve Gökçen (2007), Pınarbaşı ve Alakaş (2020) ve Şahin ve Tural (2023) çalışmalarında işlem süreleri normal dağılıma uyan rassal değişkenler olarak ele alınmış ve her bir istasyonun iş yükünün, çevrim süresini aşma olasılığı  $(1-\alpha)$ 'yı aşmayacak şekilde çevrim süresinin optimizasyonu amacıyla şans kısıtlı modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmada ele alınan problemde, benzer şekilde her bir istasyonun ergonomik yükünün, risk sınırını aşma olasılığının  $(1-\alpha)$ 'ya eşit veya bu değerden daha düşük olması istenmektedir. Hattın riskinin istenen koşullar altında enküçüklenebilmesi için ilgili çalışmalarda kullanılan yaklaşım uygulanmıştır. Buna göre ergonomik riskler normal dağılıma uyan rassal değişkenler olduğundan bir istasyona atanan görevlerin toplam riski de normal dağılır. Her bir istasyonun ergonomik yükü ( $IR_s$ ),  $\alpha$  olasılıkla  $ER$ 'ye eşit veya daha düşük olmalıdır (Denklem (1)).  $IR_s$ 'nin ortalaması ve standart sapması sırasıyla  $\mu_s$  ve  $\sigma_s$  iken Denklem (1),  $Z$  dönüşümü ile Denklem (2) halini alır. Burada,  $Z \sim N(0,1)$ .  $\Phi(\cdot)$  standart normal dağılımın birikimli dağılım fonksiyonu kullanılarak Denklem (3) izleyen şekilde yazıldıktan sonra Denklem (4) elde edilir.  $\Phi^{-1}(\alpha)$  değeri, istenen  $\alpha$  güven seviyesine göre belirlenir. Örneğin,  $\alpha$  %90 iken bu değer 1,285 iken %95 olduğunda 1,645'e eşittir.  $IR_s$ ,  $s$  istasyonuna atanan görevlerin o istasyonun işçisi açısından zorlanma düzeylerinin toplamından oluşur. Bu durumda, bir  $s$  istasyonunun ergonomik yükü  $IR_s \sim N(\sum_i \sum_h \mu_{ih} x_{ish}, \sum_i \sum_h \sigma_{ih}^2 x_{ish})$  olur. Karar değişkenleri eklendiğinde ise Denklem (5) elde edilir.

$$P(IR_s \leq ER) \geq \alpha \quad \forall s \quad (1)$$

$$P(Z \leq \frac{ER - \mu_s}{\sqrt{\sigma_s^2}}) \geq \alpha \quad \forall s \quad (2)$$

$$\frac{ER - \mu_s}{\sqrt{\sigma_s^2}} \geq \Phi^{-1}(\alpha) \quad \forall s \quad (3)$$

$$ER \geq \mu_s + \Phi^{-1}(\alpha) \cdot \sqrt{\sigma_s^2} \quad \forall s \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_h \mu_{ih} * x_{ish} + \Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_i \sum_h \sigma_{ih}^2 * x_{ish}} \leq ER \quad \forall s \quad (5)$$

SE-HİAMHD için önerilen model, Karaş Çelik ve Özçelik (2024) çalışmasında tip-II HİAMHD versiyonu için sunulan modele ergonomik risklerin ve bütçe kısıtının dahil edilmesiyle geliştirilmiştir.

### Matematiksel model

$$\sum_i \sum_h \mu_{ih} * x_{ish} + \Phi^{-1}(\alpha) \sqrt{\sum_i \sum_h \sigma_{ih}^2 * x_{ish}} \leq ER \quad \forall s \quad (5)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in K_i} x_{ish} = 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{h \in K_i} x_{ish} \geq 1 \quad \forall s \quad (7)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} = 1 \quad \forall s \quad (8)$$

$$\sum_{i \in T} x_{ish} \leq M * y_{sh} \quad \forall s, h \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in K_i} s * x_{ish} \leq \sum_{s \in S} \sum_{h \in K_j} s * x_{jsh} \quad \forall i, j \mid i \in P_j \quad (10)$$

$$\sum_{i \in T} t_{ih} * x_{ish} \leq CS \quad \forall s, h \quad (11)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_h * y_{sh} \leq B \quad (12)$$

$$x_{ish}, y_{sh} \in \{0,1\} \quad \forall i, s, h \quad (13)$$

$$ER \geq 0 \quad (14)$$

*kısıtları altında*

$$\text{enk } z = ER \quad (15)$$

Kısıt (5),  $\alpha$  güven seviyesinde istasyonların ergonomik yükünün  $ER$  değerini aşmamasını garanti eder. Bu kısıt, doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Kısıt (6), her görevin bir iş istasyonuna ve görevi yapabilecek seviyede olan bir işçiye atanmasını sağlar. Kısıt (7), her istasyona en az bir görev atanmasını ve Kısıt (8) ise her istasyona bir işçinin atanmasını kontrol eder. Kısıt (9),  $x_{ish}$  ve  $y_{sh}$  karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi kurar.  $M$ , yeterince büyük bir sayıdır ( $\sum_{i \in T} \sum_{h \in H} t_{ih} < M$ ). Kısıt (10), görevler arasındaki öncelik ilişkileri kısıtıdır. Kısıt (11), her bir istasyonun

o istasyonda çalışan işçinin seviyesi açısından toplam iş yükünün çevrim süresini aşmasının önüne geçer. Kısıt (12), atanan işçilerin seviyelerine göre toplam işçilik maliyetinin bütçeyi aşmasını önler. Kısıt (13) ve (14), karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır. Modelin amaç fonksiyonu (15), hattın ergonomik riskini enküçükler.

#### 4. Geliştirilen Matsezigisel Algoritma

Problemin çözümü için geliştirilen matematiksel model doğrusal olmadığından, problem boyutu büyüdükçe çözüm elde etmek zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, makul süreler içinde kaliteli çözümler elde edebilmek için YAKA tabanlı bir matsezigisel önerilmektedir.

YAKA, Karaboğa (2005) tarafından arıların besin arayış sürecine öykünerek geliştirilen bir sürü zekası optimizasyon algoritmasıdır. Komşuluk tabanlı yapısı sayesinde MHD probleminin kısıtlarıyla baş etme konusunda avantaj sağlamaktadır. Bu algoritmada; görevli, gözcü ve kaşif olmak üzere üç arı grubu bulunmaktadır ve besin kaynakları çözümleri temsil etmektedir. Bir kaynağın kalitesi, karşılık gelen çözümün başarısını ifade etmektedir. Bu algoritma, kaşif arıların arama uzayında rassal olarak besin kaynakları aramasıyla başlar. Popülasyon büyüklüğü ( $NP$ ) olarak ifade edilen besin kaynağı sayısına ulaşıldıktan sonra, görevli arılar her bir kaynağın komşuluğunda daha kaliteli kaynaklar arar ve daha kaliteli komşu kaynaklar bulunduğu durumda mevcut olanların yerine popülasyona dahil edilir. Ardından, gözcü arılar seçilen kaynakların komşuluğunda arama işlemine devam eder. Bir kaynağın komşuluğunda daha kaliteli olanları bulmak için bir ardışık deneme limiti ( $L$ ) bulunur. Belirlenen  $L$  değeri kadar ardışık denemenin ardından bir kaynağın komşuluğunda daha kaliteli başka bir kaynak bulunamıyorsa, mevcut olan terk edilir ve yerine kaşif arılar rassal olarak yeni bir kaynak bulur. Süreç boyunca popülasyondaki en kaliteli kaynak hafızada tutulur ve daha başarılı bir kaynak bulunması durumunda güncelleme yapılır.

#### 4.1. Çözümlerin Gösterimi

Önerilen algoritmada çözümler iki parçalı bir vektör ile temsil edilmektedir. Vektörün ilk parçası, görevlerin hangi istasyonlara atandığını, diğer parçası ise istasyonlarda çalışan işçilerin seviyelerini gösterir. 10 görev ve 4 iş istasyonundan oluşan örnek bir çözüm vektörü Şekil 1'de verilmiştir.

1	2	2	3	1	2	4	4	3	4	2	1	1	3
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Şekil 1. Örnek çözüm vektörü

#### 4.2. Başlangıç Popülasyonu Oluşturma

Algoritmanın ilk adımı,  $NP$  adet başlangıç çözümlerin oluşturulmasıdır. Bir başlangıç çözüm elde ederken, popülasyonda

çeşitlilik sağlamak için her bir istasyonda kaçar adet görev olacağı rassal olarak belirlenir. Bu sayılar belirlenirken, istasyonlardaki görev sayılarının toplamının ilgili problemin toplam görev sayısına eşit olması sağlanır. Her adımda, öncelik ilişkileri açısından atanabilir görevler arasından biri rassal olarak seçilerek mevcut istasyona tahsis edilir. İlgili istasyonun görev kapasitesi dolduğunda atamalar bir sonraki istasyona yapılır ve aynı adımlar tüm görevler atanana kadar devam eder.

Görevlerden sonra işçilerin istasyonlara tahsisi gerçekleştirilir. Bu adım, algoritma içinde bir matematiksel model çözülmesiyle yapılır. Bu durum, algoritmanın bir matsezgisel olmasını sağlamaktadır. Bu model, bir önceki aşamada belirlenen görev-iş istasyonu atamalarını dikkate alarak mevcut atamalar için çevrim süresi ve bütçe kısıtlarını sağlayan ve hattın ergonomik riskini enküçükleyen işçi atamalarının yapılması için kullanılır. Algoritma içinde çalışan model,  $s$  istasyonuna  $h$  seviyesindeki bir işçi atanırsa ilgili istasyonda oluşacak toplam iş yükü ( $isyuk_{sh}$ ) ile toplam ergonomik yükün ortalamasını ( $ort_{sh}$ ) ve standart sapmasını ( $std_{sh}$ ) girdi olarak kullanır. Modelde,  $w_{sh}$  karar değişkeni  $s$  istasyonuna  $h$  seviyesindeki bir işçi atanırsa 1, diğer durumlarda ise sıfır değerini alır. Diğer notasyonlar Bölüm 3'te sunulan modeldeki ile aynıdır.

### İşçi atama modeli

$$\sum_{h \in H} ort_{sh} * w_{sh} + \sqrt{\sum_{h \in H} std_{sh}^2 * w_{sh}} \leq ER \quad \forall s \quad (16)$$

$$\sum_{h \in H} w_{sh} = 1 \quad \forall s \quad (17)$$

$$\sum_{h \in H} isyuk_{sh} * w_{sh} \leq CS \quad \forall s \quad (18)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_h * w_{sh} \leq B \quad (19)$$

$$w_{sh} \in \{0,1\} \quad \forall s, h \quad (20)$$

$$ER \geq 0 \quad (21)$$

*kısıtları altında*

$$enk z = ER \quad (22)$$

İşçi atama modelinde, Kısıt (16)  $\alpha$  güven seviyesinde iş istasyonlarında aşılmayacak minimum ergonomik yükü belirler. Kısıt (17), her bir istasyona belirli seviyeden birer işçi atar. Kısıt (18) çevrim süresi

kısıtı iken Kısıt (19) ise bütçenin aşılmamasını sağlar. Kısıt (20) ve (21), işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (22), mevcut görev atamaları için hattın ergonomik riskini enküçükler.

Görevler istasyonlara atandıktan sonra işçi atama modeli çalıştırılarak kısıtlara uyan en iyi işçi atamaları elde edilmeye çalışılır. Eğer mevcut görev atamaları için olurlu çözüm bulunamıyorsa, görevlerin istasyonlara atanması adımına dönülür.  $NP$  kadar başlangıç çözüme ulaşıldıktan sonra popülasyondaki en iyi çözüm hafızada tutularak görevli arı aşamasına geçilir.

#### 4.3. Görevli Arı Aşaması

Görevli arı aşamasında, popülasyondaki her çözüm için birer komşu çözüm bulunur. Bir komşu çözüm; bir görevin istasyonunun değişimi, iki görevin karşılıklı istasyonunun değişimi, bir istasyonun işçi seviyesinin değişimi ve iki istasyon arasında karşılıklı işçi seviyesi değişimi komşuluk operatörlerinden biri seçilerek gerçekleştirilir. Değişim veya takas işlemi yapılmadan önce kısıtların sağlanıp sağlanmayacağı kontrol edilir. Böylelikle, ilgili operatörler yalnızca olurlu çözümlere ulaşmayı sağlayacak hareketlere izin verir. Bir çözümün komşusu bulunduktan sonra bu çözümler kıyaslanır. Komşu çözüm daha başarılıysa, mevcut olanın yerini alır ve çözümün başarısız deneme sayısı sifıra eşitlenir. Aksi durumda, mevcut olan korunur ve başarısız deneme sayısı bir birim artar.

#### 4.4. Gözcü Arı Aşaması

Gözcü arı aşamasında ise her adımda popülasyondan iki çözüm seçilerek turnuva seçimi yöntemi uygulanır. Daha iyi olan çözüm için bir önceki aşamada kullanılan operatörlerden biri kullanılarak bir komşu çözüm bulunur. Komşu çözüm kabul kriteri görevli arı aşamasındaki ile aynıdır. Bu adımlar,  $NP$  kez tekrarlanır.

#### 4.5. Kaşif Arı Aşaması

Kaşif arı aşamasında, başarısız deneme sayısı değeri belirlenen  $L$  değerini aşan çözümler popülasyondan çıkarılır. Bunların yerine yeni birer çözüm bulunur ve popülasyona dahil edilir. Yeni çözümlerin başarısız deneme sayıları sifıra eşit olur. Kaşif arı aşamasından sonra bir önceki iterasyonun sonunda hafızada bulunan en iyi çözümün güncellenip güncellenmediği kontrol edilir. Eğer daha başarılı bir çözüm bulunabilmişse başarısız iterasyon sayısı sifıra eşitlenir. Aksi durumda, değeri bir birim artar. Başarısız iterasyon sayısı değeri belirlenen ardışık başarısız iterasyon sınırını ( $IT$ ) aştıysa algoritma sonlanır. Bu değer aşılmadıysa, görevli arı aşamasına dönülür. Algoritmanın sözde-kodu Şekil 2'de verilmiştir.

---

Parametreleri ayarla

While (Ardışık başarısız iterasyon  $< IT$ )

For  $i = 1: NP$

$i$ . başlangıç çözümün görev atamalarını belirle

$i$ . başlangıç çözümün görev atamalarını işçi atama modeline vererek işçi atamalarını belirle

End For

Eldeki en iyi çözümü belirle ve hafızada tut

For  $i = 1: NP$

$i$ . çözümün komşusunu bul

If (Bulunan komşu çözüm, mevcut  $i$  çözümünden daha iyiyse)

Çözümü güncelle ve çözüme ait başarısız deneme sayısı değerini sıfıra eşitle

If (Bulunan çözüm eldeki en iyi çözümünden daha iyiyse)

Eldeki en iyi çözümü güncelle

End If

Else

Çözümün başarısız deneme sayısı değerini bir birim artır

End If

End For

For  $i = 1: NP$

İkili turnuva seçimi ile bir  $j$  çözümü seç

$j$ . çözümün komşusunu bul

If (Bulunan komşu çözüm, mevcut  $j$  çözümünden daha iyiyse)

Çözümü güncelle ve çözüme ait başarısız deneme sayısı değerini sıfıra eşitle

If (Bulunan çözüm eldeki en iyi çözümünden daha iyiyse)

Eldeki en iyi çözümü güncelle

End If

Else

Çözümün başarısız deneme sayısı değerini bir birim artır

End If

End For

For  $i = 1: NP$

If ( $i$ . çözümün başarısız deneme sayısı değeri  $> L$ )

Çözüm  $i$ 'yi terk et ve yerine başka bir çözüm bul

If (Bulunan çözüm eldeki en iyi çözümünden daha iyiyse)

Eldeki en iyi çözümü güncelle

End If

End If

End For

---

---

```

If (İterasyon sonunda eldeki en iyi çözüm güncellendiyse)
  Ardışık başarısız iterasyon sayısını sifıra eşitle
Else
  Ardışık başarısız iterasyon sayısını bir birim artır
End If

```

---

End While

---

Şekil 2. Algoritmanın sözde-kodu

## 5. Elde Edilen Sonuçlar

Literatürde SE-HİAMHD problemi için veri seti bulunmadığından, basit MHD için sunulan Roszieg, Buxey, Wee-Mag ve Mukherje test problemleri referans alınarak uyarlanmıştır. Test problemlerinde, görev sayıları ( $N$ ) ve görevler arasındaki öncelik ilişkileri literatürle uyumlu şekilde kullanılmıştır. İş istasyonu sayıları ( $S$ ) ve çevrim süresi ( $CS$ ) değerleri, her bir karşılaştırma örneğinin olurlu çözüm verebileceği değerler arasından seçilmiştir.

Sungur ve Yavuz (2015) çalışmasında olduğu gibi işçilerin üç yetenek seviyesine ayrıldığı varsayılmıştır. En yetenekli grup olan 1. seviye işçilerin maliyeti 100 para birimi olarak seçilmiş, 2. ve 3. seviye işçiler için maliyet katsayıları sırasıyla 70 ve 49 para birimi olarak alınmıştır. Görevlerin %20'si 1. seviye, %30'u 2. seviye ve kalan %50'si ise 3. seviye işçilik gerektirdiği varsayılmıştır.

Seçilen test problemlerinden her görevin işlem süresi 1. seviye işçilerin işlem süresi olarak alınmıştır. Farklı operatör tiplerinin montaj hatlarına atanmasını içeren Karaş Çelik ve Özçelik (2025) çalışmasındaki yaklaşımla paralel olarak işçilik seviyeleri arasında işlem süreleri açısından 1,5 kat olduğu varsayılmıştır. Farklı seviyelerdeki işçilerin her bir görev için ergonomik risk değerlerinin ortalaması, Karaş Çelik ve Özçelik (2025) çalışmasındaki deterministik ergonomik risk değerlerine eşit olarak alınmıştır. İlgili verilerde, her bir görev için risk değerleri 1 ile 10 arasında tamsayılar olup, aynı görev için 1. seviye işçiler diğer gruplardan daha düşük risk değerlerine sahiptir. Benzer şekilde, 2. seviyedeki işçiler 3. seviyedekilerden daha az riske maruz kalmaktadır. Ergonomik risk değerlerinin standart sapmalarını hesaplamak için Denklem (23)'teki gibi ortalama risk değerleri değişim katsayıları ( $cv$ ) ile çarpılmıştır.

$$\sigma_{ih} = cv * \mu_{ih} \quad \forall i, h \quad (23)$$

Roszieg, Buxey, Wee-Mag ve Mukherje problem gruplarının her biri için ikişer farklı bütçe ( $B$ ),  $cv$  ve  $\alpha$  değeri göz önünde bulundurularak, grup

başına sekizer farklı problem elde edilmiştir. Böylelikle, toplam 32 test problemi türetilmiştir. Problem gruplarına ait detaylar Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Test problemlerinin özellikleri

Grup	$N$	$S$	$CS$	$cv$		$\alpha$		$B$	
Roszieg	25	4	50	0,2	0,4	%90	%95	300	350
Buxey	29	6	100	0,2	0,4	%90	%95	400	450
Wee-Mag	75	12	200	0,2	0,4	%90	%95	1000	1100
Mukherje	94	14	500	0,2	0,4	%90	%95	1200	1300

Ele alınan problemin çözümü için geliştirilen model, Intel Core i5 1.80GHz işlemcisi, 8 GB belleği bulunan ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda GAMS programı ile kodlanmış ve BARON çözücüsü kullanılmıştır. Her problem için modele 1800 saniye süre limiti verilmiştir.

Önerilen matsezgisel algoritma, MATLAB 2023b programında geliştirilmiş, algoritmanın içinde bulunan modeli çözmek için MATLAB’ın intlinprog çözücüsü kullanılmıştır. Algoritmada farklı problem grupları için seçilen parametre değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Her bir problem için algoritma 5 kez koşturulmuştur.

Tablo 2. Algoritmada kullanılan parametre değerleri

Parametre	$NP$	$L$	$IT$
Roszieg	20	20	2000
Buxey	20	20	2000
Wee-Mag	50	50	5000
Mukherje	50	50	5000

Matematiksel modelin ve matsezgisel algoritmanın toplam 32 test problemi kullanılarak sınanmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 3’te yer almaktadır. İlgili tablonun ilk beş sütununda probleme ait bilgiler yer almaktadır. 6. ve 7. sütunlarda, sırasıyla matematiksel model ve matsezgisel ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri bulunmaktadır. İlgili problem için modelin süre limiti içinde bulunduğu, matsezgiselin ise yaptığı beş tekrar içinde elde ettiği en başarılı değerler sunulmuştur. İlgili problem için bu yöntemler ile ulaşılan en başarılı değerler koyu renk ile gösterilmiştir. Son iki sütunda ise saniye cinsinden çözüm sürelerine yer verilmiştir. Matematiksel modelin çözüm süresinin 1800 saniyenin altında olduğu durumlarda optimal çözüm elde edilmiştir. Modelin süre limiti içinde çözüm bulamadığı durumlar ise “-” ile ifade edilmiştir.

