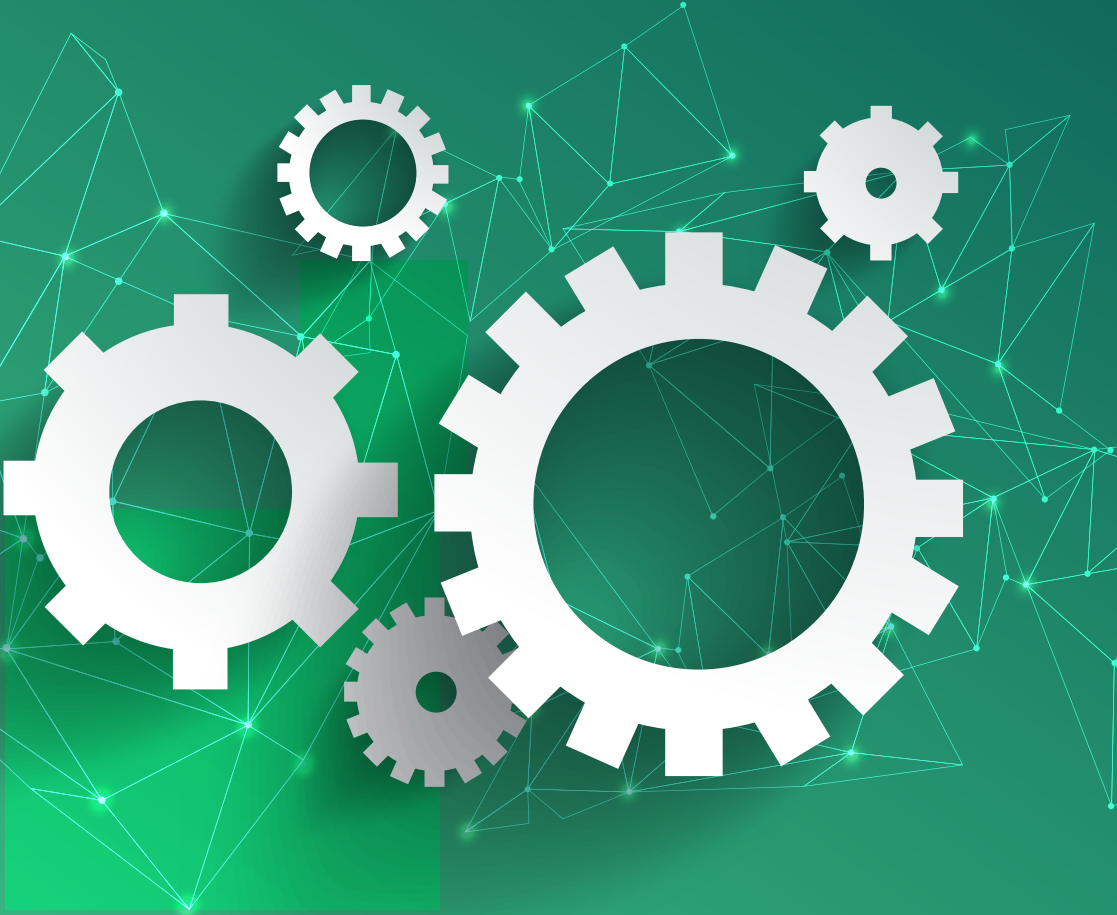


# FEN VE MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALARI-II



## EDİTÖRLER

**PROF. DR. MEHMET ŞİMŞİR**  
**PROF. DR. SALİH CEM İNAN**  
Prof. Dr. **SAYİTER YILDIZ**  
**DOÇ. DR. EBRU YABAŞ**

# FEN VE MÜHENDİSLİKTE GÜNCEL ARAŞTIRMALAR VE UYGULAMALARI - II

*“Bu Kitap Sivas Cumhuriyet Üniversitesi'nin 50. Yılına İthaf Edilmiştir”*

## EDİTÖR

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Prof. Dr. Salih Cem İNAN

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ

Doç. Dr. Ebru YABAŞ

## YAZARLAR

Doç. Dr. Mansur DOĞAN

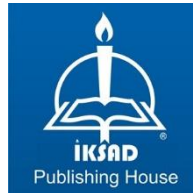
Dr. Öğr. Üyesi Ergün KASAKA

Dr. Yılmaz MERT

Arş. Gör. İlhan DANACI

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI

Arş. Gör. Zinnur YILMAZ



Copyright © 2024 by iksad publishing house  
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or  
transmitted in any form or by  
any means, including photocopying, recording or other electronic or mechanical  
methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of  
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses  
permitted by copyright law. Institution of Economic Development and Social  
Researches Publications®

(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)

TURKEY TR: +90 342 606 06 75

USA: +1 631 685 0 853

E mail: iksadyayinevi@gmail.com

www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.

Iksad Publications – 2024©

**ISBN: 978-625-378-123-1**

Cover Design: Atabek Movlyanov

December / 2024

Ankara / Türkiye

Size = 16x24 cm

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

## BÖLÜM 1

### KÜRESEL ISINMA, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KURAKLIK: STANDARDİZED PRECİPİTATION INDEX (SPI) İLE DEĞER- LENDİRME VE ETKİLERİ

*Dr. Öğr. Üyesi Ergün KASAKA*

*Arş. Gör. Zinnur YILMAZ*.....3

## BÖLÜM 2

### KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE UÇAK YAPILARINDA KULLANIMI

*Arş. Gör. İlhan DANACI*.....29

## BÖLÜM 3

### ELEKTRONİK TEKNOLOJİSİNDE NANOMALZEMELERİN KULLANIMI

*Arş. Gör. Kevser İrem DANACI*

*Arş. Gör. İlhan DANACI* .....51

## BÖLÜM 4

### GÜRÜLTÜ VE İŞİTME KAYIPLARI, KORUNMA YÖNTEMLERİ

*Doç. Dr. Mansur DOĞAN* .....67

## BÖLÜM 5

### ENERJİK MATERYALLERDE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

*Dr. Yılmaz MERT*.....83

## ÖNSÖZ

Üniversiteler, araştırma kurumları ve Ar-Ge Merkezleri yapmış oldukları çalışmalar ile daha iyi bir gelecek sunmak, refaha ulaştırmak, işbirlikleri ile toplumun kalkınmasına ve güçlü bir ekosistem oluşturmak amacıyla çalışmalar yapmaktadır. Bu kitabın amacı da çevre, sağlık ve malzeme gibi konularda örnekler vererek oluşturulan ekosisteme katkı sağlamaktır. Bu kitap yapılan güncel araştırmaları ön plana çıkarmaktadır.

“Küresel Isınma, İklim Değişikliği ve Kuraklık: Standardized Precipitation Index (SPI) ile Değerlendirme ve Etkileri”, “Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi Ve Uçak Yapılarında Kullanımı”, “Elektronik Teknolojisinde Nanomalzemelerin Kullanımı”, “Gürültü Ve İşitme Kayıpları, Korunma Yöntemleri” ve “Enerjik Materyallerde Karakterizasyon Yöntemleri” gibi güncel konular anlatılmıştır.

Bilim ve teknoloji baş döndürücü bir hızda ilerlerken, sunulan bu kitap araştırmacılara ve uygulayıcılara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Prof. Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Prof. Dr. Salih Cem İNAN

Prof. Dr. Sayiter YILDIZ

Doç. Dr. Ebru YABAŞ



## BÖLÜM 1

### **KÜRESEL ISINMA, İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE KURAKLIK: STANDARDİZED PRECİPİTATION INDEX (SPI) İLE DEĞER- LENDİRME VE ETKİLERİ**

Dr. Öğr. Üyesi Ergün KASAKA<sup>1</sup>, Arş. Gör. Zinnur YILMAZ<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Sivas, Türkiye. [ekasaka@cumhuriyet.edu.tr](mailto:ekasaka@cumhuriyet.edu.tr), Orcid ID: 0000000307860196

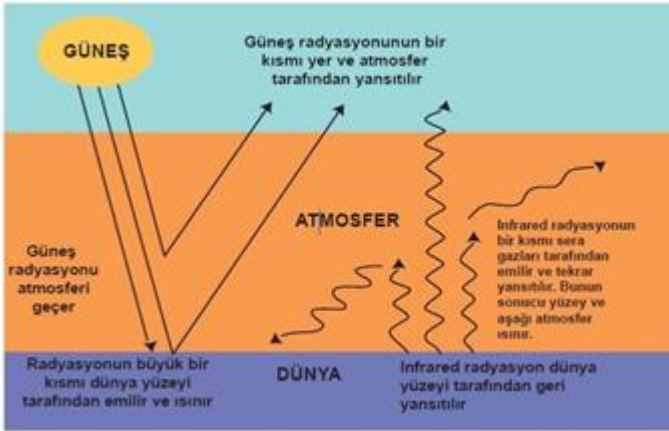
<sup>2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. [zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr](mailto:zinnuryilmaz@cumhuriyet.edu.tr), Orcid ID: 0000000220293854





## GİRİŞ

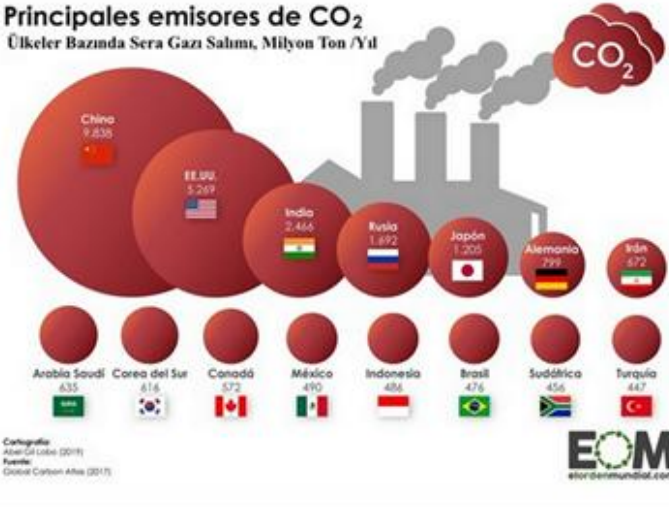
Dünya'nın yüzeyi, güneş sistemindeki diğer gezegenler kavurucu derecede sıcak veya dondurucu derecede soğukken nispeten ılıman ve sabit sıcaklıklara sahiptir. Bu durum gezegeni örten ve koruyan ince gaz tabakası olan atmosferin varlığından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, iklim bilimcilerinin ve araştırmacılarının %97'si, insanların son iki yüzyılda Dünya'nın atmosferini dramatik şekillerde değiştirdiği ve bunun küresel ısınmaya yol açtığı konusunda hemfikirdirler (Riphah, 2015). Küresel Isınma; çeşitli insan etkileri ile sera gazı olarak adlandırılan başta karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) olmak üzere, metan ( $\text{CH}_4$ ), diazotmonoksit ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Kükürt hekzaflorid ( $\text{SF}_6$ ), perflorokarbon (PFCs), hidroflorokarbon (HFCs) gazlarının atmosferde artışına bağlı olarak doğal sera etkisinin (Şekil 1) kuvvetlenmesi sonucunda, yeryüzünde ve atmosferin alt katmanlarında saptanan sıcaklık artışıdır (Cesur, 2020). Başka bir deyişle "Küresel ısınma" dünya, yüzeyinden yansıyan güneş ışınlarının başta karbondioksit, metan ve su buharı olmak üzere atmosferde bulunan gazlar tarafından tutulması sonucu dünya yüzey sıcaklığının artması olarak tanımlanmaktadır. Işınların bu gazlar tarafından tutulmasına ise sera etkisi denilmektedir.