Tablo 3. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Problem grubu	Problem özellikleri				ER		Çözüm süresi	
	Sıra	$cv$	$\alpha$	$B$	Model	Matsezi sel	Model	Matsezi sel
Roszieg	1	0,2 0	%9 0	300	<b>40,18</b>	<b>40,18</b>	4,66	2,61
	2	0,2 0	%9 0	350	<b>35,19</b>	<b>35,19</b>	3,78	0,27
	3	0,2 0	%9 5	300	<b>41,35</b>	<b>41,35</b>	4,00	2,26
	4	0,2 0	%9 5	350	<b>36,08</b>	<b>36,08</b>	3,36	0,38
	5	0,4 0	%9 0	300	<b>44,35</b>	<b>44,35</b>	5,55	1,41
	6	0,4 0	%9 0	350	<b>38,38</b>	<b>38,38</b>	4,61	0,34
	7	0,4 0	%9 5	300	<b>46,69</b>	<b>46,69</b>	4,78	2,33
	8	0,4 0	%9 5	350	<b>40,17</b>	<b>40,17</b>	3,67	0,38
Buxey	9	0,2 0	%9 0	400	<b>37,96</b>	<b>37,96</b>	1019,06	24,25
	10	0,2 0	%9 0	450	33,51	<b>32,12</b>	1800,00	1,61
	11	0,2 0	%9 5	400	<b>39,08</b>	<b>39,08</b>	1376,20	23,68
	12	0,2 0	%9 5	450	34,08	<b>32,99</b>	1800,00	1,41
	13	0,4 0	%9 0	400	<b>41,93</b>	<b>41,93</b>	653,80	13,91
	14	0,4 0	%9 0	450	36,57	<b>35,23</b>	1800,00	1,26
	15	0,4 0	%9 5	400	<b>44,15</b>	<b>44,15</b>	650,89	25,27
	16	0,4 0	%9 5	450	38,69	<b>36,98</b>	1800,00	2,05
Wee-Mag	17	0,2 0	%9 0	100	-	<b>35,15</b>	1800,00	204,37
	18	0,2 0	%9 0	110	-	<b>32,95</b>	1800,00	89,45
	19	0,2 0	%9 5	100	-	<b>36,03</b>	1800,00	142,38

	20	0,2 0	%9 5	110 0	50,0 4	<b>33,78</b>	1800, 00	196,63
	21	0,4 0	%9 0	100 0	-	<b>38,38</b>	1800, 00	177,63
	22	0,4 0	%9 0	110 0	-	<b>35,91</b>	1800, 00	72,56
	23	0,4 0	%9 5	100 0	-	<b>40,28</b>	1800, 00	164,19
	24	0,4 0	%9 5	110 0	-	<b>38,11</b>	1800, 00	104,32
Mukherje	25	0,2 0	%9 0	120 0	-	<b>37,11</b>	1800, 00	222,73
	26	0,2 0	%9 0	130 0	-	<b>35,15</b>	1800, 00	213,47
	27	0,2 0	%9 5	120 0	-	<b>37,98</b>	1800, 00	330,23
	28	0,2 0	%9 5	130 0	-	<b>36,03</b>	1800, 00	213,19
	29	0,4 0	%9 0	120 0	-	<b>40,70</b>	1800, 00	336,26
	30	0,4 0	%9 0	130 0	-	<b>38,30</b>	1800, 00	192,61
	31	0,4 0	%9 5	120 0	-	<b>42,05</b>	1800, 00	123,94
	32	0,4 0	%9 5	130 0	-	<b>40,06</b>	1800, 00	228,19

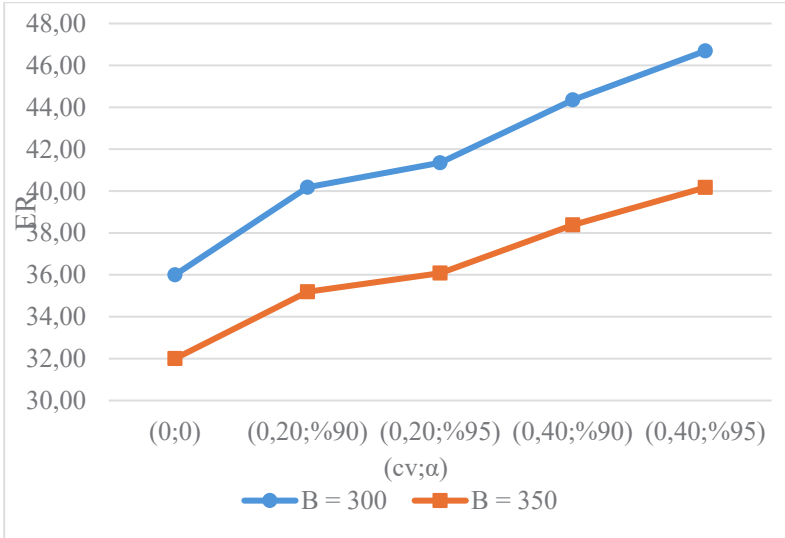
Elde edilen sonuçlara göre en küçük boyutlu grup olan Roszieg problemleri için matematiksel model optimal çözümlere ulaşabilmiştir. Önerilen matsezigisel algoritma, aynı örnekler için eşit çözüm değerlerine erişmeyi başarmıştır. Matematiksel model, Buxey grubundan dört problemi optimal olarak çözerken, kalan dört problem için süre limiti içinde olurlu çözümler elde etmiştir. Algoritma ise modelin bulunduğu optimal çözümleri daha kısa süreler içinde elde ederken, diğer problemler için daha başarılı çözümler bulmuştur. Matematiksel model, büyük boyutlu Wee-Mag problemlerinden yalnızca bir tanesini süre limiti içinde çözebilmiş, kalan Wee-Mag problemleri ve Mukherje grubundaki problemlerin hiçbiri için çözüm bulamamıştır. Bu problemler için algoritma oldukça makul süreler içinde çözüm elde etmiştir. Önerilen matsezigisel başarıları, kesin ve yaklaşık çözüm yöntemlerinin avantajlı yönlerini birlikte kullanmayı sağlayan bir yaklaşım olmasından kaynaklanmaktadır. Görev ve işçi atama olmak üzere iki atama kararı

içeren SE-HİAMHD probleminin farklı atama kararlarında rassal aramayı ve en iyi işçi atamalarını elde etmede matematiksel modellemeyi kullanmasıyla, doğrusal olmayan programlama yaklaşımına üstünlük sağlamıştır.

Kullanılan parametre değerlerinin amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkisini görebilmek için modelin optimal çözümler elde edebildiği Roszieg problem grubu ayrıca ergonomik riskler deterministik olarak ele alınarak da çözülmüştür. Bu durumda,  $e_{ih} = \mu_{ih}$  alınarak Kısıt (5) yerine Kısıt (24) kullanılmıştır.

$$\sum_i \sum_h e_{ih} * x_{ish} \leq ER \quad \forall s \quad (24)$$

Şekil 3, Roszieg problem grubu için farklı parametre kombinasyonlarıyla elde edilen sonuçları göstermektedir. Ergonomik risklerin deterministik olarak ele alındığı durum yatay eksende (0;0) ile ifade edilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere problemin ergonomik risklerin doğası açısından farklı şekilde çözülmesi sonuçları etkilemektedir. Diğer parametre değerleri açısından karşılaştırma yapıldığında, bütçenin daha yüksek olduğu durumlarda hattın ergonomik riskinin düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, bütçe artışının daha kalifiye işçileri atamaya olanak tanınmasından kaynaklanmaktadır. Değişkenliğin artması ise hattın riskinin artmasına sebep olmaktadır. Benzer şekilde, güven seviyesi daha yüksek olduğunda amaç fonksiyonu değeri yükselmektedir.



Şekil 3. Farklı parametre değerlerine göre amaç fonksiyonu değerinin değişimi

## 6. Sonuç

HİAMHD problemi işçilerin beceri ve tecrübeleri doğrultusunda farklı yetilere ve işlem sürelerine sahip olduklarını ele almasına karşın, bu konuda yapılan çalışmalarda gerçek uygulamalarda oldukça önemli olan ergonomik riskler genellikle göz ardı edilmektedir. Oysaki montaj hatlarında, istasyonlardaki yükü yalnızca işlem süreleri açısından dengelemek, işçilerin üzerinde oluşacak yorgunluk ve zorlanma etkilerini azaltmada tek başına yeterli olmamaktadır. İşlem süresi kısa olan ancak yüksek dikkat gerektiren bir görev, daha uzun işlem süresine sahip başka bir göreve nazaran daha yorucu olabilir. Buna bağlı olarak görevlerin ergonomik risklerini de atama kararlarına dahil etmek gerekmektedir.

Bu çalışmada, ergonomik riskleri rassal değişkenler olarak dikkate alarak SE-HİMHD problemi önerilmiştir. Bu problemde, çevrim süresinin, iş istasyonu sayısının ve bütçenin belirli olduğu durumda hattın ergonomik riskini optimize etmek için doğrusal olmayan bir matematiksel modelleme yaklaşımı ve YAKA tabanlı bir matsezigisel algoritma geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma, bilindiği kadarıyla HİAMHD literatüründeki ilk stokastik problemi ele almaktadır. Ayrıca, ilgili literatürde çözüm yöntemi olarak ilk kez bir matsezigisel kullanılmıştır. Literatürden uyarlanan test problemleri üzerinde farklı parametre değerleri kullanılarak sayısal deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen algoritma, matematiksel modelleme yaklaşımına önemli derecede üstünlük sağlamıştır.

Gelecek çalışmalarda, problemin karma modellenmiş ve U-tipi gibi farklı türlerinin çalışılması önerilmektedir. Bununla birlikte, ergonomik risklerin yanı sıra işlem sürelerinin de rassal değişkenler olarak ele alınması konusunda çalışmalar gerçekleştirilebilir.

**Kaynaklar**

- Ağpak, K., & Gökçen, H. (2007). A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 180(3), 1098–1115.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.042>
- Akyol, Ş. D., & Baykasoğlu, A. (2019). ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 291–302.  
<https://doi.org/10.1007/s10845-016-1246-6>
- Baykasoğlu, A., & Akyol, Ş. D. (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 785–792.  
<https://doi.org/10.17341/gummfd.00296>
- Campana, N. P., Iori, M., & Moreira, M. C. O. (2022). Mathematical models and heuristic methods for the assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment. *International Journal of Production Research*, 60(7), 2193–2211.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1884767>
- Efe, B., Kremer, G. E. O., & Kurt, M. (2018). Age and gender-based workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, 25(1), 1–17. Erişim adresi:  
<https://eds.p.ebscohost.com/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=82051d6d-1d31-4836-abf6-d3b82821d70b%40redis>
- Ghorbani, E., Keivanpour, S., Sekkay, F., & Imbeau, D. (2024). Fuzzy expert system for ergonomic assembly line worker assignment and balancing problem under uncertainty. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1–23.  
<https://doi.org/10.1080/21681015.2024.2389963>
- Işık, E. E., & Yıldız, S. T. (2023). Integer and constraint programming models for the straight and U-shaped assembly line balancing with hierarchical worker assignment problem. *International Journal of Production Research*, 62(14), 5269–5292.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2290699>

- Kang, H., Lee, A & Su, Y. (2025). Multi-objective mixed-model assembly line balancing with hierarchical worker assignment: A case study of gear reducer manufacturing operations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 16(1), 69-92. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2024.10.008>
- Karaboğa, D. (2005). An idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. *Technical Report TR06, Erciyes University*, (TR06), 10. Erişim adresi: [http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06\\_2005.pdf](http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf)
- Karaş Çelik, A., & Özçelik, F. (2024). Hiyerarşik işçi ataması ile tip-II montaj hattı dengeleme problemi için bir matematiksel model. *Endüstri Mühendisliği*, 35(1), 1–21. <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1333382>
- Karaş Çelik, A., & Özçelik, F. (2025). Assembly line rebalancing problem with human-robot collaboration and a hyper-matheuristic solution approach. *Computers and Industrial Engineering*, 200, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110795>
- Kriengkorkot, N., & Pianthong, N. (2007). The assembly line balancing problem : Review articles \*. *KKU Engineering Journal*, 34(2), 133–140.
- Liu, R., Liu, M., Chu, F., Zheng, F. & Chu, C. (2021). Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 151, 106944. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106944>
- Miralles, C., García-Sabater, J. P., Andrés, C., & Cardos, M. (2007). Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110(1–2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.023>
- Pınarbaşı, M., & Alakaş, H. M. (2020). Balancing stochastic type-II assembly lines: chance-constrained mixed integer and constraint programming models. *Engineering Optimization*, 52(12), 2146–2163. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1716746>
- Sungur, B., & Yavuz, Y. (2015). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.004>
- Şahin, M. C., & Tural, M. K. (2023). Robotic stochastic assembly line balancing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 35(4), 1076–

1115. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09494-x>

Yıldız, S.T., Yıldız, G. & Okyay, R. (2020). Assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment, positional constraints, task assignment restrictions and parallel workstations. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 27(3), 345-377. doi: <https://doi.org/10.23055/ijietap.2020.27.3.5953>

Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R. & Zhang, L. (2020). Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 118, 104905. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>



# BÖLÜM 6

## EKSTRAKSİYON İLE AYIRMA İŞLEMİNE CEVAP YÜZEY YÖNTEMİ İLE BOX BEHNKEN MODELİ- NİN UYGULANABİLİRLİĞİ

*Prof. Dr. Mehtap GÖRGÜN ERŞAN<sup>1</sup>*

*Hilal NALBANTOĞLU<sup>2</sup>*

*Yunus ALTINOK<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Prof. Dr. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü [mersan@cumhuriyet.edu.tr](mailto:mersan@cumhuriyet.edu.tr) , ORCID: 0000-0002-5429-4468

<sup>2</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü [20249226002@cumhuriyet.edu.tr](mailto:20249226002@cumhuriyet.edu.tr) , ORCID: 0009-0004-0859-0989

<sup>3</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü [20249226001@cumhuriyet.edu.tr](mailto:20249226001@cumhuriyet.edu.tr) , ORCID: 0009-0007-9630-4904

## 1.GİRİŞ

Bu çalışmada, deneysel çalışmalarının optimizasyonunda kullanılan cevap yüzey yönteminin ekstraksiyon parametrelerinin optimizasyonunda kullanılabilirliğinin ortaya konulmasını amaçlamaktadır. Bazı sayısal metotlara dayalı bilimsel çalışmaların optimizasyon koşullarının belirlenmesi, üzerinde çalışılan problemin genelleştirilerek diğer araştırmacıların kullanımına sunulması olarak daha somut sonuçların ortaya konulması açısından öneme sahiptir. Bilgisayar temelli optimizasyon metodu olarak kullanılan Cevap Yüzey Yöntemi (CYY), karşılaşılan problemlerde deney sınırları içerisinde bağımsız değişkenlerin optimum değerlerinin ve genelleştirilmiş deneysel eşitliklerin bulunmasında kullanılır.

### 1.1 Optimizasyon Nedir?

Optimizasyon, belirli bir deneysel sistemin veya süreçlerin en iyi sonuçları elde edebilmesi için gereken koşulları belirleme sürecidir. Burada amaç, sistemin performansını veya verimliliğini artırmak için en uygun parametrelerin (girdi değişkenlerinin) ve sınırlarının belirlenmesidir.

Deneysel tasarımda optimizasyon genellikle aşağıdaki adımları içerir:

1. Problemin Tanımlanması: İyileştirilmesi gereken süreç veya sistem belirlenir.
2. Bağımsız Değişkenlerin Seçimi: Sonuçları etkileyebilecek parametreler (girdi değişkenleri) seçilir.
3. Deneysel Planlama: Parametrelerin çeşitli değerlerinin sistem üzerinde nasıl bir etki yaratacağı belirlenir. Bu aşama, faktöriyel deneyler, yanıt yüzey metotları veya diğer deneysel tasarım tekniklerini içerebilir.
4. Veri Toplama ve Analiz: Deneysel sonuçlar toplanır ve analiz edilerek hangi parametrelerin en iyi sonuçları verdiği tespit edilir.
5. Optimum Koşulların Belirlenmesi: En iyi sonuçları elde etmek için parametrelerin hangi değerlerde ayarlanması gerektiği belirlenir (Myers, Montgomery & Anderson-Cook, 2016).

### 1.2 Deneysel Tasarım

Bilimsel araştırmalarda bir hipotezin test edilmesi ve neden-sonuç ilişkilerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen sistematik bir yaklaşımdır. Bu yöntem, bağımsız değişkenlerin (araştırmacı tarafından kontrol edilen veya manipüle edilen değişkenler) bağımlı değişkenler üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlar. Deneysel tasarımın temel özellikleri şunlardır:

1. Bağımsız ve Bağımlı Değişkenler:
  - Bağımsız Değişken: Araştırmacının kontrol ettiği veya değiştirdiği değişkendir.
  - Bağımlı Değişken: Bağımsız değişkenin etkisini ölçmek için incelenen sonuç değişkenidir.
2. Kontrol ve manipülasyon: Deneysel tasarımda bağımsız değişken manipüle edilir ve diğer tüm faktörler kontrol altında tutulur. Böylece değişimin yalnızca bağımsız değişkene bağlı olup olmadığı değerlendirilir.
3. Gruplar arası karşılaştırma: Genellikle deneysel grup ve kontrol grubu olmak üzere iki grup bulunur.
  - Deneysel grubu: Bağımsız değişkenin uygulandığı gruptur.
  - Kontrol grubu: Bağımsız değişkenin uygulanmadığı, referans olarak kullanılan gruptur.
4. Rastgelelik (randomizasyon): Katılımcılar veya denekler, gruplara rastgele atanarak olası yanlılıklar önlenir. Bu, sonuçların daha güvenilir olmasını sağlar.
5. Tekrarlanabilirlik: Deneyin aynı koşullar altında tekrar edilmesi, bulguların genellenmesi ve güvenilirliği için önemlidir (Shadish, Cook & Campbell, 2002).

**Hipotez testi:** İstatistiksel analizde bir varsayımın (hipotezin) doğruluğunu test etmek için kullanılan bir yöntemdir. Hipotez testinin temel adımları; hipotezlerin belirlenmesi, anlamlılık düzeyinin seçimi, test istatistiğinin hesaplanması, kritik değer veya p-değerinin karşılaştırılması ve karar vermedir. Hipotezin belirlenmesi aşamasında 2 tür vardır. Bunlardan biri, Null hipotezi ( $H_0$ ): test edilen varsayım; genellikle 'değişiklik yok' gibi durumları ifade eder. Bir diğeri ise, alternatif hipotez ( $H_1$ ): Null hipoteze karşı ileri sürülen iddia; genellikle bir 'fark' olduğunu savunur.

Hipotez Testlerinin Türleri:

- Tek Yönlü Test (one-tailed test): yalnızca bir yönde bir fark veya etki olduğunu test eder.
- Çift Yönlü Test (two-tailed test): iki yönde de bir fark veya etki olabileceğini test eder.

**Blok ve çoğaltma:** Bloklama ve çoğaltma genellikle birlikte kullanılır, çünkü bloklama dışsal değişkenlerin etkisini kontrol ederken, çoğaltma deney sonuçlarının hassasiyetini artırır. Bu iki yöntem, deneylerin doğruluğunu artırmak ve daha güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılır.

**Etkileşim:** Bir deneyde veya modelde, bir bağımsız değişkenin etkisinin, diğer bir bağımsız değişkenin düzeyine bağlı olarak değişmesi durumuna

etkileşim denir. Yani, değişkenlerin birbirini nasıl etkilediğini analiz ederiz. Etkileşim türleri: pozitif ve negatif etkileşim olarak ikiye ayrılır. İki değişken birlikte olduğunda, etkileri birbirini azaltır veya artırır (Field, 2018).

### 1.3 Cevap Yüzey Yöntemi (CYY)

Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology- RSM), ilk olarak 1950'lerde iki Amerikalı istatistikçi, George E. P. Box ve K. B. Wilson tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem, özellikle mühendislik ve endüstriyel süreçlerde deneysel optimizasyon ihtiyaçlarına bir yanıt olarak ortaya çıkmıştır. Box ve Wilson, 1951 yılında yayınladıkları makalede, CYY'yi, kimya ve endüstriyel süreçlerin optimizasyonunda kullanılan sistematik bir yaklaşım olarak tanıttılar. Başlangıçta, süreçleri optimize etmek için kuadratik modellerin kullanılmasını önerdiler. Bu modeller, yerel bir optimumun bulunduğu varsayımıyla, yüzeyin eğimini tahmin ederek daha iyi bir çözüm elde etmeyi amaçlıyordu (Box & Wilson, 1951).

#### 1960'lar- Uygulamanın Genişlemesi:

- CYY, yalnızca Kimya Mühendisliği gibi alanlarda değil, aynı zamanda tarım, biyoloji, malzeme bilimi ve üretim süreçlerinde kullanılmaya başlandı.
- Deney tasarımı (DOE) teknikleriyle entegre edilerek daha geniş bir uygulama alanı buldu.