Şekil 1. Sera gazı etkisi (Cesur, 2020)

İnsan faaliyetleri sonucu yayılan birçok sera gazı vardır. Listenin ilk ve en önemlisi karbondioksittir ( $\text{CO}_2$ ). Kömür ve petrol gibi fosil yakıtların aşırı yakılması bu gazın üretilmesindeki en büyük etkindir. Ormansızlaşma, yani

arazi edinmek için ağaçların kesilmesi de atmosfere büyük miktarda karbondioksit salınmasına neden olur. İkinci sırada metan gazı gelmektedir. Metan gazı, hayvancılık, çeltik çiftçiliği ve gübre kullanımı gibi tarımsal faaliyetlerin bir sonucu olarak üretilir. Metan ayrıca atıkların uygunsuz yönetimi nedeniyle de açığa çıkmaktadır. Yine sera gazlarından olan azot oksitler fosil yakıt kullanımı, azotlu organik maddelerin ayrışması ve gübre kaynaklı olarak oluşmaktadır. Kloroflorokarbonlar (CFC'ler) gibi florlu sera gazları ise esas olarak çeşitli endüstriyel süreçlerin ve soğutmanın bir sonucudur (Riphah, 2015). Artan karbondioksit emisyonları küresel ısınmanın yaklaşık %50 - 60'ına neden olmaktadır. Karbondioksit emisyonlarının çoğu, Çin başta olmak üzere ABD ve Avrupa gibi gelişmiş ülkelerdeki endüstriyel süreçlerden kaynaklanmaktadır (Şekil 2). Ancak, ülkemizde olduğu gibi (Çizelge 1) gelişmekte olan ülkelerdeki karbondioksit emisyonları da artmaktadır. Bu yüzyılda, karbondioksit emisyonlarının iki katına çıkması ve bundan sonra da artmaya devam edip sorunlara yol açması beklenmektedir. Fosil yakıtların yakılması ve diğer yanma süreçlerinden kaynaklanan karbondioksit emisyonlarının küresel ısınmaya neden olacağını öngören ilk kişi, 1896'da Svante Arrhenius'tur (Mahasneh, 2021).



Şekil 2. Ülkeler bazında sera gazı salınımı, Milyon Ton/Yıl (URL 1, 2020)

**Çizelge 1.**TÜİK 1990-2021 arası sera gazı emisyonları (URL 2, 2023)

	(Milyon ton CO <sub>2</sub> eşd.)										1990-2021	
	1990	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	değişim (%)	değişim (%)
<b>Toplam emisyon</b>	<b>219,5</b>	<b>298,9</b>	<b>398,8</b>	<b>475,0</b>	<b>501,1</b>	<b>528,6</b>	<b>523,1</b>	<b>508,7</b>	<b>524,0</b>	<b>564,4</b>	<b>157,1</b>	<b>7,7</b>
CO <sub>2</sub>	151,6	229,9	316,2	384,9	406,0	430,9	422,1	402,7	412,9	452,7	198,6	9,6
CH <sub>4</sub>	42,5	43,7	51,6	52,8	55,6	56,8	60,4	63,2	63,9	64,0	50,7	0,2
N <sub>2</sub> O	25,0	24,8	27,4	32,3	34,3	35,4	35,5	37,0	40,5	40,3	61,5	-0,5
F-gazlar	0,5	0,5	3,5	5,0	5,2	5,4	5,2	5,8	6,7	7,4	1456,8	10,2

Günümüzdeki tehlike, karbondioksit ve diğer sera gazlarının miktarındaki artışın bu doğal sera etkisini şiddetlendirmesinde yatmaktadır. Karbondioksit gazı antropolojik (insan) kaynaklar dışında doğal olarak başlıca yerkabuğundan, volkan faaliyetlerinden, karbon içeren organik maddelerin ayrışmasından, orman yangınlarından ve canlı solunumundan da meydana gelir. Patlamalar ve yangınlar da karbondioksitin ana kaynaklarındandır (Atabey, 2022). Binlerce yıldır dünyamızdaki karbon kaynakları kararlı kalırken, günümüzde modern insanoğlu aktiviteleri, fosil yakıtların kullanımı, ormanların yok oluşu, aşırı tarım yapılması, atmosfere büyük miktarlarda karbondioksit ve diğer sera gazlarının salınmasına sebep olmaktadır (Türkeş, 2008).

Atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı son 150 yılda önemli ölçüde artmış (Mahasneh, 2021) ve son 50 yıldır iyice saptanabilir duruma gelmiştir. Aslında sera gazları iklim sisteminde vazgeçilmez bir yere sahiptir. Sera gazları atmosferde doğal bulunmakta ve dünyamızın aşırı soğumasını engelleyici etki göstermektedir. Bu gazları, güneş ve yer radyasyonunu tutarak, atmosferin ısınmasında başlıca etkendirler. Sera gazlarının bulunmaması durumunda yeryüzünün sıcaklığının bugüne göre 30°C daha soğuk olacağı hesaplanmıştır. Fakat son yıllarda yoğun insan aktivitesi kaynaklı atmosferde gereğinden fazla sera gazlarının meydana gelmesi (karbondioksit, metan, ozon ve diazot monoksit vb.) yeryüzü sıcaklığında belirgin derecede artmasına sebep olmakta ve troposferin ısınmasına, stratosferin ise soğumasına en önemli nedeni olmaktadır. Antropojenik olarak aşırı sera gazı oluşumu doğal geri emme süreçlerini zorlamış ve atmosferdeki sera gazı konsantrasyonları sürekli olarak yükselmesine ve sonuç olarak da küresel ısınma diye adlandırdığımız dünya yüzeyinin ortalama sıcaklığın giderek artması sürecini başlatmıştır (Hekimoğlu ve Altındeğer, 2008). Atmosferde bu gazların konsantrasyonunun artması paralel olarak dünya nüfusunun orantısız artış, artan tüketicilik ve çok çeşitli insan faaliyetleri de küresel ısınmaya katkı sunmaktadır.

Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) birikimine bağlı olarak iklim değişikliğinin mümkün olabileceği ilk kez 1896 yılında gündeme getirilmiştir. Ancak bu konu, 1972 yılında gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre Konferansı'nda ozon tabakasına zarar veren gazların değerlendirilmesiyle somut bir tartışma alanı bulmuştur. 1979 yılında düzenlenen “Birinci Dünya İklim Konferansında ise CO<sub>2</sub> birikimi ve fosil yakıt kullanımı nedeniyle insan kaynaklı iklim değişikliği ele alınmış ve küresel ısınma tehdidinde ilişkin kapsamlı bir rapor yayımlanmıştır (Cesur, 2020).

Karbondioksit ve metanın miktarı özellikle endüstri devrimi tarihinden sonra o yıla göre (1750) sırasıyla %31 ve %149 artmıştır. Bu miktarlar buzul karot örneklerinden elde edilen sonuçlara göre 800 bin yılın en yüksek değerleridir. Bu değerlere 70 milyar ton metan gazı verecek Sibirya turbalıkları dâhil değildir (Atabey, 2022).

Bir diğer sera gazı olan ve oksijen yokluğunda bakteriler tarafından üretilen metanın (CH<sub>4</sub>) kaynakları başlıca bataklık alanlar, petrol ve gaz çıkarılması, organik çürümeler, çöp depo sahaları, akarsu havzaları, pirinç üretimi, geviş getiren hayvanların fermantasyonlarıdır. Doğal gazın büyük bir kısmı (% 70-90) metandır. Karbondioksit gibi çevrime girmediğinden küresel ısınmadaki katkısı % 10-15 arasındadır. (Atabey, 2022).

İklim değişikliğinin insan kaynaklı etkileri özellikle son yıllarda hızla artmış ve bu süreçte dünya genelinde daha önce görülmemiş hava olayları yaşanmıştır. Bu değişimler, hidrolik döngünün bozulması, enerji arz güvenliğinin tehlikeye girmesi, su kaynaklarının azalması, buzulların erimesi, deniz seviyelerinin yükselmesi gibi sorunlara yol açmaktadır. Ayrıca, kuraklık ve seller nedeniyle tarım alanlarının daralması, kıyı ekosistemlerinin zarar görmesi ve yüksek sıcaklıkların neden olduğu salgın hastalıkların artması, toplumların hem ekonomik hem de sosyal gelişimlerini olumsuz etkilemekte ve canlı yaşamını ciddi şekilde tehdit etmektedir (Cesur, 2020).

Küresel ısınmanın etkisi, hava sıcaklıklarının dünyanın her yerinde aynı oranda artması şeklinde değildir. Sıcaklık artış oranları, orta enlemler ve ekvator ile kutuplar arasında farklılık göstermektedir. Örneğin, ekvator bölgesinde sıcaklık artışının dünya ortalamasının oldukça altında olacağı öngörülmektedir. Bu ısınma, dünya ikliminde büyük değişikliklere ve aşırılıklara neden olmaktadır. Bazı bölgelerde kasırga, sel ve taşkın gibi olayların sıklığı ve şiddeti artarken, diğer bölgelerde uzun süreli ve yoğun kuraklıklar ile çölleşme etkili hale gelmektedir (Hekimoğlu ve Altındağ, 2008).

Uzun vadede iklim modellerindeki dalgalanmalar ya da yağış, sıcaklık ve rüzgâr desenleri dâhil olmak üzere uzun bir süre boyunca iklim ölçümlerindeki artan değişiklikleri olarak ifade edilen (Mahasneh, 2021) iklim değişikliğiyle ilgili endişeler küresel ve gerçektir. Bütün topluluklar yerel iklimin zorluklarına uyum sağlamaya çalışırlar ve onun değişimlerine karşı hassastırlar. Küresel ısınma, birçok olumsuz etkiye neden olur. İlk olarak, atmosferde bulunan fazla su buharı tekrar yağmur olarak düşer ve bu da dünyanın çeşitli bölgelerinde sellere neden olur. Hava ısındığında, hem karadan hem de denizden buharlaşma süreci artar. Bu artan buharlaşma sürecinin artan yağışla telafi edilmediği bölgelerde kuraklığa yol açar. Bu durum özellikle sıcaklıkların zaten yüksek olduğu bölgelerde ürün kaybına ve kıtlığa neden olmaktadır. Bazı durumlarda atmosferdeki fazla su buharı içeriği tekrar ekstra yağmur olarak düşerek sellere neden olur. Karlı dağlardan eriyen suya bağımlı olan kasabalar ve köyler kuraklık ve su temini kıtlığı çekebilirler. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) göre, dünyanın toplam nüfusunun yaklaşık altıda biri, eriyen sudaki azalmadan etkilenecek bölgelerde yaşamaktadır. Daha sıcak iklim muhtemelen daha fazla sıcak hava dalgasına, daha şiddetli yağışlara ve ayrıca dolu ve gök gürültülü fırtınaların şiddetinde artışa neden olacaktır. Küresel ısınmayla sıcaklıktaki artış kutupsal ve karasal buzulların hızla erimesine ve deniz seviyelerinin yükselmesine neden olmaktadır. Deniz seviyesindeki yükselme küresel ısınmanın en ölümcül etkilerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Riphah, 2015).

İklim değişikliğinin küresel ölçekte önemli ve çok çeşitli etkisi olmakla birlikte, en önemli etkilerinden biri de kuraklıktır. Kuraklık, dünyayı etkileyen en karmaşık hidroklimatik tehlikelerden biridir. Çünkü etkilenen çok sayıda sistem göz önüne alındığında etkilerini ve şiddetini değerlendirmek çok zordur.

Kuraklık şiddetini tanımlama ve ölçme zorluğu, kuraklığın başlangıcını, sonunu ve olayın mekansal kapsamını belirlemeyi zorlaştırır. Ayrıca, mekansal ve zamansal kuraklık yayılma süreçlerinin karmaşıklığı nedeniyle tanımlanması da zordur (Vicente-Serrano et al., 2020). Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) dördüncü değerlendirme raporunda belirtildiği gibi, "genel anlamda kuraklık, 'uzun süreli yağış yokluğu veya belirgin yağış eksikliği', 'bazı faaliyetler veya gruplar için su kıtlığına yol açan yağış eksikliği' veya 'yağış eksikliğinin ciddi bir hidrolojik dengesizliğe neden olacak kadar uzun süren anormal derecede kuru hava dönemi'dir." Raporda ayrıca, "kuraklığın çeşitli şekillerde tanımlandığı" belirtilmektedir (Kevin et al., 2014). Kurak-

lık, etkiye bağlı bir olgudur ve kuraklık etkilerinin çeşitliliği, evrensel bir kuraklık tanımı oluşturmayı neredeyse imkânsız hale getirir (Lloyd-Hughes, 2014). Bu nedenle, etkilenen sektöre ve sisteme göre farklı kuraklık türlerini tanımlamak gerekir. Klasik kuraklık tanımları dört türe ayrılır;

- (i) meteorolojik kuraklık,
- (ii) tarımsal kuraklık,
- (iii) hidrolojik kuraklık
- (iv) sosyoekonomik kuraklık (Wilhite ve Glantz, 1985).

Genellikle bu dört kuraklık türü, kuraklık etkilerinin hidrolojik döngüde nasıl yayıldığı göz önüne alındığında birbirleriyle yakından ilişkilidir (Changnon ve Easterling, 1989). Tarımsal kuraklık', mahsulleri etkileyen toprağın en üst bir metre veya daha fazlasındaki (kök bölgesi) nem eksiklikleriyle ilgilidir, 'meteorolojik kuraklık' esas olarak uzun süreli yağış eksikliğidir ve 'hidrolojik kuraklık' normalin altında akarsu, göl ve yeraltı suyu seviyeleriyle ilgilidir." Bu farklılıklar, iklimsel faktörlerin neden olduğu kuraklıkta yağışın, buharlaşmanın ve akışın göreceli rollerini vurgular. Kuraklık etkileri genellikle tarım ve su kaynakları sektörleriyle ilişkilidir. Gelişmiş ülkelerin tarım sektöründe ürün veriminde azalma veya ürünlerin tamamen başarısız olması yoluyla önemli ekonomik kayıplara (Tian et al., 2018), aşırı durumlarda ise gelişmekte olan ülkelerde insan göçüne ve kıtlığa da neden olabilirler (Grolle, 2015). Hidrolojik kuraklıklar ayrıca sulama yapılan tarımsal sistemlerde önemli etkilere (Vidal-Macua et al., 2018) ve kentsel su temini, endüstriyel ihtiyaçlar, hidroelektrik üretiminin azalması vb. sorunlara neden olabilir (Jerez et al. 2013). Kuraklığın bazı durumlarda etkiler geçici olabilir çoğu zaman kalıcı veya yapısalıdır. Kalıcı terimi aslında bir zaman ölçeği meselesidir. Kalıcı kelimesi ile iklim koşulları normale döndükten sonra sistemlerin makul bir süre içinde başlangıç durumuna geri dönmediği durumlardan kastedilmektedir. Aynı zamanda "Kalıcı" terimi, çok uzun iyileşme dönemlerini veya sistemlerin başlangıç koşullarına geri dönmenin mümkün olmadığı bir dönüm noktasına ulaştığı durumları ifade eder (Vicente-Serrano et al., 2020) .

Kuraklık ekosistemler üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Bitki örtüsü, hava, toprak, tatlı su kalitesi ile karasal ve sucul ekosistemlerin flora/faunası üzerinde gözle görülür etkisi vardır. Kuraklık koşulları orman yangınları ve erozyon gibi arazi bozulma süreçlerinin olasılığını artırır. Net birincil üretimi (primer produktivite) azaltabilir, mera kaybına neden olabilir hatta bitki örtüsü

topluluklarının biyolojik çeşitliliğini değiştirebilir (Vicente-Serrano et al., 2020).

Kuraklık olaylarının oluşum yüzdesini, süresini ve şiddetini belirlemek ve değerlendirmek amacıyla pek çok farklı kuraklık indeksi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır (Yılmaz, 2023). Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI ya da SYİ), Palmer Kuraklık Şiddeti İndeksi (PDSI), Palmer Hidrolojik Kuraklık İndeksi (PHDI), Standartlaştırılmış Yağış Buharlaşma İndeksi (SPEI) Ürün Nem İndeksi (CMI), Soil Moisture Drought Index (SMDI), Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) ve Akış Kuraklık İndeksi (SDI) bu indekslerden bazılarıdır (Çelik ve Yakar, 2024).

İlk olarak Mckee et al. (1993) tarafından ortaya konulmuş olan SPI kuraklık indeksi kuraklık özelliklerini analiz etmek için geliştirilmiş bir kuraklık indeksidir. SPI'nin hesaplanmasında tek veri kaynağı olarak yağış verisinin kullanılması, birden fazla zaman ölçeğinde hesaplanabilmesi ve kuraklığı tutarlı bir şekilde ölçebilmesi nedeniyle diğer kuraklık indekslerine göre tercih edilmekte ve daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2023). Bununla birlikte, SPI, PDSI, PHDI, ve SPEI kuraklığın tanımlanmasında ve analiz edilmesinde standart indeksler olarak kabul görmektedir (Peña-Gallardo et al., 2018; Çelik ve Yakar, 2024).

McKee et al. (1995)'ın tanımına göre, Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) kullanılarak yapılan kuraklık değerlendirmesinde, indeksin sürekli negatif olduğu dönemler kurak dönem olarak kabul edilmektedir. İndeksin sıfırın altına ilk düştüğü ay kuraklığın başlangıcı, pozitif değere yükseldiği ay ise kuraklığın sona erdiği zaman dilimi olarak değerlendirilir. Çizelge 2' de McKee et al., 1993 SYİ yöntemine göre kuraklık şiddeti sınıfları verilmiştir.

Çizelge 2. SPI/SYİ Değerlerine göre kuraklık sınıfları, (McKee vd.1993)

SYİ Değerleri	Sınıf
2.00 ve üzeri	Aşırı nemli
1.50 ile 1.99 arası	Çok nemli
1.00 ile 1.49 arası	Orta nemli
0.00 ile 0.99 arası	Hafif nemli
-0.99 ile 0.00 arası	Hafif kurak
-1.49 ile -1.00 arası	Orta kurak
-1.99 ile -1.50 arası	Şiddetli kurak
-2.00 ve daha az	Aşırı kurak

Mevcut kuraklık indekslerinin çoğunluğu bölgeye özgüdür ve kuraklık olaylarının doğasında var olan karmaşıklık nedeniyle farklı iklim koşullarında kullanım sınırlamaları vardır. Kuraklığın tarım ve su kaynakları üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, uygun indeksin seçilmesi ve indeks sonuçlarının karşılaştırılması önemlidir. Kuraklık özellikleri ve değişkenliğinin belirlenmesinin yanı sıra, kuraklığın eğilimini ve değişim noktasını belirlemek, kuraklığın etkilerini azaltmak ve gerekli önlemleri almak açısından oldukça önemlidir (Yılmaz, 2023).

### Standartlaştırılmış Yağış Endeksi (SPI) ve Önemi

Standartlaştırılmış yağış endeksi (SPI), meteorolojik kuraklıkları değerlendirmek için kullanılan yaygın bir göstergedir. SPI, belirli bir dönem için yağış miktarının uzun dönem ortalamasına göre standartlaştırılması ile hesaplanır ve bu sayede farklı zaman dilimlerinde ve bölgelerde kuraklık koşullarının karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Formül olarak SPI, şu şekilde ifade edilmektedir:

$$SPI = \frac{(P - \mu)}{\sigma}$$

Formülde;

**P:** belirli bir dönem için gözlemlenen yağış miktarını,

**$\mu$ :** o döneme ait ortalama yağışı,

**$\sigma$ :** yağışın standart sapmasını ifade eder (Mehr et al., 2019).

SPI, kuraklık olaylarının şiddetini ve süresini değerlendirmekte önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. SPI, farklı zaman dilimlerinde (örneğin, 1, 3, 6, 12, 24 ay) hesaplanabilir, bu da onu çok ölçekli bir kuraklık indeksi haline getirmektedir (Vicente-Serrano et al., 2011; Wang et al., 2021).

Kısa dönemli SPI değerleri tarımsal uygulamalar üzerinde etkili kuraklık olaylarını izlemek için kullanılırken, uzun dönemli SPI değerleri su kaynaklarının yönetimi açısından kritik öneme sahiptir (Abarghouei et al., 2011). İklim değişikliği bağlamında SPI, yağış düzenlerindeki değişiklikleri izlemek ve meteorolojik kuraklıkların etkilerini değerlendirmek için değerli bir araçtır (Sam et al., 2018).



### **SPI' nin Avantajları ve Sınırlamaları**

SPI, yalnızca yağış verilerine dayandığı için veri toplama ve hesaplama açısından basit bir indeks olmasından dolayı SPI' nin veri kısıtlılığı olan bölgelerde kullanılabilirliğini artırmaktadır (Pandya et al., 2020). Ayrıca, farklı iklim koşullarında kuraklık durumunu karşılaştırmak için standart bir gösterge sunmaktadır (Vicente-Serrano et al., 2012). Diğer kuraklık göstergeleriyle karşılaştırıldığında, SPI' nin avantajları arasında hesaplama kolaylığı, düşük veri gereksinimi ve çok ölçekli bir kuraklık indeksi olarak kullanılabilmesi bulunmaktadır (Xu, 2024; Vicente-Serrano et al., 2011).

Bununla birlikte, SPI'nin sınırlamaları da vardır. Örneğin, SPI yalnızca yağış verisini dikkate alır ve sıcaklık veya buharlaşma gibi diğer iklim değişkenlerini göz ardı etmektedir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar, SPI' nin bu sınırlamalarını aşmak için hem yağış hem de buharlaşma verilerini içeren Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) gibi alternatif indekslerin kullanılmasını önermektedir (Vicente-Serrano et al., 2010; Yanqing et al., 2018). SPEI, daha kapsamlı bir kuraklık değerlendirmesi sunarak iklim değişikliğine bağlı risklerin daha iyi yönetilmesine katkı sağlamaktadır.

SPI, iklim değişikliğinin yağış paternleri üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, gelecekteki kuraklık risklerini önceden tahmin etmek ve yönetmek için kritik bir parametre olup iklim değişikliğinin etkilerini izlemek için düşük maliyetli ve verimli bir yöntem sunmakla birlikte, kapsamlı bir değerlendirme için diğer kuraklık indeksleri ile desteklenmesi gereklidir.