#### 1970'ler- Bilgisayar Destekli Çözümler:

- CYY'nin hesaplama gereksinimleri, o dönemde sınırlı olan manuel hesaplamalarla zorluk yaratıyordu. 1970'lerde bilgisayarların yaygınlaşmasıyla, CYY analizleri daha hızlı ve kolay hale geldi.

#### 1980'ler- Karmaşık Sistemlerin İncelenmesi:

- Yöntem, daha karmaşık sistemler için geliştirildi. Örneğin, Box-Behnken tasarımı gibi alternatif tasarımlar ortaya çıktı.
- Çoklu yanıt optimizasyonu (örneğin, aynı anda birden fazla bağımlı değişkenin optimize edilmesi) çalışmaları yaygınlaştı.

#### Günümüz:

CYY, özellikle veri bilimi, yapay zekâ ve makine öğrenimi ile entegre edilerek daha karmaşık süreçlerin analizinde kullanılmaktadır. Güncel yazılım araçları (örneğin, Minitab, Design-Expert, JMP) sayesinde hem modelleme hem de optimizasyon süreçleri kolaylaşmıştır.

Cevap Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology- RSM), bir veya daha fazla bağımsız değişkenin (faktörlerin) bir bağımlı değişken (cevap) üzerindeki etkisini incelemek ve optimize etmek için kullanılan bir istatistiksel ve matematiksel tekniktir. Bu yöntem, özellikle deney tasarımı (DOE) ve optimizasyon problemlerinde sıkça kullanılır (Antony, 2014).

### Cevap Yüzey Yönteminin Temel Amaçları

- 1.Cevabı Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Bağımsız değişkenlerin (örneğin sıcaklık, basınç) bağımlı değişken (örneğin verim, kalite) üzerindeki etkilerini anlamak.
- 2.Optimum Koşulların Belirlenmesi: Bağımlı değişkenin maksimum veya minimum değer aldığı bağımsız değişken seviyelerini bulmak.
- 3.Modelleme ve Tahmin: Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel bir modelle açıklamak.

### Cevap Yüzey Yönteminin Çalışma Mantığı

Cevap yüzeyi, bağımlı değişken ( $y$ ) ile bağımsız değişkenler ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) arasındaki ilişkiyi açıklayan bir regresyon modeli oluşturur (eşitlik1).

Tipik Model:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{eşitlik1})$$

$y$ : Cevap (bağımlı değişken),  
 $x_i, x_j$ : Faktörler (bağımsız değişkenler),  
 $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ : Katsayılar,  
 $\varepsilon$ : Hata terimi

Bu model, bağımsız değişkenlerin tekil etkilerini, etkileşimlerini ve kuadratik etkilerini içerir.

Adımları

1.Deney Tasarımı:

- Faktörlerin sayısı ve seviyeleri belirlenir.
- Tasarım genellikle merkezi kompozit tasarım (Central Composite Design- CCD) veya Box-Behnken tasarımı kullanılarak oluşturulur.

2.Veri Toplama ve Model Kurma: Deneylerden elde edilen verilerle regresyon modeli kurulur.

3. Modelin Analizi ve Doğrulanması: İstatistiksel analiz yapılır (ANOVA, p-değerleri). Modelin uygunluğu test edilir.
4. Cevap Yüzeyinin İncelenmesi: Bağımsız değişkenlerin etkileri incelenir ve grafikleri (kontur grafikleri veya 3D yüzey grafikleri) oluşturulur.
5. Optimizasyon: Bağımlı değişkeni optimize eden bağımsız değişken seviyeleri belirlenir.

#### Avantajları

- Etkileşimlerin ve Karmaşık İlişkilerin İncelenmesi: Bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimleri ve karmaşık ilişkileri analiz eder.
- Optimum Koşulların Belirlenmesi: Süreç veya sistem optimizasyonunda çok etkilidir.
- Görselleştirme: Kontur ve 3D grafikleri ile sonuçlar kolayca yorumlanabilir (Myers et al., 2016).

### 1.4 Ekstraksiyon Nedir?

Ekstraksiyon, bir maddeyi bir çözültiden veya karışımdan ayırma işlemidir. Bu işlem, genellikle bir bileşiğin seçici olarak ayrılması amacıyla, o bileşiğin çözücüler aracılığıyla bir ortamdan diğerine geçişini sağlamak için kullanılır. Ekstraksiyon, hem kimya, biyoteknoloji, gıda endüstrisi, hem de farmasötik ve çevre mühendisliği gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılır. Ekstraksiyon, farklı çözünürlük özelliklerine dayalı olarak maddelerin ayrılması ve saflaştırılması için oldukça etkili bir tekniktir. Bu işlem, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılarak yüksek verimlilikle istenilen bileşenlerin elde edilmesini sağlar (Seader, Henley ve Roper, 2010)

## 2. DENEY SAYISININ VE MODEL KATSAYILARIN HESAPLANMASI

Deney tasarımı yapılırken yapılacak deney sayısı aşağıdaki denklemler aracılığı ile hesaplanırken, a bağımsız değişken düzeylerini ifade eder.  $\beta$  ise katsayı vektörüdür ve model en küçük kareler farkı yöntemi kullanılarak elde eder. Modelde N; deney sayısı, k; bağımsız değişken sayısı ve n, merkezdeki deney sayısını ifade eder. Amaç  $\beta$  katsayı vektörünü bularak model eşitliği elde etmektir (Montgomery, 2017).

$$N=2^k+2k+n_0 \quad k<5$$

$$N=2^{k-1}+2k+n_0 \quad k>5$$

$$\alpha = 2^{k/4} \quad k < 5$$

$$\alpha = 2^{(k-1)/4} \quad k > 5$$

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_1 \\ \underline{y}_2 \\ \vdots \\ \underline{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & \dots & \underline{x}_{1k} \\ 1 & x_2 & \underline{x}_{22} & \dots & \underline{x}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & \underline{x}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}$$

$$y = x\beta + \epsilon$$

$$\beta = (x^T x)^{-1} x^T y$$

## 2.1 CYY İçin Kullanılan Tasarım Modelleri

Cevap Yüzey Yöntemi, bir sistemin yanıtını (cevabını) etkileyen bağımsız değişkenlerin (faktörlerin) optimum seviyelerini belirlemek için kullanılan bir istatistiksel yaklaşımdır. CYY’de kullanılan tasarım modelleri, deneysel koşulları planlamak ve sistemin matematiksel bir modelini oluşturmak için kritik öneme sahiptir. İşte CYY için kullanılan temel tasarım modelleri:

1. Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design- CCD): CCD, CYY’de en yaygın kullanılan tasarım modelidir. Bu tasarım, faktöriyel tasarım noktaları, eksenel (star) noktalar ve merkezi noktaları içerir.

Deney noktaları:

1. Faktöriyel noktalar: Her faktör için tüm seviyelerin kombinasyonlarını içerir ( $2^k$ ).
2. Eksenel (star) noktalar: Faktör seviyelerinin bir merkezden ( $\pm a$ ) uzakta olduğu noktalar ( $2k$ ).
3. Merkez noktalar: Faktörlerin ortalama seviyelerini içerir ( $n_c$ ).

Deney sayısı formülü:  $N = 2^k + 2k + n_c$

Özellikler:

- Kuadratik (ikinci dereceden) bir model için idealdir.
- Eksenel noktalar, tasarımın rotabilitesini (daha düzgün bir hata dağılımı) sağlar.

- $\alpha$  değerinin seçimi tasarımın özelliklerini etkiler (örneğin, rotasyonel tasarımda  $\alpha = \sqrt{k}$ ).

2. Box-Behnken Tasarımı (BBD): Box-Behnken tasarımı, deney sayısını azaltırken kuadratik bir model oluşturmak için kullanılan etkili bir tasarımdır.

Deney noktaları:

1. Faktörlerin kombinasyonları, sınır (kenar) noktalarıyla sınırlıdır.
2. Tüm faktörlerin minimum ve maksimum seviyeleri arasında orta seviyede bir tasarım içerir.

Deney sayısı formülü:  $N = 2k(k-1) + n_c$

Özellikler:

- Faktör sayısına bağlı olarak CCD'ye göre daha az deney gerektirir.
- Daha az deneyle güvenilir bir kuadratik model oluşturur.
- Eksenel noktalar içermediği için bazı durumlarda düşük çözünürlük sağlar (Montgomery, 2017).

3. Doehlert Tasarımı: Doehlert tasarımı, faktörlerin optimum seviyelerini belirlemek için daha esnek bir yöntemdir. Tasarım, faktör sayısına bağlı olarak farklı deney sayıları sunar.

Deney noktaları: Faktörler, bir küre üzerinde eşit aralıklı şekilde dağıtılır.

Özellikler:

- Rotasyonel ve düzenli bir tasarım sağlar.
- Deney sayısı, faktör sayısına göre uyarlanabilir.
- Faktörlerin sınır seviyeleri, tam tasarımda kapsamayabilir (Ferreira ve Bruns, 2007, 179-186).

4. Tam ve Kısmi Faktöriyel Tasarımlar

Tam faktöriyel tasarım: Her faktör ve seviyenin tüm kombinasyonlarını içerir. Kuadratik model oluşturmak için yeterli deneme gerektirir.

Deney sayısı:  $N = L^k$  (L: seviye sayısı, k: faktör sayısı).

Kısmi faktöriyel tasarım: Daha az deneyle ana etkiler ve bazı etkileşimleri analiz eder. Eksik bilgilere izin verir (Cochran ve Cox, 1957).

5. Latin Hiperküp Tasarımı (LHD): Latin hiperküp tasarımı, geniş bir faktör uzayını örnekleme için kullanılan modern bir yaklaşımdır.

Deney noktaları: Faktör seviyeleri, bir tür rastgeleleştirme ile seçilir.

Özellikler:

- Büyük deneysel uzaylarda karmaşıklığı azaltır.
- Çok değişkenli durumlar için uygundur.
- Doğrudan kuadratik model oluşturmaz, bu yüzden ek analiz gerekebilir.

6. Plackett-Burman Tasarımı: Faktörlerin ana etkilerini belirlemek için kullanılan bir tarama tasarımıdır.

Özellikler:

- Etkileşimler ihmal edilir.
- Çok sayıda faktörün ana etkilerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi için uygundur.
- Deney sayısı: Faktör sayısının bir katı olan bir tasarımıdır.

Tasarım Seçimi Kriterleri ve Sonuç

- Hedef: Ana etkilerin mi, etkileşimlerin mi yoksa kuadratik etkilerin mi analiz edileceği.
- Faktör Sayısı: Faktör sayısı arttıkça, deney sayısını azaltan modeller tercih edilir (örneğin, BBD veya fractional factorial).
- Kaynaklar: Zaman ve maliyet kısıtlamaları.
- Optimizasyon Gereksinimi: Daha karmaşık ve hassas optimizasyon için CCD veya BBD gibi tasarımlar uygundur.

Cevap yüzey yöntemi için kullanılan tasarım modelleri, araştırmanın hedeflerine ve kısıtlamalarına göre seçilir. CCD ve BBD, kuadratik modeller oluşturmak için en yaygın kullanılan tasarımlardır, ancak faktör sayısı ve deneysel kaynaklara bağlı olarak alternatif tasarımlar da kullanılabilir.

## 2.2 Regresyon ve Anova Analizi

CYY yönteminde bir faktörün ana etkisinin veya etkileşim etkisinin yanıt değişkeninin değerlerinde ne derece önemli bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımıyla karar verilir. İstatistiksel hesaplamalarla

matematiksel verilerin uyumunu varyans analizi (Anova) ile ifade edilir. Bu amaçla, varyasyon katsayısının (C.V) hesaplanması, regresyon analizine hipotez testlerinin uygulanması, hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması, regresyon katsayısının ( $R^2$ ) ve düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması ( $R^2$  adj ), tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamının (PRESS) hesaplanması, yeterli tahminleme (adequite precision) değerinin hesaplanması, model uygunsuzluğunun test edilmesi (lack of fit testi) ve kalıntı analizi gibi farklı test yöntemleri uygulanmaktadır. Yanıt yüzey yönteminde, tasarım edilmiş denemelerden alınan veriler, regresyon modeline fit ettirilmektedir. Elde edilen bu model gerçek yanıt fonksiyonuna sadece bir yaklaşım olduğu için, tahminlenen değerler ile deneysel veriler arasındaki fark (kalıntı), sadece saf deneysel hatayı değil modelin matematiksel formunun uygunsuzluğundan kaynaklanan hatayı da içermektedir. Modelin matematiksel formunun uygunsuzluğundan kaynaklanan hataya, model uygunsuzluğu (Lack of fit) denmektedir. İdeal olarak, istatistiksel açıdan modelin matematiksel formunun uygunsuzluğunun (lack of fit) önemsiz ve regresyon modeli için önemli olması gerekmektedir (Şenol ve ark 2021).

### 2.3 Cevap Yüzey yönteminde Ekstraksiyon Uygulamaları

Lubis,M. ve arkadaşları (Nisan 2024) yaptıkları çalışmada Box-Behnken tasarımı ile kolon kanseri uygulamaları için vernonia amygdalina gövde kabuğu ekstraktının optimizasyonunu yapmışlardır. Kolon kanseri, yüksek mortalite oranlarıyla küresel bir sağlık sorunudur. Kemoterapinin yan etkileri, doğal ürünlerden elde edilen alternatif tedavi yöntemlerinin araştırılmasını teşvik etmektedir. Vernonia amygdalina (bitter leaf), antioksidan ve antikanser özelliklere sahip fenolik ve flavonoid bileşikler açısından zengin bir bitkidir. Bu çalışmada, V. amygdalina gövde kabuğundan elde edilen özütün, optimize edilmiş ekstraksiyon yöntemleriyle antioksidan ve kolon kanseri karşıtı etkinliğinin artırılmasını amaçlamıştır.

Ekstraksiyonda Mikrodalga Destekli Ekstraksiyon (MAE) yöntemi uygulanmış olup Box-Behnken Tasarımı (BBD) ile optimize edilmiştir. Çalışmanın değişkenleri ise Mikrodalga gücü;100-450 W, ekstraksiyon süresi; 3-14 dakika, etanol konsantrasyonu;%50-%90 aralığında belirlenmiştir. Toplam Fenolik İçerik (TPC), Toplam Flavonoid İçerik (TFC) ölçümleri ve WiDr kolon kanseri hücrelerinde sitotoksiste, hücre döngüsü durdurma ve apoptoz testleri yapılmıştır. Optimizasyonda, 450W mikro dalga gücü için 3 dakikada etanol konsantrasyonu %76,19'dur. Optimize edilmiş özütün IC50 değeri: 25.413  $\mu\text{g}/\text{mL}$  (VABEEo). Optimize edilmemiş özüt: 41.254  $\mu\text{g}/\text{mL}$  (VABEE). VABEEo, WiDr hücrelerinde güçlü sitotoksiste (IC50: 70.940  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) göstermiştir. G1 fazında hücre döngüsü durdurma, apoptoz indüksiyonu, Cyclin D1 azalması ve p53 artışı

vardır. Bu çalışma, V. amygdalina gövde kabuğu özütünün optimize edilmiş yöntemlerle yüksek antioksidan ve antikanser potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Gelecekte, bu özütün toksikolojik değerlendirmeleri ve klinik çalışmaları yapılmalıdır (Lubis ve ark. Nisan 2024).

El-Sheekh, M. ve arkadaşları (Ekim 2024) farklı kahverengi deniz yosunlarından fukoidan ekstraksiyonunun optimizasyonu ve biyolojik aktivite potansiyeli üzerine çalışma yapmışlardır. Kahverengi deniz yosunlarından fukoidan adlı sülfatlanmış polisakkaridin ekstraksiyon parametrelerini optimize etmek ve elde edilen fukoidanın biyolojik aktivitelerini (antioksidan, antikanser, antimikrobiyal, antikoagülan) değerlendirmek amaçlanmıştır. Kahverengi deniz yosunlarından *Turbinaria turbinata*, *Sargassum cinereum*, *Padina pavonica*, *Dictyota Dichomata* türleri ile çalışma yapılmıştır. Box-Behnken Tasarımı (BBD) kullanılarak pH (3, 5, 7), sıcaklık (70°C, 80°C, 90°C) ve ekstraksiyon süresi (60, 120, 180 dakika) olarak optimize edilmiştir. Kimyasal ve fiziksel analizlerde FTIR, NMR ve HPLC cihazları kullanılmıştır. Optimizasyonda, en yüksek fukoidan verimi (%40,76) *Padina pavonica*'dan elde edilmiş olup en yüksek sülfat içeriği (%18,46) *Dictyota dichotoma*'da bulunmuştur. Biyolojik aktivite için *Dictyota dichotoma* en yüksek antioksidan aktiviteye sahiptir, MCF-7 hücre hattında en güçlü antikanser etkiler göstermiştir (IC50: 85.93 µg/mL), Fukoidan, özellikle gram pozitif bakterilere karşı güçlü bir etki göstermiştir, en yüksek antikoagülan aktivite, *Dictyota dichotoma*'dan elde edilmiştir. Bu çalışma, kahverengi deniz yosunlarından elde edilen fukoidanın biyolojik aktiviteler açısından zengin bir doğal ürün olduğunu ve antioksidan, antikanser, antimikrobiyal ve antikoagülan özellikleriyle biyomedikal uygulamalarda umut vaat ettiğini ortaya koymaktadır. Klinik ve biyomedikal kullanım için daha ileri in-vitro ve in-vivo çalışmalar önerilmektedir (El-Sheekh, ve ark. Ekim 2024).

Martin, G. ve arkadaşları (Ekim, 2020) zeytin yapraklarından fenolik bileşiklerin ekstraksiyonu için box-behnken deney tasarımını kullanmışlardır. Bu çalışma, zeytin yapraklarından fenolik bileşiklerin en yüksek verimle elde edilmesi için baskılı sıvı ekstraksiyon (PLE) parametrelerini optimize etmeyi ve bu bileşikleri HPLC-ESI-TOF-MS yöntemi ile karakterize etmeyi amaçlamaktadır. Bir Box-Behnken deney tasarımı, ekstraksiyon sıcaklığı (50-200°C), etanol-su oranı (%0-100) ve ekstraksiyon süresi (5-20 dakika) gibi parametrelerin etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu parametreler, fenolik bileşiklerin sınıflandırılmış grupları (basit fenoller, secoiridoidler, flavonoidler, elenolik asitler) ve toplam verim üzerindeki etkileriyle optimize edilmiştir.

En yüksek toplam bileşik içeriği ( $158.7 \pm 0,4$  mg/g kuru madde)  $105^{\circ}\text{C}$ , %100 etanol ve 5 dakika koşullarında elde edilmiştir. Maksimum ekstraksiyon verimi ( $\%43 \pm 3$ ),  $198^{\circ}\text{C}$ , %100 etanol ve 5 dakika koşullarında kaydedilmiştir. Çoklu yanıt analizi ile en uygun PLE koşulları  $138^{\circ}\text{C}$ , %100 etanol ve 5 dakika olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda, 144 mg/g kuru madde toplam bileşik içeriği ve %42,2 verim elde edilmiştir. Bu çalışma, PLE yönteminin fenolik bileşiklerin hızlı, çevre dostu ve yüksek verimle ekstraksiyonu için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Optimum koşullar, endüstriyel ölçekte uygulanabilir ve ekonomik avantajlar sunabilir (Martin, ve ark. Ekim, 2020).

Ouatmani, T. ve arkadaşları (Haziran 2024) ultrason destekli ekstraksiyon ile pistacia lentiscus atıklarından fenolik bileşiklerin geri kazanımı ve biyolojik aktivitelerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, Kuzey Cezayir'de yetişen Pistacia Lentiscus (sakız ağacı) meyvelerinin yağ çıkarımı sonrası kalan kekinden fenolik bileşiklerin ultrason destekli ekstraksiyon(UAE) yöntemiyle optimize edilmesini ve bu bileşiklerin in vitro biyolojik aktivitelerinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada Box-Behnken Deneysel Tasarımı (BBD) kullanılarak üç bağımsız değişkenin (ekstraksiyon sıcaklığı, süre ve etanol-su oranı) fenolik bileşik verimine etkisi araştırılmıştır. Optimize edilen ekstraktın bileşimi Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografi (HPLC-DAD) yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca, ekstraktın antioksidan kapasitesi ABTS radikali yakalama testi ile, antidiabetik potansiyeli ise  $\alpha$ -amilaz inhibisyon testi ile değerlendirilmiştir. Optimum ekstraksiyon koşulları %50 etanol,  $60^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve 86 dakikalık ekstraksiyon süresi olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda elde edilen ekstrakt, toplam fenolik içeriği açısından yüksek değerler göstermiştir ( $96,45 \pm 8,34$  mg GAE/g) .

HPLC analizi, ekstraktın epikateşin, ferulik asit ve galik asit gibi 12 farklı fenolik bileşik içerdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, ekstrakt güçlü bir antioksidan aktivite ( $\text{IC}_{50} = 61,79 \pm 0,40$   $\mu\text{g/mL}$ ) ve umut verici bir  $\alpha$ -amilaz inhibisyon kapasitesi ( $\text{IC}_{50} = 99,82 \pm 2,03$   $\mu\text{g/mL}$ ) göstermiştir. Pistacia Lentiscus yağı çıkarımı sonrası kalan kek, biyolojik olarak aktif fenolik bileşiklerin değerli bir kaynağı olarak kullanılabilir. Bu çalışma, bu yan ürünün gıda, kozmetik ve ilaç endüstrilerinde potansiyel kullanımını desteklemektedir. UAE yöntemi, yeşil kimya ilkelerine uygun, etkili bir geri kazanım stratejisi sunmaktadır (Ouatmani, ve ark. Haziran 2024).

Golshany, H. ve arkadaşları (Ekim 2024) box-behnken tasarımı kullanılarak fucus vesiculosus'tan florotannin ekstraksiyonunun optimizasyonu yapmışlardır. Florotanninler, kahverengi makroalglerden elde edilen ve diyabet ile obezite gibi metabolik hastalıklarda etkili antioksidan ve enzim inhibitör özelliklere sahip fenolik bileşiklerdir. Bu çalışma, Fucus vesiculosus'tan florotannin ekstraksiyonunun geleneksel ve ultrason destekli ekstraksiyon (UAE) yöntemleriyle optimize edilmesini incelemektedir. Çalışmada, çözücü konsantrasyonu, sonikasyon gücü ve ekstraksiyon süresi gibi parametreleri değerlendirmek için Box-Behnken tasarımı (BBD) kullanılmıştır. Sonuçlar, UAE'nin florotannin içeriği ( $954,00 \pm 33,65$  mg PGE/100 g) ve antioksidan aktivitelerde geleneksel yöntemlere kıyasla üstün olduğunu göstermiştir ( $512,25 \pm 14,26$  mg PGE/100 g). Saflaştırılmış UAE ekstraktları,  $\alpha$ -amilaz inhibisyonunda ( $IC_{50} = 7,06 \pm 0,67$   $\mu$ g/mL) akarbostan ( $IC_{50} = 14,63 \pm 0,28$   $\mu$ g/mL) daha güçlü bir etki göstermiştir. UHPLC-qTOF-MS analizi, benzersiz florotannin türevlerini tanımlamıştır. Optimizasyon süreci, sağlıkla ilgili uygulamalar için biyoaktif bileşiklerin geliştirilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Florotanninler, kahverengi makroalglerde bulunan, güçlü antioksidan, antidiyabetik ve anti-obezite özelliklere sahip fenolik bileşiklerdir. Ancak bu bileşiklerin karmaşık yapısı ve hidrofilik özellikleri nedeniyle ekstraksiyonu oldukça zordur. Bu çalışmanın amacı, Fucus vesiculosus'tan florotannin ekstraksiyonunu optimize etmek ve elde edilen bileşiklerin biyolojik aktivitelerini incelemektir.

Optimum Geleneksel Ekstraksiyon: Çözücü-malzeme oranı (10, 20, 30 mL/g), etanol konsantrasyonu (%0, %50, %100) ve ekstraksiyon süresi (6, 15, 24 saat). Uygun oranlarda solventle karıştırılarak 150 rpm'de bir çalkalayıcıda inkübe edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi sonunda süzülen çözelti, analizler için seyreltilmiştir. Her koşul için 17 farklı deney yapılmıştır.

Ultrason Destekli Ekstraksiyon (UAE): Çözücü-malzeme oranı (10, 20, 30 mL/g), etanol konsantrasyonu (%0, %50, %100), sonikasyon gücü (%33, %66,5, %100) ve ekstraksiyon süresi (2, 6, 10 dakika). Ekstraksiyon işlemi, 20 kHz frekans ve 1200 W toplam çıkış gücüne sahip bir prob ultrason sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon sırasında numuneler bir buz banyosu içinde tutulmuş, ardından oda sıcaklığına soğutulup filtre edilmiştir. Her koşul için 29 farklı deney yapılmıştır. Optimizasyon: Yanıt yüzey metodolojisi, optimal koşulları belirlemiştir. Toplam florotannin içeriği (TPHC), DPPH, FRAP ve ABTS testleri ile antioksidan aktiviteler değerlendirilmiştir.  $\alpha$ -amilaz ve  $\alpha$ -glukozidaz enzim inhibisyonu standart protokollerle ölçülmüştür. UAE yöntemi, geleneksel yöntemle kıyasla neredeyse iki kat daha fazla florotannin verimi sağlamıştır. UAE ekstraktları, DPPH, FRAP ve ABTS testlerinde daha yüksek antioksidan kapasite

göstermiştir. Enzim inhibisyonunda saflaştırılmış UAE ekstraları,  $\alpha$ -amilaz inhibisyonunda daha etkili olmuştur ( $IC_{50} = 7,06 \mu\text{g/mL}$ ). UAE yöntemi, kısa ekstraksiyon süreleri ve daha yüksek florotannin verimi ile geleneksel yöntemlerden üstündür. Bu süreç, florotanninlerin biyoaktif özelliklerinin daha etkili bir şekilde kullanılması için umut vaat etmektedir (Golshany, ve ark. Ekim 2024).

### 3. SONUÇLAR

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde katı-sıvı ve sıvı-sıvı ekstraksiyon ile ayırma işleminin gıda, ilaç, kozmetik vb. gibi endüstriyel alanlarda ve ticari yönden önemli olduğu bu nedenle ekstraksiyon koşullarının optimizasyonun gerekliliği görülmüştür. Birçok bilimsel çalışmada geleneksel yöntemler ile yapılan optimizasyon çalışmalarının, modern teknolojinin getirdiği cevap yüzey yöntemi gibi bilgisayar destekli programlar ile yapılabildiğini göstermiştir. CYY yöntemi ile ekstraksiyon koşullarının belirlenmesinde Box-Behnken modelinin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Ekstraksiyon koşullarının cevap yüzey yöntemi ile uygulamaları yüksek regresyon ve optimizasyon koşullarının modelle uyumu açısından tercih edilmektedir. Üstelik ekstraksiyon sonuçlarının ekstraksiyon koşullarına bağlayan eşitliklerle ekstraksiyon parametrelerinin birbiri üzerindeki etkisinde net olarak görülmektedir. Deney yapılmayan koşullar içinde ekstraksiyon verimi tahmin edilebilmektedir. Böylelikle optimizasyonda zamandan ve malzemedan tasarruf sağlanmakta ve bilimsel çalışmaların geliştirilmesi hız kazanmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (4th ed.). Wiley.
- Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). Experimental and quasi-experimental designs for generalized causal inference. Houghton Mifflin.
- Field, A. (2018). Discovering statistics using IBM SPSS statistics (5th ed.). Sage Publications.
- Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 13(1), 1-45.
- Antony, J. (2014). Design of experiments for engineers and scientists. Elsevier.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments (4th ed.). Wiley.
- Seader, JD, Henley, EJ ve Roper, DK (2010). \*\* \*Ayrırma Süreci Prensipleri\*. Wiley. -
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John wiley & sons.
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1957). "Experimental Designs"
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., et al. (2007). "Doehlert matrix: a chemometric tool for analytical chemistry." Analytica Chimica Acta, 597(2), 179-186
- Şenol H., Ersan M., Görgün E. (2020). Optimization of temperature and pretreatments for methane yield of hazelnut shells using the response surface methodology. Fuel (271), 117585.
- Lubis ve arkadaşları. Arap Kimya Dergisi. Cilt 17, Sayı 4 , Nisan 2024, 105702
- El-Sheekh, M. ve arkadaşları. Uluslararası Biyolojik Makromoleküller Dergisi. Cilt 277, Bölüm 3 , Ekim 2024, 134490
- Martin, G. ve arkadaşları. Endüstriyel Bitkiler ve Ürünler Dergisi. Cilt 154, 15 Ekim 2020, 112741
- Ouatmani, T. ve arkadaşları. Gıda Ölçümü ve Karakterizasyonu Dergisi. Cilt 18, Sayfalar 6406-6418, Haziran 2024
- Golshany, H. ve arkadaşları. Yosun Araştırması Cilt 83, Ekim 2024, 13723









- Kang, H., Lee, A & Su, Y. (2025). Multi-objective mixed-model assembly line balancing with hierarchical worker assignment: A case study of gear reducer manufacturing operations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 16(1), 69-92. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2024.10.008>
- Karaboğa, D. (2005). An idea based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. *Technical Report TR06, Erciyes University*, (TR06), 10. Erişim adresi: [http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06\\_2005.pdf](http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf)
- Karaş Çelik, A., & Özçelik, F. (2024). Hiyerarşik işçi ataması ile tip-II montaj hattı dengeleme problemi için bir matematiksel model. *Endüstri Mühendisliği*, 35(1), 1–21. <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1333382>
- Karaş Çelik, A., & Özçelik, F. (2025). Assembly line rebalancing problem with human-robot collaboration and a hyper-matheuristic solution approach. *Computers and Industrial Engineering*, 200, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110795>
- Kriengkorkot, N., & Pianthong, N. (2007). The assembly line balancing problem : Review articles \*. *KKU Engineering Journal*, 34(2), 133–140.
- Liu, R., Liu, M., Chu, F., Zheng, F. & Chu, C. (2021). Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 151, 106944. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106944>
- Miralles, C., García-Sabater, J. P., Andrés, C., & Cardos, M. (2007). Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study. *International Journal of Production Economics*, 110(1–2), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.023>
- Pınarbaşı, M., & Alakaş, H. M. (2020). Balancing stochastic type-II assembly lines: chance-constrained mixed integer and constraint programming models. *Engineering Optimization*, 52(12), 2146–2163. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2020.1716746>
- Sungur, B., & Yavuz, Y. (2015). Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.08.004>
- Şahin, M. C., & Tural, M. K. (2023). Robotic stochastic assembly line balancing. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 35(4), 1076–

1115. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09494-x>

Yıldız, S.T., Yıldız, G. & Okyay, R. (2020). Assembly line balancing problem with hierarchical worker assignment, positional constraints, task assignment restrictions and parallel workstations. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 27(3), 345-377. doi: <https://doi.org/10.23055/ijietap.2020.27.3.5953>

Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R. & Zhang, L. (2020). Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 118, 104905. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>



# BÖLÜM 7

## MİRAS NİTELİĞİNDEKİ JEOLJİK OLUŞUMLARIN, KORUNMASI, YAŞATILMASI VE BULUNDUĞU BÖLGE İÇİN ÖNEMİ: DEREİÇİ TRAVERTENLERİ (BAŞKALE, VAN)

*Çetin YEŞİLOVA<sup>1</sup>*

*Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA<sup>2</sup>*

*Mustafa AÇLAN<sup>3</sup>*

*Hakan ELÇİ<sup>4</sup>*

1 Doç. Dr., Yüzüncü Yıl University Department of Geological Engineering, 65080, VAN, TURKEY ORCID ID: 0000-0002-8884-0842, cetinyesilova@yyu.edu.tr

2 Doç. Dr., Yüzüncü Yıl University Department of Geological Engineering, 65080, VAN, TURKEY ORCID ID: 0000-0002-1539-7982, erhangulyuz@yyu.edu.tr

3 Doç. Dr., Yüzüncü Yıl University Department of Geological Engineering, 65080, VAN, TURKEY ORCID ID: 0000-0002-0748-6192, pelingungoryesilova@yyu.edu.tr

4 Prof Dr., Dokuz Eylül University Torbalı Vocational Scholl, 35860, İZMİR, TURKEY ORCID ID: 0000-0003-2945-2548, hakan.elci@deu.edu.tr

## Giriş

Traverten, kalsiyum ve bikarbonatça zengin yeraltı sularının yüzeye çıktığı fay hattı boyunca kalsiyum karbonatın çökmesi ve birikmesiyle oluşur (Pedley, 1990; Ford ve Pedley, 1996; Guo ve Riding, 1998; Pentecost, 2005; Gandin ve Capezuoli, 2008). Bu özelliklerinden dolayı travertenler çoğunlukla, bir kırık sistemini takip eden jeotermal sahalarda bulunmaktadır (Muir-Wood, 1983; Chafetz ve Folk, 1984; Sibson vd., 1975; Altunel ve Hancock, 1993b; Guo ve Riding, 1998; Fouke vd., 2000; Pentecost, 2005; Veysey vd., 2008; Guido vd., 2010; Guido ve Campbell, 2011; Yeşilova, 2021, 2022). Travertenlerin oluşumu ve morfolojisini etkileyen çok sayıda parametre vardır, bunların en önemlileri paleomorfoloji, tektonizma, iklim ve volkanizmadır (Ordenez vd., 1986; Altunel ve Hancock, 1993b; Pentecost, 1995; Guo ve Riding, 1998; Capezuoli, 2009; Brogi ve Capezuoli, 2014). Bunların dışında, kaynağın şekli, su ve kalsiyum içeriği, morfoloji ve organizma aktivitesi dahil olmak üzere birçok faktör traverten oluşumunda rol oynar (Julia, 1983; Barnes vd., 1978; Chafetz ve Folk, 1984; Pedley, 1990; Altunel ve Hancock, 1993a, 1993b; Ford ve Pedley, 1996; Guo ve Riding, 1998; Pentecost, 2005; D'Alessandro vd., 2007; Huybers ve Langmuir, 2009; Guido vd., 2010; Capezuoli vd., 2014).

Dereçi Travertenleri, Van'ın Başkale İlçesine bağlı Dereçi Köyü sınırlarında bulunmaktadır. Travertenler bir dizi tektonik, iklimsel ve volkanik aktivitenin neticesinde yüzeye ulaşan karbonatça zengin sular tarafından 3 farklı dönemde oluşturulmuştur. Tektonizma tarafından şekillenen travertenler; tabaka, sırt ve teras tipi olmak üzere 3 farklı morfolojiden oluşmuştur. Özellikle son oluşum olan teras tipi travertenler gösterdikleri görsel şölen bakımından, Van İli için oldukça önem arz etmektedirler.

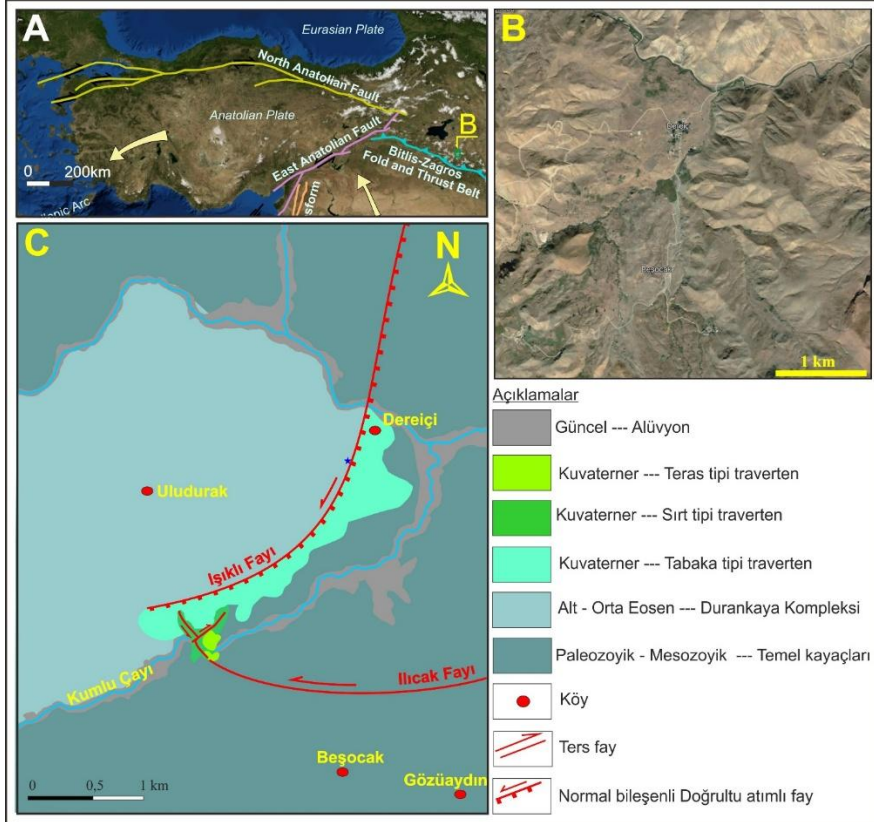
Bu çalışmanın amacı, Başta bilimsel olmak üzere, turizm, jeomiras ve bölge ekonomisi için oldukça önemli olan bu traverten oluşumlarını incelemektir. Yapılan önceki çalışmalarda köken ve jeoturizm açısından değerlendirilen (Yeşilova, 2021, 2022) bu travertenlerin korunması ve gelecek nesillere aktarımı bu çalışmada ele alınacak ve Yeşilova 2021'de verilen jeomiras öğelerinin jeosit kartları bu çalışmada sunulacaktır.

## Genel Jeoloji

İnceleme alanı, ortalama 15 km genişliğinde, 80 km uzunluğunda olan Başkale havzasının güneybatısında yer alan Dereçi köyü sınırlarında yer almaktadır. Travertenlere Başkale – Hakkâri karayolundan ulaşılmaktadır (Şekil 1A, B). Başkale havzası, bir takım faylarla kontrol edilmektedir. Başkale fay zonu adı verilen bu fay topluluğu, kuzeydoğuda Yavuzlar köyünden (Sağlam Selçuk ve Düzgün, 2017) başlayıp güneybatıda Dereçi köyüne kadar uzanmaktadır (Yeşilova, 2022). Başkale

Havzası ve çevresi (i) alüvyonlu tortullar ve travertenleri içeren Kuaterner birimlerini, (ii) bazalt, ignimbrit gibi Neojen volkanikleri ve (iii) başlıca mermer ve şistlerden oluşan Neojen öncesi kayaçlarını içerir (Boray, 1975; Ricou, 1971; Yılmaz, 1971, 1975).

Çalışma alanının temelini, Paleozoyik – Mesozoyik yaşlı Bitlis masifine ait metamorfik kayaçlar ile bu kayaçların üzerine uyumsuz olarak Üst Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığında ait birimler oluşturmaktadır (Şekil 1 C). Türkiye'nin en büyük ve en önemli masiflerinden birisi olan Bitlis masifini, düşükten yükseğe kadar değişen basınç ve sıcaklık koşullarında oluşmuş metamorfik kayaçlar oluşturmaktadır (Yılmaz, 1975; Tolluoğlu, 1981; Şengün, 1984; Göncüoğlu ve Turhan, 1985). Hakkari ili Yüksekova ilçesi yakınlarında gözlemlenen Yüksekova karmaşığı, ilk defa Perinçek (1979) tarafından çalışılmıştır. Formasyon, granitik kayaçlar, diyoritik kayaçlar ve bu kayaçları kesen aplitik damarlarından oluşmaktadır (Perinçek, 1979) (Şekil 1C).



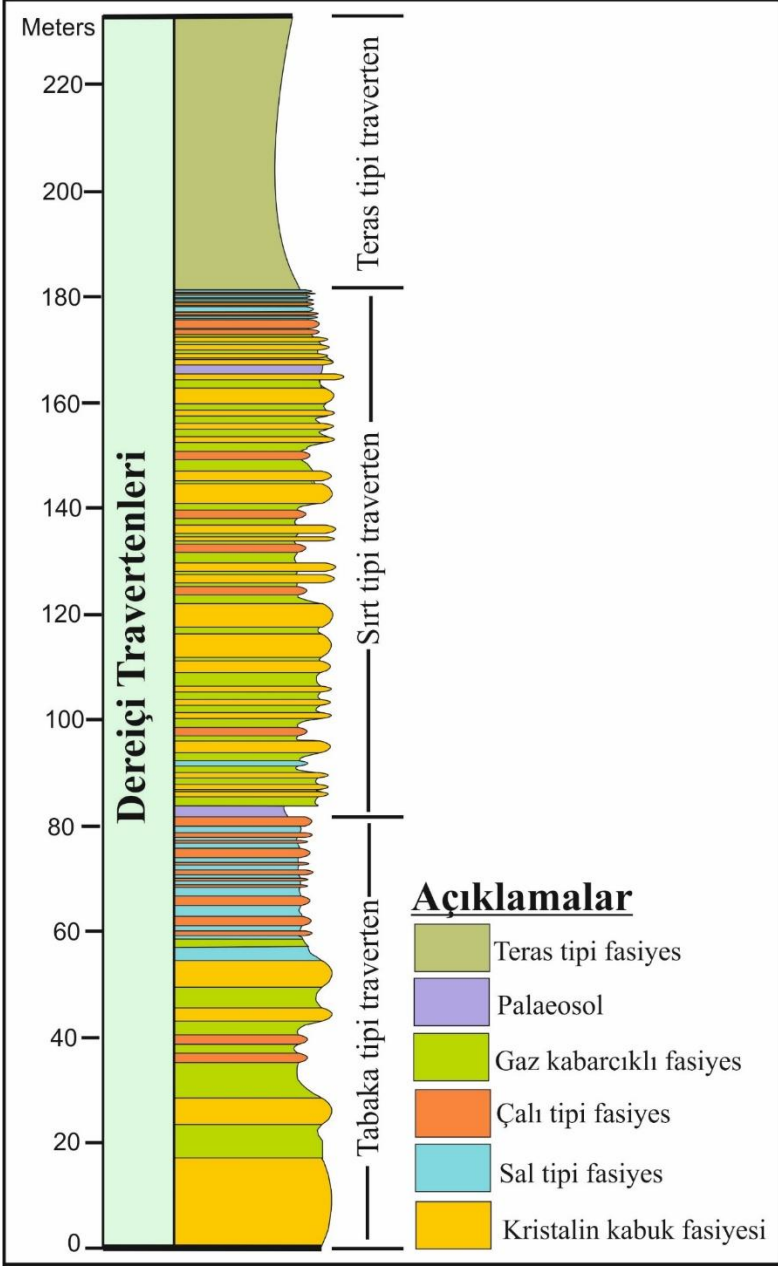
Şekil 1. A) İnceleme alanının konumu gösterir harita. B) Çalışma alanını gösterir Google earth haritası (Erişim tarihi:19.03.2025/15:25). C) İnceleme alanının jeoloji haritası (Yeşilova, 2022 den düzenlenmiştir).