Bu çalışmada, iklim değişikliğini SPI kullanarak değerlendiren literatürün derlenmesi ve bu alandaki bilgi birikiminin artırılması amaçlanmaktadır. SPI' nin iklim değişikliği bağlamında nasıl kullanıldığını incelemek, kuraklık olaylarının izlenmesi ve değerlendirilmesi açısından yeni bir bakış açısı sunacaktır. Bu alandaki mevcut literatür, iklim değişikliğinin yağış düzenleri üzerindeki etkisini anlamaya katkıda bulunacak ve sürdürülebilir çevre politikalarının geliştirilmesine ışık tutacaktır.

### **İklim Değişikliği ve Kuraklık Etkilerinin İncelenmesi**

SPI, çok ölçekli kullanımı, kuraklık koşullarının çeşitli boyutlarını anlamak ve yönetmek için kritik bir gereklilik sunmaktadır. Örneğin, SPI' nin 1 aylık kullanımı kısa vadeli meteorolojik kuraklıkları değerlendirirken, 3 ve 6 aylık SPI (SPI3 ve SPI6) tarımsal kuraklıkları anlamada tercih edilmekte olup uzun vadede ise 12 ve 24 aylık SPI değerleri, hidrolojik kuraklık ve su kaynakları

yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır (Spinoni et al., 2013; Choi et al., 2016; Caloiero et al., 2018). Bu çoklu zaman ölçekleri, farklı kuraklık türlerinin ve etkilerinin daha derinlemesine analiz edilmesine katkı sağlayarak tarım, su yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir (Buttafuoco ve Caloiero, 2014; Jain et al., 2010).

İklim değişikliğinin etkilerini izleme açısından, SPI' nin çoklu zaman ölçeklerinde kullanımı, kuraklık olaylarının frekansındaki değişikliklerin kısa ve uzun vadede tespit edilmesini mümkün kılmaktadır. Örneğin, kısa vadeli SPI değerleri ani hava koşullarının etkilerini değerlendirmede yardımcı olurken, uzun vadeli SPI değerleri iklim değişikliğinin kalıcı etkilerini izlemek için kullanılmaktadır (Liu et al., 2016). SPI ayrıca farklı coğrafi bölgelerdeki kuraklık koşullarının karşılaştırılmasına olanak tanıyarak, iklim bölgelerinde uyarlanabilir kuraklık yönetim stratejilerinin geliştirilmesi için önemli bir veri sağlamaktadır (Bayissa et al., 2015; Gu et al., 2023).

### **Kuraklığın Ekosistemler Üzerindeki Etkileri**

Kuraklık, çeşitli ekosistemlerde belirgin olumsuz etkiler yaratmaktadır. Orman ekosistemleri üzerinde, su stresine bağlı biyokütle kaybının gözlemlenmesi (Yüce et al., 2022) ile kuraklığın ekosistem işleyişini bozabileceğini göstermektedir. Ayrıca otlak alanlarda, bitki örtüsü verimliliğini azaltarak biyoçeşitliliği de tehdit etmektedir (Karabulut, 2015). Kuraklığın bir etkisi de sulak alanlarda görülmektedir. Sulak alanlar özellikle kuraklık ve iklim değişikliğinden etkilenerek su seviyesinde düşüş ve biyoçeşitlilik kaybı gibi sonuçlarla karşılaşmaktadır (Aktürk et al., 2022). Bu olumsuz etkiler, ekosistem düzeninin bozulmasına ve dolayısıyla insan ile canlıların yaşam kalitesini etkilemektedir (Cancelliere et al., 2006).

### **Kuraklığın Tarım ve Su Yönetimi**

Tarımsal verimlilik ve su kaynakları yönetimi, kuraklık ve iklim değişikliğinden büyük ölçüde etkilenir. Örneğin, kuraklık dönemlerinde bitkilerin su kaynaklarına bağımlılığı artmakta ve bu durum, verim kaybına neden olmaktadır (Çuhadar ve Atış, 2021). SPI kullanılarak yapılan çalışmalar, tarımsal planlama ve su yönetiminde stratejik kararların alınmasını destekleyerek su politikalarının gözden geçirilmesini sağlamaktadır (Altan et al., 2020). SPI verileri, tarımsal üretkenliği korumak amacıyla uygulanan İyi Tarım Uygulamaları (İTU) ile birlikte kullanılabilir (Tan, 2023).

## **Kuraklığın İnsani Etkiler ve Göç Dinamikleri**

Kuraklık ve göç ilişkisi, su kaynakları sınırlı bölgelerde önemli sosyal ve ekonomik sonuçlar doğurur. Türkiye’de yapılan araştırmalar, kuraklık nedeniyle tarımsal üretkenliğin azalmasının kırsal göçe sebep olabileceğini öne sürmektedir (Stagge et al., 2017). Su kaynaklarına erişimde yaşanan zorluklar ise, sosyal uyumun bozulmasına ve topluluklar arasında gerilime yol açabileceği raporlanmıştır (Ayva et al., 2023). Bu nedenlerle, iklim değişikliği ile mücadelede kuraklık koşullarının izlenmesi önem arz etmektedir.

## **Kuraklık Verilerinin Doğal Afetlerle İlişkisi**

SPI’deki farklılaşma, orman yangınları, toprak kaymaları ve seller gibi iklimle ilişkili doğal afetlerin tetikleyicisi olabilmektedir. Bu bölümde SPI’ nin kuraklık verilerinin afet yönetimi stratejilerindeki rolü ve bu afetlerin etkileri ele alınmaktadır.

### **Orman Yangınları**

Kuraklık, orman yangınlarının sıklığını ve şiddetini artıran başlıca faktörlerden biridir. SPI’deki düşüş, ormanların su stresine girmesine yol açar; bu durum, bitkilerin kurumasına ve yanıcılığının artmasına neden olur. Mirmo-hammadhosseini et al., (2021) yaptığı çalışma, SPI ve Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) arasındaki ilişkiyi analiz ederek, 2008, 2013 ve 2016 yıllarında kuraklık koşullarının orman örtüsü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, 9 aylık SPI değerinin orman yangınları ile en yüksek korelasyon katsayısına sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, kuraklık dönemlerinde orman yangınlarının artışına dair önemli bir bulgu sunmaktadır.

### **Toprak Kaymaları**

Kuraklık, toprak kaymalarının oluşma riskini de artırabilir. SPI’deki düşüş, toprak nemini azaltarak toprak yapısını zayıflatır. Nkiaka et al., (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada, kuraklık koşullarının toprak kaymalarını tetikleyebileceği ifade edilmiştir. Logone havzasında kuraklık ve sel olaylarının incelendiği bu çalışma, özellikle eğimli arazilerde kuraklık dönemlerinde toprak kaymalarının meydana gelme olasılığının arttığını ortaya koymaktadır (Ionita ve Nagavciuc, 2021).

## **Sel Olayları**

Kuraklık, aşırı yağışlar sonrasında sel riskini artırabilir. Olanrewaju ve Reddy'nin (2022) çalışması, kuraklık sonrası meydana gelen yoğun yağışların sel olaylarına zemin hazırladığını göstermektedir. Çalışmada, 1987 yılında Kwa Zulu Natal'da yaşanan bir sel felaketi incelenmiş ve bu olayın, yüksek SPI6 değerleriyle ilişkilendirildiği belirlenmiştir. Verilere göre, 1987 Eylül ayında yaşanan bu felaket yaklaşık 332 kişinin ölümüne neden olmuş ve yalnızca 4 gün içinde 900 mm yağış kaydedilmiştir (Wen et al., 2023). Bu durum, kuraklık sonrası aşırı yağışların sel riskini artırabileceğini göstermektedir.

## **Afet Yönetimi Stratejileri**

SPI verileri, afet yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde hayati öneme sahiptir. Abd-Elhamid'in (2023) çalışması, kuraklık ve sel risklerinin izlenmesinde SPI'nin rolünü incelemiş ve su yönetimi, tarımsal planlama ile doğal afet önlemleri alanlarında kritik bir araç olarak SPI'nin önemine vurgu yapmıştır (Cancelliere et al., 2006). SPI verilerinin afetlerin önceden tahmin edilmesi ve gerekli önlemlerin alınmasına katkı sağlaması, afet yönetimi stratejilerinde etkili bir araç olmasını sağlamaktadır.

SPI'deki azalmalar, orman yangınları, toprak kaymaları ve sel gibi afetlerle ilişkili olup, bu afetler toplumlar üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu bağlamda, iklim değişikliği ile mücadelede kuraklık verilerinin izlenmesi ve yönetimi büyük önem taşır. SPI verilerinin afet yönetimi stratejilerine entegre edilmesi, doğal afetlerin etkilerini azaltmada kritik bir rol oynayabilir.

## **Kuraklık Projeksiyonlarında SPI Hesaplanması**

SPI, kısa, orta ve uzun vadeli kuraklık durumlarının belirlenmesinde kullanılmakta olup, kuraklık olaylarının zaman içindeki değişimini izlemek için kritik bir araçtır (Aktürk et al., 2022).

## **Farklı İklim Bölgelerinde SPI'nin Etkinliği**

SPI'nin performansı, tropikal, ılıman, kurak ve soğuk iklimlerde farklılık gösterebilir. Örneğin, tropikal iklimlerde kısa dönemli SPI değerleri, ani kuraklık olaylarının izlenmesinde etkili olurken (Liu et al., 2016), ılıman iklimlerde uzun dönemli SPI değerleri, kuraklık eğilimlerini anlamada daha uygundur (Russo et al., 2013). Kurak iklimlerde, SPI'nin su kaynakları planlamasında kritik bir gösterge olduğu belirtilmiştir (Zarei et al., 2021). Soğuk iklimlerde

ise SPI'nin tahmin performansı sınırlıdır ve diğer iklimsel verilerle desteklenmesi gerekmektedir (Gevaert et al., 2018).

## **Türkiye ve Dünya Çapında Kuraklık Projeksiyonları**

SPI kullanılarak yapılan projeksiyon çalışmaları, iklim değişikliğinin etkilerini küresel ölçekte gözlemlmek için önemli bulgular sunmaktadır. Örneğin, Avrupa genelinde yapılan araştırmalar, özellikle İspanya ve Akdeniz bölgelerinde kuraklık olasılığında önemli artışlar göstermektedir (Russo et al., 2013). Benzer şekilde, Nijerya ve İran'da kuraklık sıklığında artış gözlemlenmiş ve bu durumun bölgesel su yönetimi üzerindeki etkileri vurgulanmıştır (Ogunjo et al., 2019; Zarei et al., 2019). Türkiye'de SPI kullanılarak yapılan çalışmalar ise özellikle tarımsal su yönetimi ve su kaynaklarının korunması konusunda önleyici politikaların önemini ortaya koymaktadır.

### **Kuraklık Projeksiyonları Etkisi – Dünya'da**

Russo et al., (2013) Avrupa'daki aşırı kuru ve ıslak yılların projeksiyonunu incelemiştir. Çalışmada, hem sabit hem de sabit olmayan SPI kullanılarak, gelecekteki kuraklık olaylarının olasılıkları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle İspanya'nın kuzeyinde ve Akdeniz bölgelerinde (güney İspanya, Yunanistan, güney İtalya ve güney Türkiye) önemli değişiklikler olduğunu göstermiştir. Örneğin, 2020-2050 yılları arasında, kuzey İspanya'da kuraklık olasılığının %30 artacağı öngörülmektedir.

Anyang et al., (2021) tarafından yapılan çalışmada Kamerun'un Bamenda Metropol bölgesinde SPI kullanılarak iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri incelenmiştir. SPI, 1981-2010 yılları arasındaki veriler kullanılarak hesaplanmış ve kuraklık olaylarının sıklığı %25 artmıştır. Araştırma, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerini ve bu durumun yerel tarım uygulamaları üzerindeki sonuçlarını vurgulamaktadır.

Liu et al., (2016), Sichuan Eyaleti, Çin'de yapılan bu çalışmada, SPI ve Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) kullanılarak kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırma, 1950-2020 yılları arasında SPI değerlerinin 0.5 birim azaldığını göstermiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin kuraklık yoğunluğunu ve süresini nasıl etkilediğini ortaya koymaktadır.

Ogunjo et al., (2019), Nijerya'nın farklı iklim bölgelerinde SPI kullanılarak yapılan bu çalışmada, kuraklık koşulları analiz edilmiştir. Araştırma, 1980-2018 yılları arasında SPI değerlerinin %15 oranında artış gösterdiğini ve

iklim değişikliğinin kuraklık sıklığını artırdığını göstermiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin bölgesel su yönetimi stratejileri üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

Zarei et al., (2019), İran'ın güneyinde SPI kullanılarak kuraklık eğilimleri incelenmiştir. Araştırma, 1985-2013 yılları arasındaki verileri analiz ederek, kuraklık sıklığının %30 oranında arttığını ortaya koymuştur. Sonuçlar, kuraklık koşullarının zaman içinde nasıl değiştiğini ve bu değişimlerin yerel su kaynakları üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Zhao et al., (2022) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise Shaanxi-Gansu Ningxia bölgesinde SPI kullanılarak kuraklık koşulları incelenmiştir. Araştırma, 2003-2020 yılları arasındaki verileri analiz ederek, kuraklık olaylarının sıklığında %25 artış olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki etkilerini anlamak için önemlidir.

### **Kuraklık Projeksiyonları Etkisi – Türkiye’de**

Bu bölümde Türkiye'den yapılan bazı önemli araştırmalar, bu çalışmaların sayısal sonuçları ve neden sonuç ilişkileri açıklanmaktadır.

Mehr et al., (2019), Ankara’da yapılan bu çalışmada, SPI ve SPEI kullanılarak meteorolojik kuraklık analizi gerçekleştirilmiştir. Araştırma, 1970-2015 yılları arasında SPI değerlerinin 0.8 birim azaldığını ve gelecekteki kuraklık olaylarının olasılığının %20 arttığını göstermektedir.

Bacanlı (2017)’de, Türkiye'nin Ege Bölgesi'nde 1960-2013 yılları arasında meteorolojik kuraklıkları ve yağış trendlerini incelemiştir. Çalışmada, 1, 3, 6, 9, 12 ve 24 aylık SPI değerleri hesaplanmış ve kuraklık eğilimleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, kış aylarında "şiddetli" kuraklıkların artış gösterdiğini ve yıllık yağışların beş istasyonda azaldığını ortaya koymuştur. Örneğin, 1990-2013 yılları arasında, Ege Bölgesi'nde yıllık yağış miktarında %20'ye kadar bir azalma gözlemlenmiştir.

Kaya et al., (2020)’da, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde SPI kullanılarak 1980-2018 yılları arasında kuraklık koşullarını değerlendirmiştir. Çalışmada, 1, 3, 6 ve 12 aylık SPI hesaplanmış ve kuraklık olaylarının sıklığı %25 oranında artmıştır. Bu bulgular, iklim değişikliğinin bölgedeki tarımsal üretkenlik üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymaktadır.

## SONUÇ

İklim değişikliği ve kuraklık arasındaki ilişki, giderek daha fazla dikkat çeken ve uzun vadede büyük sosyal, ekonomik ve çevresel etkiler yaratabilecek bir sorundur. Küresel sıcaklık artışları, yağış düzenlerinde gözlemlenen değişiklikler ve iklimsel aşırılıkların artması, dünyanın dört bir yanında tarımsal üretkenliği tehdit etmekte, su kaynaklarını zorlamakta ve biyoçeşitliliği olumsuz etkilemektedir. Bu durum, özellikle su kaynakları sınırlı olan bölgelerde daha belirgin hale gelmekte ve yerel toplulukların yaşam koşullarını zorlaştırmaktadır. Kuraklık, sadece ekosistemleri tehdit etmekte kalmaz, aynı zamanda insanların günlük yaşamını da derinden etkilemektedir. Tarımsal verimlilikteki azalmalar, gıda güvenliğini tehdit ederken, su temini ve kullanımı konusunda büyük zorluklar yaşanmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, kuraklık, toplumsal yapıyı zayıflatan, iş gücü kayıplarına yol açan ve göç hareketlerini hızlandıran bir faktör haline gelebilmektedir.

Kuraklık koşullarının izlenmesi ve doğru bir şekilde yönetilmesi, bu sorunların çözülmesinde hayati öneme sahiptir. Ancak, kuraklık sadece bir çevresel problem değil, aynı zamanda derin sosyal ve ekonomik boyutlara sahip bir olgudur. Tarımsal üretim kayıpları, gıda fiyatlarını artırabilir, bu da özellikle kırsal ekonomilere sahip bölgelerde, gelişmekte olan ülkelerde, yoksulluk oranlarını yükseltebilmektedir. Bununla birlikte, işsizlik oranlarındaki artış, toplumdaki gelir eşitsizliklerini derinleştirir ve bu da daha geniş sosyal sorunları, toplumsal huzursuzluğu ve politik istikrarsızlıkları tetikleyebilir. Kırsal alanlarda meydana gelen bu tür dönüşümler, zorunlu göçleri hızlandırabilir, şehirleşmeyi artırabilir ve yeni sosyoekonomik dinamikler yaratabilmektedir. Bu süreçlerin önlenmesi ya da en aza indirilmesi için kuraklık risklerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi ve bunlara karşı etkili stratejiler geliştirilmesi gerekmektedir.

Kuraklık izleme ve değerlendirme araçlarının etkin bir şekilde kullanılması, bu riskleri önceden belirlemeyi ve önleyici tedbirler almayı mümkün kılmaktadır. Bu araçlar, yerel ve ulusal düzeydeki stratejik kararların alınmasında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle, tarımsal planlama, su yönetimi, biyoçeşitlilik koruma ve afet risk yönetimi gibi alanlarda bu araçlar, karar alıcıların doğru adımlar atabilmesi için önemli bir veri kaynağı sağlamaktadır. Ayrıca, bu araçların iklim değişikliği projeksiyonlarıyla entegre edilmesi, gelecekteki

kuraklık koşullarını daha doğru bir şekilde tahmin etmeyi ve bununla başa çıkabilmek için hazırlıklı olmayı sağlayacaktır. Bu sayede, kuraklık ve iklim değişikliğinin etkilerine karşı daha dirençli toplumlar inşa edilebilmektedir.

Kuraklıkla mücadele yalnızca izleme ve erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesiyle sınırlı kalmamalıdır. Kuraklıkla mücadele, uzun vadeli sürdürülebilir politikaların oluşturulmasını gerektirir. Tarımda su tasarrufu sağlayan teknolojilerin teşvik edilmesi, su kaynaklarının etkin yönetilmesi, yeşil altyapı projelerinin hayata geçirilmesi ve doğal kaynakların korunması gibi stratejiler, kuraklık riskini azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, toplumsal farkındalık yaratmak ve yerel halkın kuraklık yönetimi konusunda eğitilmesi, kriz anlarında daha etkili bir toplum dayanışması ve müdahale imkânı sunacaktır.

Sonuç olarak, iklim değişikliğinin kuraklık üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkilerle başa çıkabilmek için kapsamlı bir yaklaşım geliştirilmesi gerekmektedir. Kuraklık, sadece çevresel bir tehdit değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik yapıları da doğrudan etkileyen bir olgudur. Bu nedenle, kuraklık risklerinin izlenmesi, yönetilmesi ve bu konuda stratejik kararların alınması, sürdürülebilir bir gelecek için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, iklim değişikliği ve kuraklıkla mücadele, yalnızca çevresel bir sorunun ötesinde, daha adil, dayanıklı ve sürdürülebilir bir toplum inşa etmenin temel adımlarından biridir.



## KAYNAKÇA

Abarghouei, H., Zarch, M., Dastorani, M., Kousari, M., Zarch, M. (2011). The survey of climatic drought trend in iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(6), 851-863. <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0491-7>

Abd-Elhamid, H. (2023). "Monitoring flood and drought risks in arid and semi-arid regions using remote sensing data and standardized precipitation index: A case study of Syria." *Journal of Flood Risk Management*. doi:10.1111/jfr3.12961.

Aktürk, G., Zeybekoğlu, U., Yıldız, O. (2022). "Drought Investigation Using SPI and SPEI Methods: A Case Study in Kırıkkale." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. doi:10.29137/umagd.1100886.

Altan, K., Teksoy, A., Solmaz, S.K.A. (2020). "Türkiye’de yağış ve sıcaklığın su kaynakları, tarımsal ürün verimi ve su politikalarına etkisi." *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*. doi:10.17482/uumfd.787493.

Anyang, G., Ngwabie, N., Ayonghe, S. (2021). Assessing the impact of climate variability and change on water resources in bamenda metropolis, north west region of cameroon. *International Journal of Research -Granthaalayah*, 9 (10), 1-17. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v9.i10.2021.4233>

Atabey, E. (2022). <https://www.temizmekan.com/iklim-degisikligi/>

Ayva, C., Dutucu, A.A., Ustaoglu, B. (2023). "İklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi ve uyum önerileri: Kirazdere havzası örneği." *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. doi:10.18069/firatsbed.1131015.

Bacanlı, Ü. (2017). Trend analysis of precipitation and drought in the aegean region, Turkey. *Meteorological Applications*, 24(2), 239-249. <https://doi.org/10.1002/met.1622>

Bayissa, Y., Moges, S., Xuan, Y., Andel, S., Maskey, S., Solomatine, D., Griensven, A.V., Tadesse, T. (2015). Spatio-temporal assessment of meteorological drought under the influence of varying record length: the case of upper blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrological Sciences Journal*, 1-16.

Buttafuoco, G., Caloiero, T. (2014). Drought events at different timescales in southern Italy (calabria). *Journal of Maps*, 10(4), 529-537. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.891267>

Cancelliere, A., Mauro, G., Bonaccorso, B., Rossi, G. (2006). Drought forecasting using the standardized precipitation index. *Water Resources Management*, 21(5), 801-819. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9062-y>

Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P., Frustaci, F. (2018). Drought analysis in europe and in the mediterranean basin using the standardized precipitation index. *Water*, 10(8), 1043. <https://doi.org/10.3390/w10081043>

Cesur, A. (2020). Küresel Isınma ve İklim Değişiklikleri. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Deniz ve Çevre Araştırmaları Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Changnon, S.A., Easterling, W.E. (1989). Measuring drought impacts - The Illinois case. *Water Resour. Bull.* 25 (1), 27-42.