Şeyl, kumtaşı ve kireçtaşından oluşan alt ve orta Eosen yaşlı Durankaya Kompleksi, temel kayaların üzerine uyumsuz olarak gelmektedir (Perinçek, 1990). Bölgedeki en genç birimleri traverten ve alüvyonlar oluşturmaktadır (Yeşilova, 2021; 2022) (Şekil 1 C).

### **Dereiçi Travertenleri**

İnceleme alanında, krem-sarı renkli, orta-kalın tabakalı travertenlerden oluşan Tabaka tipi travertenler, açık kahverengi-koyu kahverengi travertenlerden oluşan sırt tipi travertenler ve bej - beyaz renkli teras tipi travertenlerden oluşmaktadır (Yeşilova, 2021; 2022).

Yeşilova (2022), yaptığı çalışmada, travertenlerde 5 farklı litofasiyes belirlemiştir. Bu fasiyesler sırasıyla, kristalin kabuk, çalı tipi, gaz boşluklu, sal tipi fasiyes ve paleosollerdir (Şekil 2). Ortalama 255 ka dan günümüze kadar oluşumu devam eden travertenlerde, 198 – 143 ka arası ve 96 – 61 ka arasında toplam iki kez duraklama gerçekleşmiş ve bu zaman aralıklarında paleosol birikimi gerçekleşmiştir (Yeşilova, 2022).



Şekil 2. Dereçi travertenlerinde gözlemlenen fasiyesler (Yeşilova 2022'den düzenlenmiştir).

### Jeomiras değerlemesi

Travertenler jeomiras ve jeoturizm bağlamında, Yeşilova (2022), tarafından detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, bahsi geçen

çalışmada eksik bırakılan ve Çiftçi ve Güngör (2016), da önerilen envanter kartları her bir jeosit için ayrı ayrı düzenlenmiştir.

Yeşilova (2022), yaptığı çalışmada Dereiçi travertenleri için, aşağıdaki jeosit öğelerini belirlemiştir.

- a. Açılma çatlağı ve yürüyüş kanalı,
- b. Traverten duvarı,
- c. Traverten bacası,
- d. Traverten köprüsü,
- e. Şelale
- f. Traverten havuzları.

Dereiçi travertenlerinin bölgede oluşturulacak potansiyel bir Jeoparkın bir ögesi olarak değerlendirilmesi son derece uygundur. Jeoparklar ile ilgili olarak ülkemizde bir çok çalışma bulunmaktadır. Yapılacak sonraki çalışmalarda kaynak niteliğinde olan bu çalışmalardan bazıları; Kazancı tarafından yapılan "Milli parklarda jeolojik miras" (2007), "Dünyada ve Türkiye'de jeosit-jeopark-jeomiras olgusuna yaklaşımlar" (2010a) ve " Jeolojik Koruma: kavram ve ilkeler" (2010b); Kazancı ve Şaroğlu (2009)'un "Türkiye Jeositleri Çatı Listesi"; Gürler ve Timur (2007)'un "Jeoparkların Koruma ve Kullanım Yöntemleri"; Koçan (2012)'in "Ekoturizm ve Sürdürülebilir Kalkınma: Kızılcahamam-Çamlıdere (Ankara) Jeopark ve Jeoturizm Projesi" sayılabilir. Bunların yanında yine jeoparkların tanınması ve korunması ile ilgili olarak Gürler'in (1997, 1999 ve 2001) yaptığı çalışmalar önemli yer tutmaktadır. Ancak son yıllarda Çiftçi ve Güngör (2014, 2016 ve 2017) yaptıkları çalışmalarda, Jeoparklara ve bu konuda yapılacak çalışmalara bir standart getirmek amacıyla çalışmalar yapmıştır.

Bu başlık altında verilecekler, Ulusal ve Uluslararası ölçekte "jeolojik miras akreditasyonu" sağlama açısından; Çiftçi ve Güngör (2016) tarafından yapılan "Jeopark Projeleri Kapsamındaki Doğal Ve Kültürel Miras Unsurları İçin Standart Gösterim Önerileri"; Çiftçi ve Güngör (2017b) "Dünya'da ve Türkiye'de Jeolojik Miras Envanteri Hazırlama ve Jeokoruma Çalışmaları: Akreditasyon, Ulusal Kodlama Sistemi ve Etkileşimli Veri Tabanı Önerisi" ile yine Çiftçi ve Güngör (2017a) tarafından "Jeolojik Miras Envanteri Hazırlamada Terminoloji, Yöntem, Kurumsal Sahiplenme ve Eşgüdüm" isimli çalışmalarında belirtilen konular dikkate alınarak hazırlanmaya çalışılmıştır.

## **Sonuçlar**

Dereiçi travertenlerinin en genç ve görsel olarak en güzel üyesini oluşturan teras tipi travertenlerin, en temel problemi kaynak azlığıdır. Bölgedeki havuzların birçoğu yeterli miktarda su çıkmaması ve kaynağın sürekli yer değiştirmesinden dolayı kurumuştur ve kurumaya da devam etmektedir. Bu bağlamda acil önlem olarak, gerekli öncel çalışmalar


yapılmalı ve kaynak çıkarılarak bu havuzların güncelliğini korunması sağlanmalıdır.

Bir diğer sorun ise, yıl içinde birçok ziyaretçi tarafından ziyaret edilen bu travertenler, maalesef, bilinçsiz ziyaretçiler tarafından tahrip edilmekte ve yıllar süren oluşumlar bir anda üzerinde bilinçsizce dolaşan ziyaretçiler tarafından bozulmaktadır. Doğal traverten havuzları ziyarete kapatılmalıdır. Bununla birlikte, traverten havuzların yanına yapılacak yapay havuzların ziyaretçilerin kullanımına açılması sağlanmalıdır.


Travertenlerin etrafına bilgilendirici pankartlar bırakılmalı, yürüyüş yolları ve ihtiyaç alanları yapılarak gelen ziyaretçilerin bölgede keyiflice vakit geçirmesi sağlanmalıdır. Tüm bunlara ek olarak bölge halkına ekonomik olarak katkı sunacak işlevler kazandırılmalıdır. Bu şekilde Dereçi travertenlerinin ekonomiye ve turizme çok daha fazla katkısı sunulabileceği düşünülmektedir.

## Jeosit Kartları

JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)	
DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLojİK MİRAS (JEOSİT)	
COĞRAFİK KONUM	JEOSİT TANIMI
<p>X: 4207362 Y: 0488737 Z: 2013 m. KOORDİNAT SİSTEMİ: UTM PROJEKSİYON: ED50 1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO: M51/B3 DİLİM: İLİ: Van İLÇESİ: Başkale KÖYÜ: Dereçi MEVKİİ: Kızıltepe ULAŞIM TANIMI: Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayrımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Açılma Çatlağı ve Yürüyüş Kanalı <b>JEOSİT SINIFI:</b> JS - 5 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b> (JS-5/AÇ-C);10 <b>BOYUTLARI:</b> (U: Uzunluk, Y: Yükseklik, G: Genişlik) <b>U:</b> 7,6 m <b>Y:</b> 40 - 80 cm arası <b>G:</b> 47 - 68 cm arası <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten <b>JEOLojİK YAŞI:</b> Kuaterner <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçi Travertenleri</p>
JEOLojİK MİRAS ÖZELLİKLERİ	FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK
<p><b>TANIM:</b> Alana karayolundan girişte ilk göze çarpan ve alana girişte bir bir yol görevi gören çatlak ve kanal <b>ÖNEMİ:</b> Bu tür oluşumlar bilimsel açıdan travertenlerin yaşlandırılması ve gelişimi açısından bir kanıt olmakla birlikte görsel olarak ta ender güzelliklerden sayılabilir. <b>BİLİMSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit herhangi bir açılma çatlağı içeren travertenler ile benzerdir. Ancak yürüyüş kanalı, traverten duvarı ve diğer oluşumları ile benzersizdir. <b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 5 <b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:--</b> <b>ROTA ADI VE NUMARALANDIRMA:--</b> <b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde (içilebilir su) <b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:--</b> <b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:--</b> <b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın <b>AÇIL DURUM TEL:</b> 156</p>
JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)	
AÇILMA ÇATLAĞI VE YÜRÜYÜŞ KANALI (JS-5/AÇ-C);10	TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:

KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ	JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ
<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir.</p> <p><b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınmaz, kazılamaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez.</p> <p><b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılmaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI: -- BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ</p> <p><b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017</p> <p><b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015</p> <p><b>İLGİLİ YAYINLAR:</b>  <b>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253</b>  <b>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305</b>  <b>Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577</b></p> <p><b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b>  Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p> <p><b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b></p>
ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ	JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ
	<p>Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p>

JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)	
DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLojİK MİRAS (JEOSİT)	
COĞRAFİK KONUM	JEOSİT TANIMI
<p>X: 4207385 Y: 0488733 Z: 2013 m. KOORDİNAT SİSTEMİ: UTM PROJEKSİYON: ED50 1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO: M51/B3 DİLİM: İLİ: Van İLÇESİ: Başkale KÖYÜ: Dereçi MEVKİİ: Kızıltepe ULAŞIM TANIMI: Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayrımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Traverten duvarı <b>JEOSİT SINIFI:</b> JS - 5 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b> (JS-5/TD - A);5 <b>BOYUTLARI:</b> Değişken boyutlara sahiptir. <b>X:</b> 1 - 3 m arasındadır <b>Y:</b> 71 m <b>Z:</b> 3 - 5 m arası <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten <b>JEOLojİK YAŞI:</b> Kuvaterner <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçi Travertenleri</p>
JEOLojİK MİRAS ÖZELLİKLERİ	FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK
<p><b>TANIM:</b> Hemen Açılma çatlaklarının devamında geçecek duvar <b>ÖNEMİ:</b> Bu tür oluşumlar görsellik açısından güzellik sunarken oluşum süreçleri ise hayal gücünü tetikleyici etki sunmaktadır. <b>BİLİMSSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit herhangi bir duvar içeren travertenler ile benzerdir. Aneak çevresindeki diğer oluşumları ile benzersizdir. <b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 5 - GN - 4 <b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:</b> -- <b>ROTA ADI VE NUMARALANDIRMA:</b> -- <b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde ise (içilebilir su) <b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:</b> -- <b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:</b> -- <b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın <b>ACİL DURUM TEL:</b> 156</p>
JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)	
Traverten duvarı ( JS-5/TD - A);5	TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:
KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ	JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ
<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir. <b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınmaz, kazılamaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez. <b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılamaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI:</b> -- <b>BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR, YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ <b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017 <b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015 <b>İLGİLİ YAYINLAR:</b> Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253 <b>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305 <b>Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M., "Dereçi (Başkale,</b></b></p>

	<p>Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577</p> <p><b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b> Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p> <p><b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b></p>
<p>ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ</p>	<p>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</p>
	<p>Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p>


<p><b>JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)</b></p>	
<p><b>DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLJİK MİRAS (JEOSİT)</b></p>	
<p>COĞRAFİK KONUM</p>	<p>JEOSİT TANIMI</p>
<p>X: 4207385 Y: 0488855 Z: 2013 m. <b>KOORDİNAT SİSTEMİ:</b> UTM <b>PROJEKSİYON:</b> ED50 <b>1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO:</b> M51/B3 <b>DİLİM:</b> <b>İLİ:</b> Van <b>İLÇESİ:</b>Başkale <b>KÖYÜ:</b> Dereçiçi <b>MEVKİİ:</b> Kızıltepe <b>ULAŞIM TANIMI:</b>Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayrımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Traverten Bacası <b>JEOSİT SINIFI:</b>JS - 5 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b>( JS-5/TB - A);5 <b>BOYUTLARI:</b> (U: Uzunluk, Y: Yükseklik, G: Genişlik) <b>U:</b> 2 m <b>Y:</b> 2,7 m <b>G:</b> 1,3 - 3 m arası <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten <b>JEOLJİK YAŞI:</b> Kuvaterner <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçiçi Travertenleri</p>
<p>JEOLJİK MİRAS ÖZELLİKLERİ</p>	<p>FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK</p>

<p><b>TANIM:</b> Açılma çatlağı ve traverten duvarının kuzeydoğusunda yer alan traverten bacası.</p> <p><b>ÖNEMİ:</b> Bu tür oluşumlar görsellik açısından güzellik sunarken oluşum süreçleri ise hayal gücünü tetikleyici etki sunmaktadır.</p> <p><b>BİLİMSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit tüm traverten bacaları ile benzerdir. Ancak çevresindeki diğer oluşumları ile benzersizdir.</p> <p><b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 4 - GN -3</p> <p><b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:--</b></p> <p><b>ROTA ADI VE</b></p> <p><b>NUMARALANDIRMA:--</b></p> <p><b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde ise (içilebilir su)</p> <p><b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:--</b></p> <p><b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:--</b></p> <p><b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın</p> <p><b>ACİL DURUM TEL:</b> 156</p>
<b>JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)</b>	
<b>Traverten Bacası ( JS-5/TB - A);5</b>	<b>TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:</b>
<b>KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ</b>	<b>JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ</b>
<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir.</p> <p><b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınmaz, kazılamaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez.</p> <p><b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılmaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI: --</b></p> <p><b>BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ</p> <p><b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017</p> <p><b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015</p> <p><b>İLGİLİ YAYINLAR:</b> Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253</p> <p>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305</p> <p>Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577</p> <p><b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b> Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p> <p><b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b></p>
<b>ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ</b>	<b>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</b>




Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir. (Fotoğraf, Yeşilova, 2021'den alınmıştır).

<b>JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)</b>	
<b>DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLOJİK MİRAS (JEOSİT)</b>	
COĞRAFİK KONUM	JEOSİT TANIMI
<p>X: 4207800 Y: 0488250 Z: 2013 m. <b>KOORDİNAT SİSTEMİ:</b> UTM <b>PROJEKSİYON:</b> ED50 <b>1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO:</b> M51/B3 <b>DİLİM:</b> <b>İL:</b> Van <b>İLÇESİ:</b> Başkale <b>KÖYÜ:</b> Dereçi <b>MEVKİİ:</b> Kızıltepe <b>ULAŞIM TANIMI:</b> Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayrımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Traverten Köprüsü <b>JEOSİT SINIFI:</b> JS - 6 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b> ( JS-6/TK-A);5 <b>BOYUTLARI:</b> (U: Uzunluk, Y: Yükseklik, G: Genişlik) U: 3,3 m Y: 5 m G: 1,5 - 2,5 m arası <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten <b>JEOLOJİK YAŞI:</b> Kuvaterner <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçi Travertenleri</p>
JEOLOJİK MİRAS ÖZELLİKLERİ	FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK
<p><b>TANIM:</b> Açılma çatlağı, açılma kanalı ve traverten duvarının devamında yer alan traverten köprüsü <b>ÖNEMİ:</b> Bu tür oluşumlar, geçirdikleri süreçler bakımından eşsiz güzellikler sunmaktadır. <b>BİLİMSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit diğer traverten köprüsü oluşukları ile benzerdir. Ancak yürüyüş devamındaki şelale ile eşsizdir. <b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 1 - GN - 2 <b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:</b>-- <b>ROTA ADI VE NUMARALANDIRMA:</b>-- <b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde (içilebilir su) <b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:</b>-- <b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:</b>-- <b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın <b>ACİL DURUM TEL:</b> 156</p>
<b>JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)</b>	
<b>Traverten Köprüsü ( JS-6/TK-A);5</b>	<b>TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:</b>
KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ	JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ


<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir.</p> <p><b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınmaz, kazılamaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez.</p> <p><b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılamaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI:</b> --</p> <p><b>BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ</p> <p><b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017</p> <p><b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015</p> <p><b>İLGİLİ YAYINLAR:</b> Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253</p> <p>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305</p> <p>Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577</p> <p><b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b> Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p> <p><b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b> <b>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</b></p>
<p><b>ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ</b></p>	<p><b>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</b></p>
	<p>Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p>

JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)	
DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLojİK MİRAS (JEOSİT)	
COĞRAFİK KONUM	JEOSİT TANIMI
<p>X: 4207800 Y: 0488260 Z: 2013 m. KOORDİNAT SİSTEMİ: UTM PROJEKSİYON: ED50</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Şelale <b>JEOSİT SINIFI:</b> JS - 6 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b> ( JS-6/S-A);5 <b>BOYUTLARI:</b> (U: Uzunluk, Y: Yükseklik, G: Genişlik)</p>

<p><b>1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO:</b> M51/B3  <b>DİLİM:</b>  <b>İLİ:</b> Van  <b>İLÇESİ:</b>Başkale  <b>KÖYÜ:</b> Dereçi  <b>MEVKİİ:</b> Kızıltepe  <b>ULAŞIM TANIMI:</b>Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayrımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>U:</b> 3 m  <b>Y:</b> 6 m  <b>G:</b> 20 - 30 cm arası  <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten  <b>JEOLOJİK YAŞI:</b> Kuvaterner  <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçi Travertenleri</p>
<b>JEOLOJİK MİRAS ÖZELLİKLERİ</b>	<b>FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK</b>
<p><b>TANIM:</b> Traverten köprüsünden geçen suların dik traverten yamaçları üzerinde aşağı akarken oluşturdukları akarsu yapısı  <b>ÖNEMİ:</b>Bu tür oluşumlar, eşsiz güzellikler sunmaktadır.  <b>BİLİMSSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit şelale ile benzerdir. Ancak diğer öğeleri ile eşsiz güzellikler sunmaktadır.  <b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 2  <b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle de çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:--</b>  <b>ROTA ADI VE NUMARALANDIRMA:--</b>  <b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde (içilebilir su)  <b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:--</b>  <b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:--</b>  <b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın  <b>ACİL DURUM TEL:</b> 156</p>
<b>JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)</b>	
<b>Şelale ( JS-6/S-A):5</b>	<b>TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:</b>
<b>KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ</b>	<b>JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ</b>
<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir.  <b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınamaz, kazılamaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez.  <b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılamaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI: --</b>  <b>BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ  <b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017  <b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015  <b>İLGİLİ YAYINLAR:</b> Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253  <b>Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G.,</b> "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeotürizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305  <b>Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M.,</b> "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577  <b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b> Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.  <b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b></p>
<b>ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ</b>	<b>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</b>