Choi, Y., Ahn, J., Suh, M., Cha, D., Lee, D., Hong, Min, S., Park, S., Kang, H. (2016). Future changes in drought characteristics over South Korea using multi regional climate models with the standardized precipitation index. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 52(2), 209-222. <https://doi.org/10.1007/s13143-016-0020-1>

Çelik, M.Ö., Yakar, M. (2024). Mersin'in Farklı Kuraklık İndeksleri Aracılığıyla Kuraklık Tehdidinin Araştırılması. *AKU J. Sci. Eng.* 24 015501 (71-84).

Çuhadar, H., Atış, A. (2021). "Üreticilerin Kuraklığa Yönelik Tutumlarını Etkileyen Temel Faktörlerin Analizi." *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*. doi:10.30910/turkjans.765182.

Gevaert, A.I., Veldkamp, T.I.E., Ward, P.J. (2018). "The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models." *Hydrology and Earth System Sciences* doi:10.5194/hess-22-4649-2018.

Grolle, J. (2015). Historical case studies of famines and migrations in the West African Sahel and their possible relevance now and in the future. *Popul. Environ.* 37 (2), 181-206.

Gu, X., Zhang, P., Zhang, W., Yang, L., Pan, J., Wang, S., Lai, X., Long, A. (2023). A study of drought and flood cycles in xinyang, China, using the wavelet transform and m-k test. *Atmosphere*, 14(8), 1196. <https://doi.org/10.3390/atmos14081196>

Hekimoğlu, B., Altındağ, M. (2008). Küresel Isınma Ve İklim Değişikliği T.C. Samsun Valiliği İl Tarım Müdürlüğü. Çiftçi Eğitimi ve Yayım Şubesi yayını.

Ionita, M. and Nagavciuc, V. (2021). Changes in drought features at the european level over the last 120 years. *Natural Hazards and Earth System Science*, 21(5), 1685-1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>

Jain, S.K., Keshri, R., Goswami, A., Sarkar, A. (2010). Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for rajasthan, India. *Natural Hazards*, 54(3), 643-656. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9493-x>

Jerez, S., Trigo, R.M., Vicente-Serrano, S.M., Pozo-Vazquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., Santos-Alamillos, F., Montavez, J.P. (2013). The impact of the North Atlantic oscillation on renewable energy resources in Southwestern Europe. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 52 (10), 2204–2225.

Karabulut, A. (2015). "2008 kurak yılının Termessos (Güllük Dağı) Milli Parkı (Antalya) vejetasyonuna etkisinin çeşitli kuraklık indeksleriyle incelenmesi." *Coğrafi Bilimler Dergisi*. doi:10.1501/cogbil\_0000000166.

Kevin E. Trenberth, A. D., Schrier, G.V.D., Jones, P.D., Barichivich J., Briffa, K.R., Sheffield J., (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, Vol. 4, 17-22.

Liu, Z., Wang, Y., Shao, M., Jia, X., Li, X. (2016). Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the loess plateau of China. *Journal of Hydrology*, 534, 281-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.003>

Lloyd-Hughes, B. (2014). The impracticality of a universal drought definition. *Theor. Appl. Climatol.* 117 (3-4), 607–611.

Mahasneh, A. (2021). Climate Change And Global Warming, Jr. of *Industrial Pollution Control* 37(8) pp 1-7

McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, California, ss.179-183.

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. 9th Conference on Applied Climatology, January 15-20, Dallas, USA, pp.:233-236.

Mehr, A.D., Sorman, A.U., Kahya, E., Afshar, M.H. (2019). Climate change impacts on meteorological drought using spi and spei: case study of ankara, turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254-268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1691218>

Mirmohammadhosseini, T.S., Hosseini, S.A., Ghermezcheshmeh, B., Shara-fati, A. (2021). "Impact of meteorological drought on vegetation in non-irri-gated lands." *Időjárás*. doi:10.28974/idojaras.2021.3.6.

Nkiaka, E., Nawaz, N.R., Lovett, J.C. (2017). "Using standardized indicators to analyse dry/wet conditions and their application for monitoring drought/floods: a study in the Logone catchment, Lake Chad basin." *Hydrolog-ical Sciences Journal*. doi:10.1080/02626667.2017.1409427.

Ogunjo, S., Ife-Adediran, O., Owoola, E., & Fuwape, I. (2019). Quantification of historical drought conditions over different climatic zones of nigeria. *Acta Geophysica*, 67(3), 879-889. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00279-1>

Olanrewaju, O., Reddy, K. (2022). "Assessment and prediction of flood hazards using standardized precipitation index—A case study of eThekwini metropoli-tan area." *Journal of Flood Risk Management*. doi:10.1111/jfr3.12788.

Pandya, P., Kumarkhaniya, R., Parmar, R., Ajani, P. (2020). Meteorological drought analysis using standardized precipitation index. *Current World Envi-ronment*, 15(3), 477-486. <https://doi.org/10.12944/cwe.15.3.12>

Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J.J., Gazol, I.A., Sánchez-Salguero, R., Domínguez-Castro, F., Kenawy, A.E., Beguería-Portu-gés, S., Gutiérrez, E., Luis, M.D., Sangüesa-Barreda, G., Novak, K., Rozas, V., Tíscar, P.A., Linares J.C., Castillo, E.M.D., Mat,M., Olano, J.M., Longares, L.A., Hevia, A., Galván, J.D. (2018). Drought Sensi-tiveness on Forest Growth in Peninsular Spain and the Balearic Islands *Forests*, 9, 524; doi:10.3390/f9090524

Riphah, U.S. (2015). *Global Warming: Causes, Effects and Solutions*, Dur-reeaminJournal (ISSN:2204-9827) August Vol. 1 Issue 4. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1032291>

Russo, S., Dosio, A., Sterl, A., Barbosa, P., & Vogt, J. (2013). Projection of occurrence of extreme dry-wet years and seasons in europe with stationary and nonstationary standardized precipitation indices. *Journal of Geophysical Re-search Atmospheres*, 118(14), 7628-7639. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50571>

Sam, T.T., Khôi, Đ.N., Thao, N.T.T., Nhi, P.T.T., Quan, N.T., Hoan, N.X., Nguyen, V.T. (2018). Impact of climate change on meteorological, hydrological and agricultural droughts in the lower mekong river basin: a case study of the srepok basin, vietnam. *Water and Environment Journal*, 33(4), 547-559. <https://doi.org/10.1111/wej.12424>

Spinoni, J., Naumann, G., Carrão, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2013). World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792-2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>

Stage, J., Kingston, D., Tallaksen, L., & Hannah, D. (2017). Observed drought indices show increasing divergence across europe. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14283-2>

Tan, M. (2023). "TR22 Bölgesinde İyi Tarım Uygulamaları Yapan Üreticilerin Çevre ve Küresel İklim Değişikliği Algısı." doi:10.61513/tead.1384978.

Tian, L.Y., Yuan, S.S., Quiring, S.M. (2018). Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-central United States. *Agric. For. Meteorol.* 249,107–119.

Türkeş, M. (2008). Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 1, 26-37. Su Vakfı.

Vicente-Serrano, S., Beguería, S., López-Moreno, J. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>

Vicente-Serrano, S., Beguería, S., & López-Moreno, J. (2011). Comment on “characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity index (pdsi) during 1900–2008” by aiguo dai. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(D19). <https://doi.org/10.1029/2011jd016410>

Vicente-Serrano, S., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J., López-Moreno, J., Azorín-Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27. <https://doi.org/10.1175/2012ei000434.1>

Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., Domínguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews* 201. 102953

Vidal-Macua, J.J., Ninyerola, M., Zabala, A., Domingo-Marimon, C., Gonzalez-Guerrero, O., Pons, X. (2018). Environmental and socioeconomic factors of abandonment of rainfed and irrigated crops in northeast Spain. *Appl. Geogr.* 90, 155–174.

Yanqing, J., Zhang, B., & Ma, B. (2018). Daily spei reveals long-term change in drought characteristics in southwest china. *Chinese Geographical Science*, 28(4), 680-693. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0973-3>

Yılmaz, M.U. (2023). Keşif Kuraklık İndeksi ve Standartlaştırılmış Yağış İndeksi Kullanılarak Kırklareli İlinde Kuraklığın Eğilimi ve Zamansal Değişkenliği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*,; 9(2): 341-364.

Yüce, M.İ., Aksoy, H., AYTEK, A., EŞİT, M., UĞUR, F., YAŞA, İ., ŞİMŞEK, A., DEĞER, İ.H. (2022). "SPI ve SPEI ile Samsun İli Kuraklık Analizi." *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. doi:10.17780/ksujes.1108663.

Wang, Q., Zeng, J., Qi, J., Zhang, X., Zeng, Z.Y., Shui, W., Xu, Z., Zhang, R., Wu, X., Cong, J. (2021). A multi-scale daily SPEI dataset for drought characterization at observation stations over mainland china from 1961 to 2018. *Earth System Science Data*, 13(2), 331-341. <https://doi.org/10.5194/essd-13-331-2021>

Wilhite, D.A., Glantz, M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10, 111–120.

Xu, F. (2024). Understanding climate change impacts on drought in china over the 21st century: a multi-model assessment from cmip6. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00578-5>

Zarei, A. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of iran using standardized precipitation index (spi). *Sn Applied Sciences*, 1(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0498-0>

Zarei, S., Bozorg-Haddad, O., Singh, V.P., Loáiciga, H.A. (2021). Developing water, energy, and food sustainability performance indicators for agricultural systems. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02147-9>

Zhao, X., Xia, H., Liu, B., Jiao, W. (2022). Spatiotemporal comparison of drought in shaanxi–gansu–ningxia from 2003 to 2020 using various drought

indices in google earth engine. Remote Sensing, 14(7), 1570.  
<https://doi.org/10.3390/rs14071570>

URL1,2021.[https://www.indyturk.com/sites/default/files/styles/1368x911/public/article/main\\_image/2020/06/12/393476-1798276302.jpg?itok=9i52ub3m](https://www.indyturk.com/sites/default/files/styles/1368x911/public/article/main_image/2020/06/12/393476-1798276302.jpg?itok=9i52ub3m), Erişim Tarihi: 18.11.2024

URL 2, 2023. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=SeraGaziEmisyonIstatistikleri1990202149672.>, Erişim Tarihi: 18.11.2024





## BÖLÜM 2

### KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHSEL GELİŞİMİ VE UÇAK YAPILARINDA KULLANIMI

Arş. Gör. İlhan DANACI <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. idanaci@sivas.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-9148-1481



## 1.GİRİŞ

Malzemeler, genellikle seramikler, metaller, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar içindeki malzemeler, kullanım alanlarına bağlı olarak avantaj ve dezavantajlar sunar. Havacılık tarihinde, insanlık farklı malzemeleri uçuş teknolojilerinde kullanarak sürekli bir gelişim süreci yaşamıştır. Eski dönemlerde uçak yapımında kullanılan malzemeler ile günümüzde kullanılanlar arasında belirgin farklar bulunmaktadır(William D. Callister & Renthwisch, 2009; Clifton et al., 2020; Egbo, 2021; Mazumbar, 2002).

Tarihsel olarak, havacılık uygulamalarında metalik malzemeler baskın bir yere sahipti. Bu malzemeler arasında özellikle titanyum ve alaşımları, çelik ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, nikel bazlı alaşımlar ve magnezyum bazlı alaşımlar ön plana çıkmaktaydı. Ancak malzeme teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte uçakların yapısında kullanılan malzeme türlerinde önemli değişiklikler yaşandı. Çelik, uzun yıllar havacılık sektöründe önemli bir rol oynasa da, yüksek özgül ağırlığının getirdiği dezavantaj nedeniyle yerini giderek daha hafif ve güçlü malzemelere bıraktı. Bu noktada alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımları, hem mukavemetleri hem de düşük ağırlıkları sayesinde öne çıkan seçenekler arasında yer aldı (Belan et al., 2017; W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Tanasa & Zanoaga, 2013; Trzepieciński et al., 2021).