	<p>Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p>
---	--

JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ÖN YÜZ)	
DOĞAL MİRAS TÜRÜ : JEOLOJİK MİRAS (JEOSİT)	
COĞRAFİK KONUM	JEOSİT TANIMI
<p>X: 4207800 Y: 0488300 Z: 2013 m. <b>KOORDİNAT SİSTEMİ:</b> UTM <b>PROJEKSİYON:</b> ED50 <b>1/25000 ÖLÇEKLİ PAFTA NO:</b> M51/B3 <b>DİLİM:</b> <b>İLİ:</b> Van <b>İLÇESİ:</b> Başkale <b>KÖYÜ:</b> Dereçi <b>MEVKİİ:</b> Kızıltepe <b>ULAŞIM TANIMI:</b> Başkale - Hakkari kara yolunun 30. km'sindeki yol ayırımından batıya 20 km hareketle köye ulaşım sağlanır. Köyün girişindeki yoldan itibaren 4. km de söz konusu alana giriş sağlanmaktadır.</p>	<p><b>JEOSİT ADI:</b> Traverten havuzları <b>JEOSİT SINIFI:</b> JS - 6 <b>JEOSİT ALT SINIFI VE PUANI:</b> ( JS-6/TT-A);5 <b>BOYUTLARI:</b> (U: Uzunluk, Y: Yükseklik, G: Genişlik) U: 183 - 200 m arası Y: 1 - 5,5 m arası G: 15 - 40 m arası <b>LİTOLOJİSİ:</b> Traverten <b>JEOLOJİK YAŞI:</b> Kuvaterner <b>OLUŞTUĞU STRATİGRAFİK BİRİM:</b> Dereçi Travertenleri</p>
JEOLOJİK MİRAS ÖZELLİKLERİ	FİZİKSEL ÇEVRE, GÜVENLİK VE LOJİSTİK
<p><b>TANIM:</b> Traverten duvarının 10 m. önünde, Şelalenin hemen batısında yer almaktadır. <b>ÖNEMİ:</b> Bu tür oluşumlar, eşsiz güzellikler sunmaktadır. <b>BİLİMSEL DEĞERİ VE BENZER OLUŞUKLAR:</b> Bu jeosit pamukkale ve diğer benzerleri ile benzerdir. Ancak diğer öğeleri ile birlikte eşsiz güzellikler sunmaktadır. <b>EN İYİ GÖZLEM VE SEYİR NOKTASI:</b> GN - 2 - GN - 3 <b>İNCELEME / GÖZLEM İÇİN BULUNDURULMASI GEREKLİ MALZEMELER:</b> Çıplak gözle de çok net gözlemlenebilir.</p>	<p><b>MÜZEYE UZAKLIK:--</b> <b>ROTA ADI VE NUMARALANDIRMA:--</b> <b>EN YAKIN SU KAYNAĞI:</b> kaynak hemen yanı başında, 1,5 km kuzeyde (içilebilir su) <b>EN YAKIN LOJİSTİK İSTASYONU:--</b> <b>EN YAKIN GÜVENLİK TABELA KODU:--</b> <b>DOĞAL AFET RİSKİ:</b> Deprem, taşkın <b>ACİL DURUM TEL:</b> 156</p>
JEOSİT ENVANTER KİMLİK KARTI (ARKA YÜZ)	
<p><b>Traverten Terası ( JS-6/TT-A);5</b> <b>KORUMA / KORUNMA ÖZELLİKLERİ</b></p>	<p><b>TÜRKİYE ULUSAL JEOSİT ENVANTERİ NO:</b> <b>JEOSİT ENVANTER ÖZELLİKLERİ</b></p>

<p><b>KORUNMA TAHRİBAT DERECESESİ:</b> Mermer işletmecilerinin verdiği bir takım zararlar mevcut. Bunun yanı sıra gelen ziyaretçilerin aldıkları örnekler ve yaptıkları aşınmalar büyük ölçekte zarar vermektedir.</p> <p><b>MOSTRA KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Mostralar kırılmaz, örnek alınmaz, kazılmaz, bir yerden başka bir yere nakil edilemez.</p> <p><b>JEOSİT KORUMA ÖNERİLERİ:</b> Yerleşim alanı, piknik alanı, kamp alanı, hayvan otlatma ve sulama alanı, maden arama ve işletme alanı olarak kullanılmaz. Üzerinde herhangi bir aktivite (yürüme vs.) yapılamaz. Çıkan kaynak suyunun azalmasına bağlı olarak bölgesel alanlarda aşınmalara karşı kaynak suyunun tüm alanlara eşit miktarda dağıtılması sağlanmalıdır.</p>	<p><b>İÇİNDE YER ALDIĞI JEOPARK ADI: --</b>  <b>BU FORMU HAZIRLAYANLAR:</b> Çetin YEŞİLOVA, Pelin GÜNGÖR YEŞİLOVA, Mustafa AÇLAN, Hakan ELÇİ  <b>HAZIRLANMA TARİHİ:</b> 24.06.2017  <b>İLK KEŞİF:</b> 18. 05.2015  <b>İLGİLİ YAYINLAR:</b> Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Van Gölü Çevresindeki Travertenlerin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi ", Doğu Anadolu Jeoloji Sempozyumu , VAN, TÜRKİYE, 7-12 Eylül 2015, ss.252-253  Yeşilova Ç., Açlan M., Yeşilova P.G., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Jeoturizm Açısından Değerlendirilmesi", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, ss.304-305  Yeşilova Ç., Yeşilova P.G., Açlan M., "Dereçi (Başkale, Van) Travertenlerinin Fasiyes Analizi ", 68. Jeoloji Kurultayı, ANKARA, TÜRKİYE, 6-10 Nisan 2015, cilt.1, no.1, ss.576-577  <b>MÜZEDE TEMSİLİ:</b> Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.  <b>EK BİLGİ BAŞVURU ADRESİ:</b></p>
<p><b>ENVANTER HAZIRLANDIĞINDAKİ GÖRÜNÜMÜ</b></p>	<p><b>JEOPARK MÜZESİNDEKİ TEMSİLİ</b></p>
	<p>Jeopark müzesinde yapılacak üç boyutlu maketi ile temsil edilmesi daha uygun olacaktır. Ayrıca Jeoloji haritası, enine jeoloji kesitleri ile anlamı pekiştirilebilir.</p>

**Teşekkür:** Bu alışma, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından “FHD-2018-7652” nolu proje olarak desteklenmiştir.

## Kaynaklar

Boray, A., 1975. Bitlis dolayının yapısı ve metamorfizması (in Turkish). Türkiye Jeoloji Bülteni, 18: 81-84.

Çiftçi, Y., Güngör, Y., 2014. Jeosit Tanımlama Ve Jeopark Düzenleme Standartları Üzerine Bir Çalışma, 67. TJK. Bildiri özleri kitabı, s. 422, Ankara.

Çiftçi, Y., Güngör, Y., 2016. Jeopark Projeleri Kapsamındaki Doğal Ve Kültürel Miras Unsurları İçin Standart Gösterim Önerileri. Bulletin of The Mineral Research and Exploration 2016(153):223-238.

Çiftçi, Y., Güngör, Y., 2017a, Jeolojik Miras Envanteri Hazırlamada Terminoloji, Yöntem, Kurumsal Sahiplenme ve Eşgüdüm. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, s. 620 - 621, 10-14 Nisan 2017, Ankara

Çiftçi, Y., Güngör, Y., 2017b, Dünya'da ve Türkiye'de Jeolojik Miras Envanteri Hazırlama ve Jeokoruma Çalışmaları: Akreditasyon, Ulusal Kodlama Sistemi ve Etkileşimli Veri Tabanı Önerisi. 70. Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildiri Özleri, s. 252 - 253, 10-14 Nisan 2017, Ankara

Göncüoğlu, M. C. ve Turhan, N., 1985. Bitlis Metamorfik kuşağı orta bölümünün temel jeolojisi. MTA Rapor No. 7707 (yayımlanmamış).

Güngör, Y., Çiftçi, Y., Şerifoğlu, T. E., Yıldırım, M. A., Çelik, E., 2014. Türkiye'de Jeopark Çalışmalarına Bir Örnek: Nemrut – Süphan Jeoparkı, Bitlis. 67. TJK. Bildiri özleri kitabı, s. 424, Ankara.

Gürler, M., 1997. Doğal koruma alanlarının belirlenmesi ve planlanmasında jeoloji. JMO Semineri; Aynı yazı ve yazar: Birlik Haberleri, Sh. 46-48.

Gürler, M., 1999. Ekolojik planlamada jeolojik oluşumlar için öneri bir sınıflama modeli. TMMOB Birlik Haberleri, Mayıs-Haziran Sayısı, 1999, Ankara.

Gürler, M., 2001. Anıt nitelikli jeolojik oluşumlar ve koruma çalışmaları. JMO Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi, S. 4, 10-11, Ankara.

Gürler, G., Timur, E., 2007. Jeoparkların Koruma Kullanım Yöntemlerinin Belirlenmesi; Karapınar Potansiyel Jeopark Alanı İçin Bir Değerlendirme, Türkiye. Proceedings of The Second International Symposium on Development Within Geoparks Environmental Protection and Education, Lushan, Jiangxi Province, China, 12-15 June, 2007.

Guo, L. ve Riding, R. , 1992, Micritic aragonite laminae in hot water travertine Crust, Ropiano Terme, İtaly, Sedimentology, 45, 1067-1079.

Kazancı, N. 2007. Milli Parklarda Jeolojik Miras 1, Soğuksu Milli Parkı (Kızılcahamam-Ankara), Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Grubu, 61s, Ankara.

Kazancı, N. 2010a. Dünyada ve Türkiye’de Jeosit-Jeopark-Jeomiras Olgusuna Yaklaşımlar. Kızılcahamam-Çamlıdere Jeopark ve Jeoturizm Projesi Raporu, 76s, Ankara.

Kazancı, N. 2010b, Jeolojik Koruma (Kavram ve Terimler), Jemirko ve TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 60s, Ankara.

Kazancı, N. ve Şaroğlu, F., 2009. Türkiye Jeositleri Çatı Listesi. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı (13-17 Nisan 2009) Bildiri Özleri Kitabı-I, Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, s. 266-267.

Koçan, N., 2012a. Ekoturizm ve Sürdürülebilir Kalkınma: Kızılcahamam-Çamlıdere (Ankara) Jeopark ve Jeoturizm Projesi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 2/6, 69-82, Trabzon.

Perinçek, D., 1979, The Geology of Hazro-Korudağ-Çüngüş-Maden-Ergani-Elazığ-Malatya area: Guide Book, TJK yayını, Ankara

Perinçek, D., 1990. Hakkari ili ve dolayının stratigrafisi, GDA Türkiye: TPJD Bülteni, cilt 2/1, s. 21-68.

Ricou. L., 1971. Le croissant ophiolitique péri-arabe: Une ceinture de nappes mises en place au Crétacé supérieur. Revue de Geologie Dynamique et de Geographie Physique, 13: 327-350

Sağlam Selçuk, A., 2016. Evaluation of the relative tectonic activity in the eastern Lake Van basin, East Turkey. Geomorphology, 270: 9– 21.

Şengün, M., 1993. Bitlis Masifi’nin metamorfizması ve örtü çekirdek ilişkisi. MTA Dergisi, 115 (1), 1-13.

Tolluoğlu, A. Ü., 1981. Mutki (Bitlis) yöresi metamorfiklerinin petrografisi/petrolojisi. Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, 86 s. Ankara (yayımlanmamış).

Yeşilova, Ç., 2021. Potential Geoheritage Assessment; Dereçi Travertines, Başkale, Van (east anatolian Turkey). Manas Journal of Engineering. 9 (1): 66 – 71

Yeşilova., 2022. Climatic and tectonic effects on the origin and evolution of the Dereçi travertines (the Başkale Basin, Eastern Türkiye), and neotectonic implications. Geo logical Quarterly, 66:27

Yılmaz, Y., 1971. Étude petrographique et geochronologique de la region de Casa (Partie Meridionale du Masif de Bitlis, Turquie, These de doct 3 cycle). Univ. Sci.Med. Greonable, 230.

Yılmaz, O., 1975. Cacas bölgesi (Bitlis Masifi) kayaçlarının petrografik ve stratigrafik incelenmesi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 18 (1), 33-41.



# BÖLÜM 8

## AKTİF KARBONUN MÜHENDİSLİKTE KULLANIMI

*Mehtap ERŞAN<sup>1</sup>*

*Aslı Eda ERDOĞAN<sup>2</sup>*

---

1 Prof. Dr. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü [mersan@cumhuriyet.edu.tr](mailto:mersan@cumhuriyet.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-5429-4468>

2 Doktora Öğrencisi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Abd [20219224001@cumhuriyet.edu.tr](mailto:20219224001@cumhuriyet.edu.tr), <https://orcid.org/0000-0002-6281-2747>

## 1. GİRİŞ

Aktif karbon, geniş yüzey alanı, yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve gözenekli yapısı nedeniyle adsorpsiyon sürecinde sıklıkla kullanılan adsorbantlardan biridir. Ayırma, saflaştırma, uzaklaştırma ve geri kazanımında, gıda, çevre, kimya, enerji, metalurji, tekstil, sağlık gibi alanlarda tercih edilmektedir (Balçık vd., 2020).

Genel olarak aktif karbon; hammaddelerin doğası, fiziksel ve kimyasal özellikleri, aktivasyon yöntemi, aktive edici maddenin cinsi ve aktivasyon sürecinin koşulları gibi birçok faktörden etkilenir. (Putri vd., 2025).

Hammadde sınıflandırmasına göre, aktif karbon kabaca biyokütle bazlı ve kömür bazlı olmak üzere iki ana türe ayrılabilir. Adsorpsiyon, kataliz ve diğer alanlarda daha yüksek performans gösteren ve yaygın olarak uygulanan biyokütle bazlı aktif karbon, çevreye salınan C miktarını azalttığından yavaş yavaş kömür bazlı aktif karbonun yerini almıştır (Kaya vd., 2023; Wang vd, 2024).

Biyokütle bazlı aktif karbon ayrıca bol miktarda bulunması, çevre dostu olması ve ekonomik değeri olan bir ürün olarak kullanılma potansiyelinin yüksek olması nedeniyle aktif karbon üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır (Putri vd., 2025).

Aktif karbon, önemli özgül yüzey alanı gösteren (genellikle 600–1200 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) oldukça gözenekli, asit, alkali ve ısıya karşı fiziksel ve kimyasal kararlılık gösteren geri dönüştürülebilir bir malzemedir (Jiao vd., 2025).

Aktif karbon elde etmede fiziksel aktivasyon ve kimyasal aktivasyon olarak iki yöntem kullanılır. Fiziksel aktivasyon, buhar, nitrojen ve karbondioksit kullanılarak 700-1000 °C arasındaki sıcaklıklarda karbonlu malzemelerin hafif indirgenmesine dayanır. Kimyasal aktivasyonda ise hammadde KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gibi kimyasallar kullanarak ve susuzlaştırarak aktive edilir. Kimyasal aktivasyonla üretilen aktif karbon, fiziksel aktivasyonla üretilene kıyasla daha düşük ısı ve süre uygulamalarına ve daha yüksek derecede gözenekliliğe sahip olsa da bu prosedürün bir dezavantajı, aktivasyon işlemi tamamlandıktan sonra kullanılan aktivatörün son karışımdan çıkarılması gerekliliğidir (Jiao vd, 2025).

Genel olarak, bu süreçteki en kritik parametreler aktivatör tipi, sıcaklık, emdirme oranı, gaz akış hızı ve aktivasyon süresidir. Bu parametreleri kontrol ederek, aktif karbonun özgül yüzey alanı, gözeneklilik ve yüzey morfolojisi gibi mikro yapısal özellikleri değiştirilebilir ve düzenlenebilir (Jiao vd, 2025).

Aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi gibi avantajlarını, diğer malzemelerin özellikleriyle birleştirerek daha işlevsel

ve verimli malzemeler olan aktif karbon kompozitleri elde edilebilir. Aktif karbonların ister tek başına isterse kompozit haline getirilerek kullanılması farklı mühendislik dallarında uygulanabilirliğini sağlar ve endüstride genellikle bu tip aktif karbonlar tercih edilir.

Aktif karbon kompozitleri, polimerler, metaller veya diğer karbon bazlı malzemelerle birleştirilir. Örneğin, gümüş nanopartiküllerle yapılan kompozitler, antimikrobiyal özelliklere sahip olabilir ve sağlık sektöründe kullanılabilir. Su arıtma sistemlerinde kirleticileri ve istenmeyen bileşenleri uzaklaştırmada, gıda ve içecek endüstrisinde şeker, glikoz, meyve suyu ve şarap gibi ürünlerde renk giderimi ve safsızlıkların uzaklaştırılmasında tercih edilir. Ayrıca, aktif karbon kompozitleri süperkapasitörler ve bataryalar gibi enerji depolama cihazlarında da kullanılmaktadır.

Su ve hava kirliliğini azaltmadaki etkinliği, kirleticileri adsorbe ederek çevreye zarar veren maddelerin yayılmasının engellemesi ile çevresel korumada; daha hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı ürünlerin üretilmesine olanak sağladığı için yenilikçi malzeme geliştirmede; safsızlıkların giderilmesi ve ürün kalitesinin artırılmasını sağladığı için endüstriyel verimliliğin artırılmasında kullanılabilir.

## 2. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Aktif karbon (AC)'un kirliliklere karşı fiziksel, kimyasal ve hidrofobik etkileşimlerde bulunduğu söylenilebilir. AC, adsorbsiyon özelliği sayesinde yüzeyindeki gözeneklerde kirleticileri fiziksel olarak tutar. Bu durum özellikle organik moleküller; boyalar ve antibiyotikler için etkindir. AC, yüzeyindeki fonksiyonel gruplar sayesinde ağır metallerle kimyasal bağlar oluşturabilir ve bu durum ise metal iyonlarının giderilmesinde kullanılır. Boyalar ve antibiyotikler gibi organik kirleticiler, AC'un hidrofobik yüzeyi ile etkileşime girer. Elektrostatik çekim ile AC'un yüzey yükü (+) veya (-) yüklü kirleticileri çekebilir. (+) yüklü birçok metal iyonu bu şekilde AC'un yüzeyine bağlanabilir. Bu mekanizmalar sayesinde AC'un özellikle su arıtma süreçlerinde geniş bir kullanım alanına sahip olması kaçınılmazdır.

Aktif karbon; su ve atık su arıtımı, hava temizleme, emisyon ve toprak kirliliği kontrolü gibi çevresel uygulamalarla çevre mühendisliğinin; kimyasal süreçlerde katalizör taşıyıcı olarak kullanımı, solvent geri kazanımı ve kimyasal reaksiyonların optimizasyonu gibi uygulamalarla kimya mühendisliğinin; endüstriyel filtreleme sistemleri ve hava temizleme cihazlarının tasarımı ve geliştirilmesi konularında makine mühendisliğinin; gıda ve içecek üretiminde aroma ve renk giderimi, gıda güvenliği ve kalite kontrol uygulamaları ile gıda mühendisliğinin; zehirlenme tedavisi, diyaliz ve hemoperfüzyon gibi tıbbi uygulamalarla tıp ve biyomedikal mühendisliğinin, yeni nesil antimikrobiyal ajanlar, koruyucu malzemeler ve enerji

depolama cihazları uygulamalarında malzeme ve nanoteknoloji mühendisliğinin uygulama alanları kapsamındadır.

## 2.1. Su ve Atık Su Arıtımında Kullanımı

Su kirliliği, temiz suya ulaşmayı insanlık için kalıcı bir zorluk haline getirmiştir. Çoğunlukla tekstil, kağıt, boya, ilaç, kozmetik ve gıda endüstrileri tarafından üretilen atık sular boya maddeleri gibi bileşenler içermektedir. Su kütlesinin kirlenmesi ve atık suyun veya efluantın arıtılmadan su kütlesine salınması nedeniyle suyun canlılar tarafından tüketimi ve yaşama elverişliliği zorlaŐmıştır (Akinyemi, 2024).

Aktif Karbon uygulamaları, atık sulardaki organik maddelerin miktarını yansıtan COD (kimyasal oksijen ihtiyacı) ve BOD (biyokimyasal oksijen ihtiyacı) değerlerini düşürmek için etkili yöntemlerdir. Aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapısı sayesinde gerçekleşen bu süreçte, aktif karbon, sudaki organik ve inorganik kirlleticileri yüzeyine çeker ve tutar. Böylece çözünmüş organik maddeler giderilerek COD ve BOD değerleri azalır. Aktif karbon, adsorbsiyon kapasitesi sayesinde bu organik bileşikleri adsorbe ederek suyun temizlenmesine yardımcı olur.

### 2.1.1. İçme Suyu Arıtımında Kullanımı

Su, canlıların hayatta kalmak için ihtiyaç duyduğu en temel kaynaktır. Su kirliliği, evrensel bir sorundur. Çünkü tekstil, boyama, madencilik, metalurji, piller, deri, ilaç ve gübreler dahil olmak üzere endüstriyel atıklar, boyalar ve ağır metaller gibi birçok organik ve inorganik tehlikeli bileşiklerin potansiyel bulaŐı ortamıdır. Örneğin tekstil, kozmetik, deri, ilaç, gıda, kağıt ve boya endüstrileri gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan azo boyalar, bu tür boyaları kullanan işçilerde mesane kanseri gibi hastalıklara neden olabildiğinden, mutajenik, kanserojen ve genotoksiktir. Ayrıca, cıva, kadmiyum, krom, bakır, kurşun ve nikel gibi biyolojik olarak parçalanmayan ağır metallerin de endüstriyel atıklar nedeniyle suya bulaŐması çevresel endişeler ve insan sağlığına olumsuz etkileri artırmaktadır. (İles vd., 2024).

İçme suyu elde etmek için konvansiyonel, ileri ve membran arıtma prosesleri uygulanan yöntemler arasındadır (Sevgili, 2021). İçme suyu elde etmek için kullanılan yöntemler çeşitli olsa da daha verimli, daha etkin su arıtma teknolojisine duyulan ihtiyaç her gün artmaktadır.

Aktif karbon, sudaki istenmeyen kokuları ve renkleri adsorbent olması nedeniyle gidererek COD ve BOD değerlerini düşürür ve suyun genel kalitesini artırır. Ayrıca mikroorganizmaların büyümesini sağlayarak biyo-

lojik arıtma süreçlerini destekleyebilir; bu da BOD değerlerini düşürmeye katkıda bulunur.

İçme suyu arıtma tesislerinde geleneksel bir uygulama olan granül aktif karbon filtreleri yabancı maddeleri ve kirleticileri gidermek için genellikle bir işleme adımları zincirinin sonunda kullanılırken toz aktif karbon ise su arıtma tesislerinin başında kullanılır. Biyolojik aktif karbon kullanımı da yaygın olsa da proses kontrolündeki zorluklar bu yöntemin dezavantajıdır (Scholz, 2023).

### 2.1.2. Endüstriyel Atık Su Arıtımında Kullanımı

Endüstriyel atık su arıtımı, endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan atık sudaki kirleticilerin, suyun çevreye deşarj edilmeden veya yeniden kullanılmadan önce güvenli olduğundan emin olmak için çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle uzaklaştırılması işlemidir. Son yıllarda, sıvı atıkların çevreye deşarj edilmesiyle ilgili Avrupa mevzuatı (Water Framework Directive) daha katı hale gelmiş ve ağır metaller ve açığa çıkan endişe verici kirleticiler (Contaminants of Emerging Concern; CEC'ler) konusuna dikkat çekmiştir. Madencilik gibi endüstriyel proseslerden, atık bertarafı esnasında insan faaliyetlerinden veya doğal nedenlerden dolayı, biyolojik olarak parçalanmayan ve toksik olup insan ve hayvan sağlığı için tehlike oluşturan ağır metaller, su kütlelerini kirletebilmektedir. Son zamanlarda çevrede tespit edilen ilaçlar, hormonlar ve steroidler, dezenfeksiyon yan ürünleri, hijyen ve kişisel bakım ürünleri, yüzey aktif maddeler, alev geciktiriciler, ev ürünleri, tarım kimyasalları (pestisitler ve gübreler) ve mikroplastikler gibi çok çeşitli kimyasallar, yaygın CEC'lerdir (Pereira vd., 2024).

Kimyasal çöktürme, koagülasyon-flokülasyon, membran filtrasyonu, gelişmiş oksidasyon ve iyon değişimi gibi geleneksel yöntemler atık suların ağır metallerin ve CEC'lerin arıtılması için kullanılır. Ancak bu prosedürlerin, uzaklaştırma verimliliğinin zayıf olması, önemli ölçüde enerji tüketimi ve zararlı çamur üretiminin olması yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir (Pereira vd., 2024). Ayrıca bu geleneksel yöntemler yüksek konsantrasyonlarda atık su akışlarında kalabilen ağır metaller gibi belirli kirleticileri gidermede sınırlı etkinlik gösterebilir (Mklima vd., 2024). Bu tür kirleticileri sıvı atıklardan uzaklaştırmak için iyi geliştirilmiş ve uygun maliyetli bir yöntem olan adsorpsiyon için alümina, aktif karbon, kil, silika jel, kompozitler, zeolitler ve çeşitli kökenli biyokütle adsorban malzemeler olarak kullanılmaktadır (Pereira vd., 2024).

Hindistan cevizi kabukları ve biyorafineri atıkları bazı aktif karbon filtrelerin geliştirilmesiyle organik ve inorganik kirleticilerin, uçucu orga-

nik bileşiklerin (VOC) ve metallerin endüstriyel atık sularından giderilmesi mümkün hale gelmiştir (Verma ve Quraishi, 2023).

Aktif karbonun su arıtmada kullanılmasıyla; koku, tat ve renk veren bileşikler, çürük bitkiler ve diğer bileşiklerden kaynaklanan organik ve inorganik maddeler, klorlama sonucu oluşan istenmeyen bileşikler, su kültüründen kaynaklanan toksinler, endokrin bozucu bileşikler, ilaçlar ve kozmetik ürün artıkları, pestisit bazlı bileşikler, metal, ağır metal ve metal iyonları endüstriyel atık sularından uzaklaştırılabilmektedir (Verma ve Quraishi, 2023). Ayrıca topraktaki pestisitler, ağır metaller ve diğer kirleticileri adsorbe ederek toprak kalitesini iyileştirmede ve mikroorganizmalarla birlikte kullanılarak kirlenmiş toprakların biyolojik arıtımında kullanıldığı da söylenebilir.

## 2.2. Hava ve Gaz Arıtımında Kullanımı

Atık yakma tesislerinde baca gazı arıtımı ve dioksin, ağır metal ve diğer zararlı maddelerin giderilmesinde, otomobillerin egzoz gazı arıtma sistemlerinde karbon monoksit ve nitrojen oksitler gibi zararlı gazların emisyonunun azaltılmasında, hidrojen sülfür, merkaptanlar ve amonyak gibi kötü kokulu gazların adsorpsiyonu ile koku kontrolünde, gaz maskelerinde filtre malzemesi olarak aktif karbon sıklıkla kullanılmaktadır.

### 2.2.1. Endüstriyel Egzoz Gazı Arıtımında kullanımı

Ozon ve organik aerosollerin öncüsü olarak hareket eden uçucu organik bileşikler (VOC'ler), hava kirliliğinin önemli kaynaklarıdır ve endüstriyel egzoz gazlarında farklı boyutlardaki bileşenlerin karışımları olarak bulunurlar. Aktif karbon, metalurjik baca gazından yayılan VOC'lerin giderilmesi için yaygın olarak kullanılan bir adsorban türüdür (Chen vd., 2025).

Chen vd., 2025'in farklı boyutlardaki VOC'ler arasındaki rekabetçi adsorpsiyonu inceledikleri çalışmasında farklı kinetik çaplara sahip VOC'lerin rekabetçi adsorpsiyonunu hafifletmek ve eş-adsorpsiyon kapasitesini artırmak için hiyerarşik gözenek yapılandırması oluşturma konusunda etkili bir strateji önerilmiştir. Bu bağlamda moleküler polarite ve moleküler dinamik çaplarındaki önemli farklılıklar nedeniyle tipik kirleticiler olarak seçilen toluen ve diklorometanın eş-adsorpsiyonunda hiyerarşik gözenek yapılandırmasının rolünü incelemek için ayarlanabilir gözenek hiyerarşisine sahip kömür

bazlı gözenekli karbon kullanılmıştır.

Yapılan korelasyon analizleri ve moleküler dinamik simülasyonları, hiyerarşik gözenekli karbonun, tolueni mezogözenek içinde, diklorometanı ise esas olarak mikrogözenek içinde dağıldığı benzersiz bir adsorpsiyon davranışı sergilemiştir. Böylece rekabetçi adsorpsiyonun etkili bir şekilde azaltılabileceği gösterilmiştir. Bulunan mekanizma, toluen ve diklorometanın eş-adsorpsiyon koşulu altındaki adsorpsiyon kapasitesinin mikrogözenek baskın karbona kıyasla %50'den fazla artırıldığı bulunmuştur. Söz konusu mekanizma, karışık VOC'lerin eş-adsorpsiyon sürecinin optimizasyonunu ilerletmek için teorik bir temel sağladığı sonucuna varılmıştır (Chen vd., 2025).

### 2.2.2. İç Mekan Hava Kalitesinin İyileştirilmesinde Kullanımı

İç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesinde hava kalitesi iyileştirme cihazlarının yaygın olarak kullanımlarının aksine, bu teknolojilerin kirletici giderim etkinlikleri, enerji kullanımları ve sarf malzeme gereksinimlerine yönelik araştırmalar son derece sınırlıdır ve yaygın olarak HEPA filtre, UV dezenfeksiyon, aktif karbon ve ozon teknolojisi ile geliştirilmiştir. İç ortam havasının iyileştirilmesi için önerilen çözümler kirleticinin türünden, kaynağından ve yayılma şekline göre etkilenmeleri nedeniyle çeşitlilik göstermektedir. Söz konusu çözümler kaynak kontrolü olabileceği gibi, havalandırma ile konsantrasyonun azaltılmasına yönelik veya sadece maruziyetin azaltılmasına yönelik de olabilmektedir. Günümüzde kullanılan birçok çeşit hava temizleyici bulunmaktadır. (Babaei vd., 2017).

Gaz fazı hava filtreleri, gaz kirleticilerini, havadaki alerjenleri ve partikülleri aktif karbon gibi gaz absorplama özelliği bulunan sorbentler üzerinde tutulmasını sağlayarak ortamdan uzaklaştırmaktadır.

İç ortam kalitesini artırmada aktif karbonlu sistemler formaldehit, benzen ve diğer zararlı maddelerin uzaklaştırılması için de kullanılmaktadır. Örneğin Amonyak ( $\text{NH}_3$ ), zehirli bir gaz olarak, özellikle kapalı ve küçük yerlerde düşük konsantrasyonlarda bile insan sağlığına olumsuz etkilere neden olur. Wang vd. (2024)'nin deniz yosunu atıklarından aktif karbon ürettikleri çalışmasında AC yüzeyine bakır yüklenerek (Cu-AC filtresi) maliyet etkin bir  $\text{NH}_3$  adsorbantı hazırlanmıştır. Cu-AC filtresi ilk 10 dakika içinde başlangıç konsantrasyonu 400 ppm olan  $\text{NH}_3$ 'ü neredeyse tamamen uzaklaştırmıştır. Ek olarak, Cu-AC filtresi 128,6 mg/g olan mükemmel bir adsorpsiyon kapasitesi göstermiş ve iyi rejenerasyon ve yeniden kulla-

nılabilirlik sergilemiştir. Bu nedenle, mevcut çalışma deniz yosunu atığının iç mekan hava arıtımı için umut verici bir  $\text{NH}_3$  adsorbantı olarak geliştirilme potansiyelinin olduğunu öne sürmüştür (Wang vd., 2024).

### 2.3. Gıda ve İçecek Endüstrisinde Kullanımı

Aktif karbon gıda endüstrisinde iki şekilde kullanılır: Gıda katkı maddesi veya ilaç olarak oral yolla alınan medikal aktif karbon ve istenmeyen bileşiklerin gideriminden sonra ortamdan uzaklaştırılan, saflaştırma ajanı olarak aktif karbon (Balçık vd., 2020).

Aktif karbonun gıda mühendisliği açısından önemli olduğu alanlar; gıda ve ilaç endüstrisinde saflaştırma ve renk giderimi uygulamaları, içecek ve gıdalarda istenmeyen renk ve kokunun giderimi, şeker ve şurup rafinasyonunda renk ağartıcı olarak kullanımı, raf ömrünü uzatmak için kızartma yağı arıtımı, organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması için içme suyu arıtımı, klimakterik meyve ve sebzelerin raf ömrünü uzatmak için kullanımı, gıdalardaki besinsel olmayan toksik maddelerin uzaklaştırılması olarak sıralanabilir. Ayrıca pizza hamuru, siyah dondurma ve sosis gibi bazı yiyeceklere dumanlı bir tat vermek için aktif kömür bir gıda bileşeni olarak kullanılır (Verma ve Quraishi, 2023).

Yüksek karbon içeriği ve düşük inorganik madde içeriğine, yüksek mekanik direnç ve yoğunluğa sahip yeterli uçucu madde içeren maddelerden aktif karbon sentezlenmektedir. Bu amaçla aktif karbon sentezinde muz kabukları, çay atıkları, zeytin çekirdeği gibi gıda artıkları sıklıkla kullanılır (Tablo 1). Kullanılan gıda atığına bağlı olarak üretilen aktif karbonun özellikleri değiştiğinden bu aktif karbonlar farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir. Muz gövdesi atıklarından elde edilen aktif karbonun sentetik boyadan metilen mavisi gideriminde, mısır koçanından elde edilen aktif karbonun endüstriyel atıklardan ağır metal adsorpsiyonunda kullanımına ait çalışmalar mevcuttur (Danish vd., 2018).

**Tablo 1.** Gıda atıklarından üretilen aktif karbonların endüstriyel uygulama alanları (Balçık vd., 2020).

Hammadde	Uygulama Alanları
Zeytin çekirdeği	Çözücü geri kazanımı Endüstriyel koku giderme
Muz gövdesi atıkları	Sentetik boyadan metilen mavisi giderimi
Nişasta	Hızlı pestisit adsorpsiyonu
Meyve atıkları	Zn adsorpsiyonu
Kestane kabuğu	Metilen mavisi giderimi

Kiraz çekirdeği	Sulu çözeltiden boyar madde (metilen mavisi) giderimi Atık su arıtımı
Çay atıkları	Metilen mavisi ve fenol adsorpsiyonu
Balık atıkları	İyot adsorpsiyonu atık geri dönüşümü
Mısır koçanı	Endüstriyel atıklardan Ağır metal adsorpsiyonu

Muz, avokado, domates gibi klimakterik meyve ve sebzelerde etilen gazı doğal olarak salgılanıp olgunlaşma sürecini başlatır. Bu özellikten yararlanılarak raf ömrünü uzatmak için aktif karbonlar ile olgunlaşma süreci kontrol edilebilmektedir (Balçık vd., 2020).

#### 2.4. Tekstil Endüstrisinde Kullanımı

Tekstil endüstrisinde her yıl 400 milyar m<sup>2</sup> kumaş hazırlamak için küresel olarak 8000'den fazla kimyasal bileşik kullanılarak boyutlandırma, puanlama, merserize etme, renklendirme, baskı gibi çeşitli işlemler uygulanır. Tekstil endüstrilerindeki çeşitli proseslerde çevreye salınmadan önce, önemli miktarda üretilen atık suların arıtımı, fiziksel, kimyasal ve/veya biyolojik yöntemler gerektirebilir. Oluşan bu atık su, aşırı biyolojik oksijen ihtiyacı (BOD) ve kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) içerdiğinden tekstil atık suyunun uygunsuz arıtımı, insan sağlığı sorunlarını da çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, tekstil endüstrileri tarafından üretilen atıkların etkili bir şekilde arıtılması bu endüstride aktif karbon kullanımının tercih edilmesinin ana nedenidir (Beyan vd, 2021).

Şeker kamışı küspesinden üretilen aktif karbonu (SBAC), adsorban olarak kullanarak tekstil endüstrisi atık sularından KOİ ve BOİ giderimi için yapılan bir çalışmada, proses parametrelerinin, SBAC dozunun, reaksiyon pH'ının ve reaksiyon süresinin istatistiksel optimizasyonunu hedeflemiştir. Deneysel veriler, optimum koşullar altında KOİ ve BOİ için giderim oranlarının belirlenmesi için kinetik analize tabi tutulmuş, bağımsız süreç değişkenleri, adsorban dozu, reaksiyon pH'ı ve reaksiyon süresi dikkate alınmış ve RSM tekniği kullanılarak BOD ve COD'nin maksimum giderimi istatistiksel olarak optimize edilmiştir. Optimum 0,915 g/L SBAC dozu, 3,225 pH değeri ve 98,91 dakikalık temas süresinde yalancı birinci dereceden kinetik sergilenmiştir ve BOD ve COD giderimi için hız sabitlerinin sırasıyla 0,0225 ve 0,023 mg/L dak-1 olarak bulunmuştur. Bu çalışma ile tekstil endüstrisi atık suyundan BOD ve COD giderimi için optimum bir süreç modeli geliştirilmiştir (Beyan vd, 2021).

Şeker kamışı küspesi, mısır koçanları, muz kabukları, çiçek atıkları ve pirinç kabukları gibi çeşitli tarımda kullanılan yan ürünler aktif karbo-

nun elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu anlamda, tekstil atıklarında oluşan kirleticileri azaltmak için basit teknolojiyle kullanılabilen ve yüksek verimlilikte düşük maliyetli malzemeler gereklidir. Yapılan son çalışmalarda, araştırmacılar aktif karbon elde etmek için, kolayca bulunabilen, daha az maliyetli daha iyi, malzemelere yönelmişlerdir. (Beyan vd, 2021).

Yüksek selüloz içeriğine sahip olan şeker kamışı küspesi, önemi olan tarımsal-endüstriyel bir kalıntıdır Esasında lignin (%18), hemiselüloz (%28) ve selüloz (%45) içerir. Bu malzemeler, iyon değişimi ve/veya kompleks oluşturma yöntemi ile boya moleküllerini adsorbe etme potansiyelinde olan karboksilik ve hidrosil grupları içermektedir. Bundan dolayı, ucuz ve etkili olan adsorbanlar olduklarından dolayı çekicidirler. Şeker kamışı küspesinden elde edilen aktif karbon kullanılarak çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Metilen mavisindeki fiziksel ve kimyasal adsorpsiyonu ve kinetiği ile ilgili olan bir çalışma Chaiwon ve arkadaşları tarafından  $H_2SO_4$ 'ü aktive edici madde olarak kullanarak yapılmıştır. Metilen mavisi adsorpsiyonunun kinetiğinin psödo-ikinci dereceden modelini izlediğini tespit etmişler ve kimyasal sorpsiyonla adsorpsiyon sürecinin hız sınırlayıcı bir adımı olduğunu beyan etmişlerdir (Beyan vd, 2021).

## 2.5. Tıbbi ve Farmasötik Uygulamalarda Kullanımı

Aktif karbon, Dünya Sağlık Örgütü tarafından listelenen temel ilaçlardan biridir ve oral yoldan tüketilen ilaçlar nedeniyle oluşan zehirlenmelerde toksinlerin emilimini azaltmak ve bazı sindirim sistemi rahatsızlıklarını hafifletmek için tablet veya kapsülleri kullanılır. Ayrıca ilaç üretiminde kullanılan suyun saflaştırılmasında ve renkli bileşiklerin uzaklaştırılmasında aktif karbon kullanılmaktadır (Verma ve Quraishi, 2023).

Adsorban içeren bir kolondan kanın doğrudan perfüzyonu yoluyla kan saflaştırmada (hemoperfüzyon) aktif karbon kullanılabilir. Polimerden üretilen dekstran (Dx) kaplı mezogözenekli aktif karbonun (HSGD) geniş bir moleküler kütle aralığındaki biyolojik moleküller için adsorpsiyon kapasitesinin ve biyouyumluluğunun araştırıldığı bir çalışmada HSGD'yi bir Dx kaplamayla kaplamak, malzemelerin özgül yüzey alanını ve gözenek hacmini azaltmış ve metilen mavisi  $B_{12}$  vitamini, bilirubin ve albümin için adsorpsiyon kapasitesini azaltırken ince parçacık üretimini en aza indirmiştir. Dx kaplamasının fibrinojen adsorpsiyonunu ve kompleman oluşumunu azaltması malzemenin hemoperfüzyon uygulamaları için geliştirilmeye devam edilmesi gerektiğini göstermiştir (Howel, 2016).

Aktif karbon ayrıca son dönem böbrek hastaları için diyalize alternatif olarak kullanılabilir.

## 2.6. Enerji Depolamada Kullanımı

Fosil yakıtların kademeli olarak tükenmesi dünya çapında hidrokarbon kaynaklı enerjinin sınırlı ve pahalı olmasına neden olurken aynı zamanda kötüleşen çevre sorunlarını da beraberinde getirmiştir. Bu nedenle alternatif enerji kaynakları araştırılmış elektrokimyasal enerji depolama ve dönüştürme cihazlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar giderek artmıştır. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu enerjinin üretilmesinden çok kapasitesi, depolanma şekli, verimliliği, maliyeti ve çevresel etkileri üzerinedir (Gao vd. 2016).

Geleneksel kapasitörlere, pillere ve yakıt hücrelerine alternatif olarak gösterilen elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinden biri süperkapasitörlerdir (Gao vd. 2016). Yenilenebilir enerji depolama sistemleri için yenilenebilir atık huş ağacından (dondurma çubukları) çevre dostu gözenekli aktif karbon üretilen bir çalışmada, kimyasal aktivasyon yöntemleriyle sentezlenen gözenekli AC'un elektrokimyasal davranışları, süperkapasitör uygulaması için 6,0 M KOH elektrolitte incelenmiştir. Aktivasyon ve piroliz işlemleri hem AC' un mikro yapısını kontrol etmede hem de grafitleşme ve gözeneklilik derecesini iyileştirmede hayati bir rol oynamaktadır. Piroliz sıcaklığı 800 °C olan AC; 0,75 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup> lik en büyük gözenek hacmi ve 973 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> lik en yüksek özgül yüzey alanı ile hiyerarşik gözenekli yapı sergilemiştir. AC-800 elektrodu, 0,5 A g<sup>-1</sup> lik bir akım yoğunluğunda 408 F g<sup>-1</sup> lik iyi bir kapasitif performans ve mükemmel elektrokimyasal kararlılık ile birlikte üstün bir hız karakteristiği göstermiştir. İki elektrotlu simetrik cihaz, nötr sulu elektrolitte 1 A g<sup>-1</sup> akım yoğunluğunda 133 F g<sup>-1</sup> özgül kapasitans ve 20,6 W h kg<sup>-1</sup> yüksek enerji yoğunluğu ile öne çıkmıştır. Atık huş ağacının (dondurma çubukları), süper kapasitörlerin üretimi için umut verici düşük maliyetli bir öncül olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Selveraj vd., 2022).