Uçakların gövde yapımında kullanılan malzemelerin seçiminde hafiflik ve yüksek mukavemet en kritik iki parametre olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra yüksek rijitlik, termal kararlılık ve korozyon direnci gibi özellikler de tercih edilen malzemenin genel performansını etkileyen diğer önemli kriterlerdir. Tüm bu gereksinimlere yanıt veren malzemelerden biri ise kompozitlerdir. Kompozit malzemeler, bu özelliklerin tamamını bir arada sunarak havacılık sektöründe giderek daha yaygın bir kullanım alanı bulmuştur(W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Hasan et al., 2019).

Özellikle hava araçlarında, yüksek mekanik mukavemet, kimyasal dayanıklılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu malzemelerin sağladığı en büyük avantajlardan biri, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmalarıdır. Kompozitler, yapılarında bulunan esneklik ve titreşim sönümlenme özellikleri sayesinde metallerin yorulmaya karşı dayanıksız olduğu yerlerde daha güvenilir bir alternatif sunar. Bunun yanı sıra, korozyon dayanımları metallerden daha yüksektir ve bu da

onları özellikle zorlu çevre koşulları için uygun kılar. Yüzey dirençlerinin yüksek olması, düşük toksisite göstermeleri ve yangına karşı dirençli yapıları da kompozitlerin havacılık uygulamalarında tercih edilmesindeki diğer önemli nedenlerdir(Mazumbar, 2002; Tanasa & Zanoaga, 2013).

Kompozit malzemeler aynı zamanda gerilme çatlaklarına karşı üstün direnç gösterir ve çatlak oluşmadan önce esneyebilme kabiliyetine sahiptir. Bu özellik, uçak tasarımında hem güvenlik hem de dayanıklılık açısından büyük bir avantaj sağlar. Havacılıkta uçakların ağırlığını azaltmak, birçok faydayı beraberinde getirmektedir. Yolcu ve kargo taşımacılığı için geliştirilen ticari uçaklarda ağırlığın azalması, yakıt tüketiminin düşmesi ve dolayısıyla daha uzun menzillerin ekonomik bir şekilde kat edilmesi anlamına gelir. Askeri uçaklarda ise bu durum, daha fazla mühimmat ve yakıt taşınması veya uzun menzilli operasyonlara uygunluk gibi stratejik avantajlar sunar (Carlsson et al., 2013; M. Das et al., 2021; Parveez et al., 2022; Zabihi et al., 2018).

Günümüzde havacılık sektöründe kullanılan malzemeler, yalnızca performans açısından değil, aynı zamanda çevresel etkileri bakımından da değerlendirilmektedir. Atmosfer koşullarına dayanıklı ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikler gösteren malzemelere olan talep artmaktadır. Kompozit malzemeler, bu tür ihtiyaçlara yanıt verebilecek en uygun seçeneklerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, havacılık sektöründe kompozitlerin kullanım oranı her geçen yıl artış göstermektedir. Kompozitler, uçakların kanat, gövde, kuyruk ve kapı gibi yapısal bölümlerinde sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, füzeler gibi uzay ve savunma uygulamalarında da kompozit malzemelerin kullanımı büyük bir başarı elde etmiştir (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Godara et al., 2021; Tanasa & Zanoaga, 2013).

## **2.KOMPOZİT MALZEMELERİN TARİHSEL GELİŞİMİ**

Kompozit malzemelerin tarihi, basit doğal kombinasyonlardan modern endüstrilerde kullanılan sofistike mühendislik malzemelerine kadar uzanan binlerce yıllık bir geçmişe sahiptir. Kompozit malzemelerin tarihi, insanlık tarihinin en eski dönemlerinden günümüze kadar uzanan önemli bir gelişim sürecini yansıtır. Antik Çağ'da Mezopotamya ve Mısır medeniyetleri, yaklaşık milattan önce (MÖ) 3000'lerde çamuru samanla karıştırarak kerpiç tuğlalar üretmişlerdir. Bu yöntem, samanın çamuru güçlendirmesiyle dayanıklı yapıların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Saman, çamurun kururken çatlamasını engelleyerek dayanıklılığı artırmıştır. Aynı dönemde ahşap dalların çamurla kaplanarak kullanıldığı çit ve sıva yöntemi de erken bir kompozit malzeme

örneğidir. Mısırlılar (MÖ ~1500) ayrıca papirüs veya ahşap katmanlarını birleştirerek lamine malzemeler üretmiş ve bunları tekneler ve mobilyalarda kullanmıştır. Klasik dönemden itibaren, Romalılar kireç, volkanik kül ve taş gibi malzemelerle oluşturulan beton ile dayanıklı yapılar inşa etmişlerdir. Pantheon ve su kemerleri, bu malzemelerin uzun ömürlülüğünün en iyi örnekleridir. İlk dönemlerde bronz çubuklar gibi takviyelerle beton güçlendirilmiştir. Asya ve Orta Doğu'da kullanılan kompozit yaylar, ahşap, boynuz ve sinirlerin birleşiminden oluşuyordu. Buradaki her bir malzeme esneklik, dayanıklılık ve basma direnci sağlıyordu (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Godara et al., 2021; Hashin, 1983; Herakovich, 2012; Parveez et al., 2022).

Erken modern dönemde (17.–19. Yüzyıl) kağıt hamuru ve mühendislik ahşapları, hafif ve dayanıklı malzemeler olarak dikkat çekti. Burada kağıt hamuru, kağıt ve yapıştırıcının karışımıyla dekoratif eşyalar ve mobilyalar için kullanıldı. Laminat ahşap (kontrplak) ise, hafif ve dayanıklı mobilyalar için geliştirildi. 19. yüzyılda çelik takviyeli betonun icadı inşaat mühendisliğinde devrim yapmıştır. Bu malzeme, betonun basınca dayanımı ile çeliğin çekme dayanımını bir araya getirmiştir (Godara et al., 2021; Herakovich, 2012; Vassilopoulos, 2020).



**Şekil 1:** Betonarme yapı örneği

20. yüzyıl, modern kompozit malzemelerin doğuşuna tanıklık etmiştir. Sentetik reçinelerin (poliester, epoksi) de icadı ile cam elyaf takviyeli plastiklerin (GFRP) geliştirilmesi sağlandı ve otomotiv, denizcilik ve havacılık

gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Karbon fiberler ise hafiflik ve dayanıklılık özellikleriyle dikkat çekmeye başlayan modern kompozit yapıların biri oldu. Havacılık, savunma ve yüksek performanslı spor endüstrilerinde yaygın olarak kullanıldı. 1970'lerde DuPont tarafından geliştirilen Kevlar, olağanüstü dayanıklılığı ve ısı direnciyle tanındı. Kevlar kurşun geçirmez yeleklerden uçaklara ve hatta lastiklere kadar geniş bir kullanım alanına sahip oldu. Daha sonraki yıllarda metal matris ve seramik matris kompozitler, havacılık ve savunma sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Godara et al., 2021; Hashin, 1983; Herakovich, 2012; Parveez et al., 2022; Vassilopoulos, 2020).

21. yüzyılda nanoteknoloji, kompozit malzemelerin gelişimine yeni bir boyut kazandırmıştır. Karbon nanotüpler ve grafen gibi nanomalzemeler, üstün mekanik ve elektriksel özellikler sunarak nanokompozitlerin oluşumuna öncülük etmiştir. Bu malzemeler hafif uçaklardan esnek elektroniklere kadar uzan geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanı sıra, çevresel farkındalığın artmasıyla birlikte sürdürülebilir malzemelere olan ilgi her geçen gün artarak devam etmiştir. Doğal liflerden (ör. kenevir, keten) ve biyolojik olarak parçalanabilir reçinelerden yapılan biyokompozit malzemeler otomotiv iç mekanları, ambalaj ve inşaat gibi alanlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır (Baig et al., 2021; Culebras et al., 2014; Godara et al., 2021; Herakovich, 2012; Mazari et al., 2021; Prunet et al., 2021; Vassilopoulos, 2020).

Günümüzde kompozit malzemeler, havacılık, yenilenebilir enerji, inşaat ve biyomedikal mühendislik gibi birçok alanda teknolojik ilerlemenin ön saflarında yer almakta ve insan yaratıcılığının sürekli bir yenilik yolculuğunu yansıtmaktadır. Kompozit malzemelerin gelişimi, teknolojik ilerlemeler, endüstriyel ihtiyaçlar ve çevresel faktörler tarafından şekillendirilmiştir. Bugün bu malzemeler, havacılık, yenilenebilir enerji ve biyomedikal mühendislik gibi birçok alanda önemli rol oynamaktadır. Bu durum, insan üretkenliğinin ve yenilik arayışının bir göstergesi olarak, kompozit malzemelerin gelecekte de önemini koruyacağını işaret etmektedir (Godara et al., 2021; Herakovich, 2012; Kumar Sharma et al., 2022; Tanasa & Zanoaga, 2013).

Havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemeler, modern uçakların tasarımını ve performansını önemli ölçüde etkileyen, yenilikçi malzeme teknolojilerini temsil eder. Bu malzemeler, yüksek dayanım, düşük ağırlık, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi özellikleri sayesinde hem

ticari hem de askeri uçaklarda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir (Kumar Sharma et al., 2022; Mazumbar, 2002).

Son 50 yıl içinde, ticari havacılıkta kompozit malzemelerin kullanım oranı büyük bir artış göstermiştir. Örneğin, 1970’li yıllarda uçak yapılarında kompozit malzemelerin kullanım oranı sadece %5 civarındayken, günümüzde bu oran %50’nin üzerine çıkmıştır. Bu kritik artış, kompozit malzemelerin havacılık sektörünün geleceğinde ne denli önemli bir yere sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır (Abbas et al., 2018; S. Das & Yokozeki, 2021; Mugahed Amran et al., 2018; Trzepieciński et al., 2021). Bu duruma örnek olarak Boeing 737 yolcu uçaklarında kullanılan kompozit yapıların %1 olduğu bilinirken zamanla geliştirilen kompozit teknolojisi ile bu oran Boeing 787 uçağında %50 olmuştur. Aynı zamanda Boeing 777 uçağında kullanılan alüminyum oranı %50 iken, kompozit yapıların kullanımının artmasıyla birlikte bu oran %20 mertebelerine gerilemiştir. Boeing 787 (Aly, 2017; M. Das et al., 2020; S. Das & Yokozeki, 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Mugahed Amran et al., 2018).