Yapılan başka bir çalışmada kahve türevi biyolojik atıklardan elde edilen aktif karbonların (AC) elektrokimyasal enerji depolama performansı değerlendirilmiştir. AC' lar, kullanılmış kahve telvesi ikincil atıklarından polifenol ekstraksiyonundan sonra, fiziksel veya kimyasal aktivasyonla takip edilen bir hidrotermal işlem yoluyla elde edilmiştir. Elde edilen bu malzemeler, 585 ile 2330 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> arasında toplam özgül alana sahip mikro gözenekli yapılar sergilemiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleriyle kimyasal olarak aktive edilen karbonların oldukça gözenekli bir mikro yapı sergilediği, fiziksel aktivasyonun ise malzemede çatlak mikro boyutlu bir morfolojiye yol açtığı görülmüştür. Süper kapasitör uygulamaları için malzemelerin elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesi için 1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. Kimyasal aktivasyondan sonra, kahve türevi biyolojik atıklardan elde edilen malzeme 1,9 V voltaj penceresinde, 1 A g<sup>-1</sup> de, 84 F g<sup>-1</sup> kapasitans, 10 A g<sup>-1</sup> de %70 kapasitans tutma ve 5000 sürekli şarj/

deşarj döngüsünden sonra %85 tutma göstermiştir. Böylece kahve ikincil biyolojik atığının elektrokimyasal enerji depolama malzemesi olarak nasıl uygun şekilde aktive edilebileceği ve dairesel ekonomide yeniden değerlendirilmesine nasıl katkıda bulunabileceği gösterilmiştir (Mas vd., 2021).

Üstün süper kapasitörler için NaOH ile ön işlem görmüş meşeden aktif karbondan mezogözenekli ve makrogözenekli yapıların araştırıldığı bir çalışmada NaOH ile ön işlem görmüş meşe, aktifleştirici madde olarak KOH kullanılarak karbonizasyon ve kimyasal aktivasyon yoluyla AC'ye dönüştürüldü. Ön işlem oranı arttıkça (0 %, 1 %, 2 % ve 8 %) AC'de mezo gözenekler (2–50 nm) ve makro gözenekler (> 50 nm) gelişme eğilimi gösterdi. 2706 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>'e kadar özgül yüzey alanı ve 1,97 cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>'e kadar gözenek hacmi elde edilmesi, NaOH ön işlemi sırasında meydana gelen delignifikasyon ve deasetilasyon reaksiyonları yoluyla lignoselülozik biyokütlenin yapısının gözenek gelişimi için daha avantajlı bir yapıya dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Mezo gözenekli ve makro gözenekli yapılar verimli iyon difüzyon yolları sunar ve direnci azaltır, bu da süper kapasitörlerde üstün hız kapasitesi, kapasite tutma ve 1 mA cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğunda 44,5 F g<sup>-1</sup>'lik bir gravimetrik özgül kapasitansa yol açar. Elde edilen sonuçlar, NaOH ile ön işlem görmüş meşenin enerji depolama uygulamalarında yüksek performanslı AC için sürdürülebilir ve etkili bir öncül olarak potansiyelini vurgulamıştır (Lim vd., 2024).

## 2.7. Kimya ve Petrokimya Endüstrisinde Kullanımı

Reaksiyon verimini artırmak için kullanılan katalizörlerde aktif karbon, taşıyıcı olarak kullanılabilir. Petrol çıkarma ve işleme süreçlerinde aktif karbonun yağ-su ayrımında kullanımı çevresel kirliliğin azaltılması ve su kaynaklarının korunmasına yönelik uygulamalar arasındadır. Kimya ve petrokimya tesislerinden kaynaklanan zararlı gazların aktif karbon ile arıtılması ile endüstriyel emisyonların azaltılmasında da aktif karbondan yararlanılmaktadır.

Rafineriler ve petrokimya tesisleri diğer endüstrilerden farklı olarak farklı uçucu organik bileşiğin (VOC) üretim aşamalarından ve ürün depolama sahalarından atmosfere yüksek miktarda atıldığı çok büyük tesislerdir. Petrol, ham petrolün termal, fiziksel ve kimyasal süreçlerden geçerek rafinasyonu ile elde edilir. Elde edilen ürünler benzin, dizel vb. yakıtlar, solventler, yağlar vb. son ürünler ve nafta, propan gibi kimyasal ürünler olmak üzere üç farklı kategoride değerlendirilmektedir. Bu tesislerde kükürdioksit (SO<sub>2</sub>), indirgenmiş kükürt bileşikler, karbonmonoksit (CO), partikül madde ve azot oksitler (NO<sub>x</sub>) gibi kirleticiler de VOC'ler ile birlikte atmosfere verilmektedir (Dinçer, 2008).

## 2.8. Metalurji ve Madencilikte Kullanımı

Aktif karbon; altın, bakır, kurşun ve çinko madenciliğinde metal iyonlarının adsorpsiyonunda, metalurjik proseslerde katalizör taşıyıcı olarak ve bu proseslerde oluşan zararlı gazların arıtılmasında kullanılmaktadır.

Geleneksel yöntemlerle altın çıkarma işlemi kırma, süzme, adsorpsiyon, desorpsiyon, elektrokaplama ve saflaştırma gibi işlemleri içerir. Altını cevherden ayırma amacıyla sodyum siyanür çözücü olarak kullanılır, aktif karbon (AC) bu kompleksi adsorbe eder ve daha sonra desorpsiyon ve elektroliz yoluyla altın geri kazanılır. Pulping, süzme ve rejenerasyon (geri kazanım) gibi işlemler sırasında meydana gelen AC kayıpları nedeniyle hem AC hem de altın kayıpları olur. Altın rejenerasyonunu optimize etmek için AC kayıplarını en aza indirmek için kullanılan mevcut yöntemler genellikle %41 AC kaybına yol açan ağlara veya eleklere dayanır (Torres vd., 2024).

Altın metalinin mineral cevherinde düşük miktarda bulunması ve ekstraksiyonunun zor olması nedeniyle geri kazanımları düşüktür. Madencilik-metalurji endüstrisinde aktif karbon ile adsorpsiyon prosesleri, partikül dayanıklılığının azaldığı bir takım aşama içerir (Torres vd., 2024).

Suyu ve atık suyu arıtmak için elektriği kullanan bir teknik olan Elektrokoagülasyon, akım destekli olması, yüksek verimlilik, kısa işlem süreleri, düşük işletme maliyetleri ve hidrofobik çamur üretimi dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Torres vd., (2024)'nin önemli miktarda altın içeren ince aktif karbonun kayıplarının geri kazanımına odaklandıkları bir çalışmada, elektrokoagülasyon (EC) ile metalurjik sistemlerde kimyasal reaktifler kullanılmadan, çok ince AC parçacıklarına emdirilmiş altının verimli geri kazanımı artırılmaya çalışılmıştır. Altınla yüklenen ince parçacıkları geri kazanarak EC testleri parti pilot ölçeğinde yapılmıştır, 0,106 mm ve 0,053 mm'lik AC parçacıkları üzerinde, demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak en iyi değişkenler belirlenmiş ve endüstriyel düzeyde interpolate edilmiştir. Daha küçük parçacıklar alüminyum hidroksit türleri içeren daha büyük parçacıklar oluşturmak için birbirine yapışma eğilimi göstermiştir. Böylece çok ince AC parçacıklarını geri kazanmak için EC kullanmanın uygulanabilir olduğu anlaşılmış, alüminyum (Al) ve demir (Fe) elektrotlu EC sistemi, altınla AC geri kazanımlarının sırasıyla %96 ve %88'den fazla olduğunu göstermiştir. Bu çalışma aktif karbonla altın ve siyanürün etkili bir şekilde geri kazanılması için yeşil bir teknolojidir (Torres vd., 2024).

## 2.9. Nanoteknolojide Kullanımı

Nanoteknoloji, nano boyutta olmayan malzemelerin veya kimyasalların nano boyutta sentezlenerek kullanım amacına bağlı olarak istenilen yeni özelliklerde malzeme elde etmeyi amaçlayan bilim dalıdır (Ahamed vd., 2021).

Yapılan bir çalışmada Bambu (*Bambusa vulgaris*) doğal liflerinden ve talaştan elde edilen nano aktif karbondan üretilen kağıt gıda ambalajının gıdaların tazeliğini ve besin değerini koruma yeteneği gösterilmiştir. Nano aktif karbonlu kağıdın biyolojik parçalanma özelliklerinin belirlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada 8 haftalık gözlemden sonra yalnızca bambu liflerinden yapılmış kağıda (kontrol) kıyasla toprakta daha hızlı parçalandığını belirlenmiştir. Mikroorganizma popülasyon yoğunluğu analizi yapılmış, nano aktif karbonlu kağıdın kontrolden daha düşük bir mikroorganizma yoğunluğuna sahip olduğu bulunmuştur. Buna, 12 haftalık gözlemden sonra, kağıt ağırlığında bir azalma eşlik etmiştir. Bu bulgu sayesinde nano aktif karbonun, toprakta kağıdın biyolojik parçalanma oranını hızlandırmak için kağıda eklenecek bir katkı maddesi olarak kullanılabileceği, böylece kağıdın doğal olarak parçalanabilme yeteneğinin çevresel sürdürülebilirliği desteklemek için önemli rol oynayacağı sonucuna varılmıştır. (Hastuti vd., 2021).

Yapılan başka bir çalışmada, aktif karbon meşe ağacı (ACOW600) ve ZnO (ACOW600/ZnO) ve  $Fe_3O_4$  (ACOW600/ZnO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanopartikülleri kullanılarak modifiye edilmiş aktif karbon, sulu çözeltilerden metil menekşe 2B boyasını (MV2B) uzaklaştırmak için kullanıldı. ACOW farklı sıcaklıklarda (300–700 °C) sentezlendi ve daha sonra maksimum MV2B uzaklaştırma verimliliği (%92,76) 600 °C’de sentezlenen ACOW kullanılarak elde edildi. ACOW600, ACOW600/ZnO ve ACOW600/ZnO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>’ün morfolojisi ve özellikleri yüzey analizleri kullanılarak incelendi. Sonuçlara göre, adsorbanlar sıvı çözeltilerden MV2B’yi emme konusunda yüksek bir kabiliyete sahip olduğunu ve kinetik davranışlarının psödo-ikinci dereceden bir kinetiği izlediğini gösterdi. Ek olarak, denge çalışması, ACOW600/ZnO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> manyetik nanokompoziti tarafından MV2B alımının Freundlich modelini izlediğini ortaya koydu. Buna karşılık, Langmuir modeli, ACOW600 ve ACOW600/ZnO kullanarak MV2B adsorpsiyon sürecini tanımladı. ACOW600, ACOW600/ZnO ve ACOW600/ZnO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> kullanılarak MV2B’nin maksimum adsorpsiyon kapasitesi (qm) sırasıyla 26,16 mg g<sup>-1</sup>, 37,05 mg g<sup>-1</sup> ve 48,59 mg g<sup>-1</sup> olarak belirlendi ve bu da ACOW600’ün modifikasyonunun MV2B’yi uzaklaştırma performansını iyileştirmeye yol açtığını gösterdi. Entalpi (ΔH), entropi (ΔG) ve Gibbs serbest enerjisi (ΔS) parametreleri, incelenen adsorbanlar kullanılarak MV2B’nin dekontaminasyonunun ekzotermik ve kendiliğinden olduğunu ortaya koydu. Ayrıca, MV2B moleküllerinin ve adsorban yüzeylerinin

rastgele etkileşimleri adsorpsiyon süreci boyunca azaldı. Tekstil atık suyu, ACOW600, ACOW600/ZnO ve ACOW600/ZnO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> adsorbanları ile önemli ölçüde arıtıldı. Adsorbanların geri dönüşümü, incelenen adsorbanların MV2B giderme sürecinde birçok kez yeniden kullanılabileceğini gösterdi (Foroutan vd., 2022).

### 3. Sonuçlar ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Aktif karbon üretimi ve kullanım alanları, gelecekteki eğilimleri, çeşitli yenilikçi uygulamalar ve sürdürülebilirlik odaklı gelişmeler günümüzde ilgi çekici araştırma konuları arasındadır.

Biyomedikal alanda yapılan bir araştırmada üretilen aktif karbonlu yoğurt ile laktoz intoleransı olan bireyler için alternatif bir seçenek olurken vücuttaki toksinlerin atılmasına da yardımcı olmaktadır (Zümrütdal vd., 2022).

Hava temizleme cihazlarında ve endüstriyel hava filtrelerinde aktif karbon kullanımının artmasının yanı sıra gelişmiş su ve hava arıtma teknolojileri ile üretilen yeni nesil filtreler ile endüstriyel ve evsel su arıtma sistemlerinde daha etkili ve uzun ömürlü aktif karbon filtrelerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Süperkapasitör ve bataryalarda elektrot malzemesi olarak aktif karbonun kullanımının artmasıyla enerji depolama alanında araştırmalar hız kazanırken çevre dostu ve sürdürülebilir hammaddelerden aktif karbon üretiminin artması ile çevre dostu teknolojiler desteklenmektedir.

Son yıllarda manyetik aktif karbonlar çok sayıda araştırma konusu olmuştur. Manyetik aktif karbonlar diğer manyetik adsorbentler gibi adsorpsiyon prosesi sonunda ortamdaki kolaylıkla uzaklaştırılabilmektedir. Bu nedenle diğer adsorbentlere karşı sağlanan bu üstünlük ayırma proseslerinde avantaj yaratmaktadır. Bu giderme üstünlüğünün artması ile adsorbent kapasitesi de artmalıdır. Manyetik adsorbentlerin değişik kirleticileri sulardan uzaklaştırma kapasiteleri üzerine bir çok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir (Özbaş, 2023).

Geliştirilen rejenerasyon teknikleriyle verimlilik, enerji tüketimi ve çevresel etkiler optimize edilebilmektedir. Yeni uygulama ve araştırmalara imkan sağlayan aktif karbon, mühendislik alanlarındaki uygulama potansiyelinin yüksek olması sayesinde günümüzün yenilikçi ve sürdürülebilir çözümlerine katkıda bulunmaya devam edecektir.

## Kaynaklar

- Ahamed, A., Liang, L., Lee, M. Y., Bobacka, J., & Lisak, G. (2021). Too small to matter? Physicochemical transformation and toxicity of engineered nTiO<sub>2</sub>, nSiO<sub>2</sub>, nZnO, carbon nanotubes, and nAg. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124107.
- Akinyemi, A., Agboola, O., Alagbe, E., Igbokwe, E. (2024). The role of catalyst in the adsorption of dye: Homogeneous catalyst, heterogeneous catalyst, and advanced catalytic activated carbon, critical review. *Desalination and Water Treatment*, <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100780>
- Babaei, P., Ogun, E., Güllü, G. (2017). Farklı türdeki hava temizleme cihazlarının partikül madde ve formaldehit giderim etkinliklerinin kıyaslanması. *VII. Ulusal hava kirliliği ve kontrolü sempozyumu*, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Antalya.
- Beyan, S.M., Prabhu, S.V., Sissay, T.T., Getahun, A.A., (2021). Sugarcane bagasse based activated carbon preparation and its adsorption efficacy on removal of BOD and COD from textile effluents: RSM based modeling, optimization and kinetic aspects. *Bioresource Technology Reports*, 14: 100664. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100664>
- Chen, Y., Qu, Z., Sun, F., Li, X., Wang, J., Li, J., Gao, J., Zhao, G. (2025). Revealing the role of hierarchical pore in alleviating competitive adsorption between different-sized VOCs: A mechanistic study using coal-based activated carbon with tunable porous hierarchy. *Separation and Purification Technology*, 359: 130609. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130609>
- Danish, M., Ahmad, T., Majeed, S., Ahmad, M., Ziyang, L., Pin, Z., Iqbal, S.M.S. (2018). Use of banana trunk waste as activated carbon in scavenging methylene blue dye: Kinetic, thermodynamic, and isotherm studies, *Bioresour Technol Rep*, 3, 127-137.
- Dinçer, F., Müezzinoğlu, A., Odabaşı, M. (2008). Petrol ve petrokimya endüstrisi çevresinde dış ortamdaki koku ve uçucu organik madde seviyelerinin incelenmesi. *Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu*, Hatay.
- Foroutan, R., Mohammadi, R., Ahmadi, A., Bikhbar, G., Babaei, F., Ramavandi, B. (2022). Impact of ZnO and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoscale on the methyl violet 2B removal efficiency of the activated carbon oak wood. *Chemosphere*, 286, 131632.
- Gao, L.L., Gai, S., He, F., Chen, Y., Zhang, M., Yang, P. 2016. Ultra small and highly dispersed Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles anchored on reduced graphene for supercapacitor application. *Electrochimica Acta*, 190, 566 -573.
- Hastuti, N., Agustini, L., Indrawan, D.A., Pari, G. (2021). Influence of nano-activated carbon on biodegradation of bamboo paper in the soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 914: 012057. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/914/1/012057>

- Howel, C.A., Sandeman, S.R., Zheng, Y., Mikhailovsky, S.V., Nikolaev, V.G., Sakhno, L.A., Snezhkova, E.A. (2016). New dextran coated activated carbons for medical use. *Carbon*, 97: 134-146. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.09.042>
- Iles, A., Zaoui, F., Daouadji, B.E., Zorgani, M.A., Siddig, L.A., Abdelhamid, A.S., Abubakar, S., Bounaceur, B., Choukchou-Braham, E., Lebsir, F., Saleh, N. (2024). Removal of pollutants by olive stones-derived activated carbon. *Journal of Water Process Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105960>
- Jiao, H., Guo, X., Shu, F., Zhang, Q., (2025). Structure-property-function relationships of wood-based activated carbon in energy and environment materials. *Separation and Purification Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128607>
- Kaya, S., Saka, C., Yildiz, D., Erol, S., Ulas, B., Demir, I., et al., 2023. Enhanced hydrogen production via methanolysis and energy storage on novel poplar sawdust-based biomass-derived activated carbon catalyst. *J. Appl. Electrochem.* 53 (8), 1643–1655. <https://doi.org/10.1007/s10800-023-01873-4>.
- Lim, MS., Kang, SH., Song, DY., Chae, JS., Lee, JW., Lee Y., Roh, KC. (2024). Tailoring mesoporous and macroporous structures in activated carbon from NaOH-pretreated oak for superior supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 96.
- Mas, A.A., Alcaraz, L., Cid, P.A., López-Gómez, F.A., Montemor, M.F. (2021). Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications. *Waste Management*, 120:280-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>
- Mklima, T., Zharkenov, Y., Abduova, A., Sarypbeklova, N., Kudaibergenov, T., Sakanov, K., Zhukonova, G., Omarov, Z., Sultanbekova, P., Kenzhaliyeva, G. (2024). Utilization of banana peel-derived activated carbon for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100791>
- Özbaş, F. (2023). Boyar maddelerin aktif karbon ve aktif karbondan elde edilen manyetik aktif karbon üzerinde adsorpsiyonu. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Pereira, L., Castillo, V., Calero, M., Blázquez, G., Solís, S.S., Martín-Lara, M. Á. (2024). Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105386>
- Putri, A.M.H., Ramadhoni, B.F., Radias, M.S.H., Riyadi, F.A., Alam, MZ., Mu-harram, Y. (2025). Performance of activated carbon derived from tea twigs for carbon dioxide adsorption. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100440>

- Selvaraj, A.C., Deviprasath, C., Bak, J-S. (2022). Bio-waste wood-derived porous activated carbon with tuned microporosity for high performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 52:104928. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.104928>
- Sevgili, İ. (2021). *Kırmızı çamur, bentonit ve aktif karbon katkılı çimentolu kompozitler ile içme suyu arıtımı*, Yüksek lisans tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Scholz, M. (2023). *How activated carbon can help you—processes, properties and technological applications*. *Technologies*, 11(6): 15. <https://doi.org/10.3390/technologies11060153>
- Torres, J.R.P., Etafo, N.O., Zamarripa, G.G. (2024). Efficient gold-cyanide recovery from activated carbon by electrocoagulation technology. *Heliyon*, 10:21. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39570>
- Ülkeryıldız Balçık, E., Torun, M., Şahin Nadeem, H. (2020). Gıda atıklarından aktif karbon üretimi ve aktif karbonun gıda endüstrisinde uygulamaları. *GIDA* (2020) 45 (2): 217-229. doi: 10.15237/gida.GD19127
- Verma, C., Quraishi, M.A. (Ed.) (2023). *Activated Carbon: Progress and Applications*, Royal Society of Chemistry.
- Wang, S., Kim, G. Y., Nam, H., Nam, K. W., (2024). Ammonia gas adsorption study using copper impregnated on mesoporous activated carbon from seaweed waste for indoor air purification. *Building and Environment*, 261: 111737. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105960>
- Wang, Y., Wu, G., Zhang, Y., Su, Y., Zhang, H. (2024). The deactivation mechanisms, regeneration methods and devices of activated carbon in applications. *Journal of Cleaner Production*, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143751>
- Zümrütdal, E., Zarifi, F., Yiğittekin, E.S., İstifli, E.S., Mertoğlu, T.Ş., Türüt, N., Kızıldağ Özdal, N., Akalan, D., Koca, M.B., Uslu, F.M., Çürük, M., Özkan, H., Dinçer, S., Kılınççeker, G. (2022). Effect of Activated Carbon in Yogurt Production. *NESciences*, 7(1): 1-21.