**Şekil 2:** Boeing 737 uçağı



**Şekil 3:** Boeing 787 uçağı görüntüsü

### **3.KOMPOZİT MALZEMELERDE KULLANILAN BAŞLICA ELYAF TÜRLERİ**

Kompozit malzemelerde elyaf dağılımı, yapının dayanıklılığını belirleyen kritik bir faktördür. Matris içinde paralel düzenlenmiş uzun elyaflar yalnızca elyaf yönünde yüksek mukavemet sunarken, iki boyutlu elyaf düzenlemeleri tüm yönlerde dengeli mukavemet sağlar. İzotropik bir yapı ise homojen dağılmış kısa elyaflarla elde edilebilir. Elyaf esnekliği ve uzunluk-çap oranı, yük taşıma kapasitesini doğrudan etkiler. Elyaf ile matris arasındaki güçlü bağ ise dayanıklılığı artırır, ancak matris boşlukları ve nem, bu bağı zayıflatabilir. Genellikle kullanılan elyaf takviye tipleri aşağıdaki gibidir:

#### **3.1. Karbon Elyaf Takviyeli Polimerler (CFRP)**

Havacılıkta en yaygın kullanılan kompozit malzemeler arasında yer alır. Karbon elyaflarının genellikle epoksi gibi polimer matrislerle birleştirilmesiyle oluşturulan bu malzemeler, yüksek dayanım-ağırlık oranı, mükemmel sertlik ve yorulma direnci gibi özelliklere sahiptir. Korozyona karşı dayanıklı olması, CFRP'nin uçak gövdesi, kanatları ve kontrol yüzeyleri gibi birincil yapısal elemanlarda kullanılmasını sağlar. Boeing 787 Dreamliner ve Airbus A350 gibi modern uçaklarda, gövde ve kanatların ağırlığının %50'den fazlası CFRP'den yapılmıştır. Bu, yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini düşürerek daha verimli uçakların üretilmesine olanak tanır(Abbas et al., 2018; Egbo, 2021;



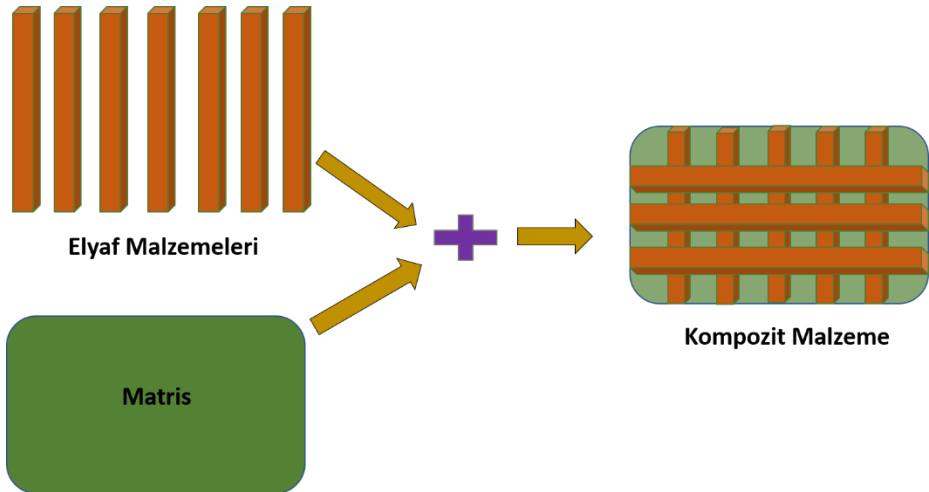
May et al., 2020; Sandhanshiv & Patel, 2020; Thor et al., 2020; Trzepieciński et al., 2021).

### 3.2. Cam Elyaf Takviyeli Polimerler (GFRP)

CFRP'ye kıyasla daha ekonomik bir alternatif sunar. Cam elyaflarının polimer matrisle birleştirilmesiyle oluşturulan bu malzemeler, iyi dayanım ve esneklik özelliklerinin yanı sıra mükemmel korozyon direnci sağlar. Özellikle radar sinyallerine şeffaflığı nedeniyle radar kubbeleri (radome) gibi bileşenlerde tercih edilir. Ayrıca, zemin panelleri ve iç kaplama gibi ikincil yapısal elemanlarda da yaygın olarak kullanılır (Egbo, 2021; May et al., 2020; Mazumbar, 2002; Sandhanshiv & Patel, 2020; Thor et al., 2020).

### 3.3. Aramid Elyaf Takviyeli Kompozitler

Darbe dayanımı ve hafiflik özellikleriyle öne çıkar. Kevlar gibi aramid elyaflarıyla güçlendirilmiş bu malzemeler, motor kapakları gibi darbelere dayanıklı bileşenlerde ve uçak iç mekanlarında koruyucu katman olarak kullanılır. Yüksek aşınma direnci ve hafifliği, bu malzemeyi özel uygulamalar için ideal kılar (Egbo, 2021; May et al., 2020; Mazumbar, 2002; Sandhanshiv & Patel, 2020; Thor et al., 2020).



Şekil 4: Fiber takviyeli kompozit yapı

### **3.4. Hibrit Kompozitler**

Aynı matris içinde farklı elyaf türlerinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulur ve bu sayede özelleştirilmiş mekanik özellikler sunar. Örneğin karbon ve cam elyaflarının kombinasyonu, hem maliyet-performans dengesini sağlar hem de hasar toleransını artırır. Bu tür malzemeler, yük taşıyan ve dayanıklılık gerektiren yapısal elemanlarda tercih edilir (Egbo, 2021; May et al., 2020; Sandhanshiv & Patel, 2020; Swolfs et al., 2019; Thor et al., 2020).

### **3.5. Doğal Elyaf Takviyeli Kompozitler**

Çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif sunar. Kenevir veya keten gibi doğal liflerin polimer matrislerle birleştirilmesiyle oluşturulan bu malzemeler, iyi titreşim sönümleme özelliklerine sahiptir ve uçakların iç mekanlarında, özellikle koltuk yapıları ve paneller gibi bileşenlerde kullanılır (Egbo, 2021; May et al., 2020; Sandhanshiv & Patel, 2020; Thor et al., 2020).

## **4.MATRİS YAPISINA GÖRE KOMPOZİT MALZEMELER**

Kompozit malzemelerdeki matris yapısı hem yapının bütünlüğünü sağlamak hem de performansını artırmak için kritik bir rol oynar. Matris, lifleri bir arada tutarak yapının formunu korur ve mekanik dayanıklılığı artırır. Ayrıca, dışarıdan gelen yüklerin lifler arasında eşit bir şekilde dağıtılmasına olanak tanır, bu da malzemenin gerilmelere karşı daha dirençli olmasını sağlar. Matris, sadece yük paylaşımı yapmakla kalmaz, aynı zamanda dış darbelerle karşı sönümleme özelliği ile yapıyı korur ve enerji emilimine katkı sağlar. Kullanılan matris türü, kompozit malzemenin genel özelliklerini belirler ve bu nedenle farklı matris türleri, belirli uygulamalara göre özelleştirilmiş malzemelerin geliştirilmesine imkan tanır. Matris türüne göre kompozit malzemeler genellikle 3 ana gruba ayrılır.

### **4.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMC'ler)**

Metal bir matrisin (genellikle alüminyum veya titanyum) seramik partiküller veya elyaflarla güçlendirilmesiyle oluşturulur. Bu malzemeler, yüksek sıcaklık stabilitesi ve aşınma direnci sunar. Özellikle jet motoru bileşenleri ve ısıya dayanıklı yapısal elemanlarda kullanılarak, motor performansını ve verimliliğini artırır (Hasan et al., 2019; Kumar Sharma et al., 2022; May et al., 2020; Parveez et al., 2022; Suresh Kumar et al., 2021).

## 4.2. Seramik Matrisli Kompozitler (CMC'ler)

Seramik bir matris içinde seramik veya karbon elyaflarının takviyesiyle elde edilir. Bu malzemeler, aşırı sıcaklıklara dayanıklılığı ve düşük ağırlığıyla dikkat çeker. Türbin kanatları ve motor egzoz nozülleri gibi yüksek sıcaklık gereksinimi olan uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca, ısı kalkanları gibi termal koruma bileşenlerinde de yaygın olarak kullanılır (Hasan et al., 2019; Kumar Sharma et al., 2022; May et al., 2020; Parveez et al., 2022; Swolfs et al., 2019).

## 4.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMC'ler)

Polimer matrisli kompozitler (PMC), modern mühendislikte en yaygın tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin bu denli popüler olmasının temel nedenlerinden biri, yüksek performanslı elyafların (örneğin karbon, polietilen ve aramid gibi) geliştirilmesi ve bu elyafların etkili bir şekilde birleştirildiği polimer matrislerin iyileştirilmesidir. Polimerlerin esneklik, hafiflik ve korozyona dayanıklılık gibi avantajlarına rağmen, mekanik özellikleri genellikle metal veya seramik gibi diğer yapı malzemelerine kıyasla daha düşüktür. Bu nedenle, PMC malzemelerin performansını artırmak amacıyla sürekli olarak yeni yöntemler ve bileşimler üzerinde çalışılmaktadır. PMC'ler, kolay üretim süreçleri ve geliştirilmiş fiziksel özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Üretim sırasında yüksek sıcaklık veya basınca ihtiyaç duymamaları, bu malzemelerin karmaşık geometrilere sahip parçaların imalatında tercih edilmesini sağlamaktadır. Düşük sıcaklıklarda üretim yapılabilmesi, özellikle hassas takviye elemanlarının zarar görmeden kompozit yapı içerisine entegre edilmesine olanak tanır. Ayrıca, PMC malzeme üretimi için gereken ekipman, genellikle sade bir yapıya sahip olup kullanım kolaylığı sunmaktadır. Bu özellikler, polimer matrisli kompozitlerin hem maliyet etkinliğini artırmakta hem de farklı sektörlerde kullanımını yaygınlaştırmaktadır (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Hasan et al., 2019; Kumar Sharma et al., 2022; Mazumbar, 2002; Parveez et al., 2022; Shivi Kesarwani, 2017; Singh et al., 2019).

## 5. KOMPOZİT MALZEMELERİN UÇAK YAPILARINDA KULLANIMI

Kompozit malzemeler, modern havacılık teknolojisinin ilerlemesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, uçakların toplam ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini ve emisyonları düşürürken, aynı zamanda yüksek korozyon ve yorulma direnci sunar. Gelişmiş tasarım esnekliği, karmaşık ve aerodinamik olarak optimize edilmiş şekillerin üretilmesine olanak tanır. Bu

özellikler, daha güvenli, ekonomik ve çevre dostu uçakların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımı, yalnızca bugünün uçaklarında değil, geleceğin havacılık teknolojilerinde de temel bir bileşen olmaya devam edecektir (Carlsson et al., 2013; Kumar Sharma et al., 2022; May et al., 2020; Mazumbar, 2002; Sandhanshiv & Patel, 2020; Tanasa & Zanoaga, 2013; Zabihi et al., 2018).

Modern yolcu uçaklarında kompozit malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle son yıllarda geliştirilen yeni nesil uçak modelleri, yapısal verimlilik ve yakıt tasarrufu sağlamak amacıyla kompozit malzemelere büyük ölçüde yönelmiştir. Örneğin, Boeing 787 Dreamliner uçağının yaklaşık olarak uçağın toplam ağırlığının %50'sinden fazlası kompozit malzemelerden oluşmaktadır. Gövde, kanatlar ve kuyruk gibi ana yapısal bileşenlerde karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) yaygın olarak kullanılır (Abbas et al., 2018; Blanco et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Shivi Kesarwani, 2017). Aynı şekilde Airbus A350, 1975 yılında üretilen Airbus A300 model uçak, yapısında ağırlıkça yaklaşık %8 oranında kompozit malzeme içermekteydi. Günümüzde ise Airbus A350 gibi modern uçaklarda bu oran, teknolojik gelişmeler ve hafiflik ihtiyacının artmasıyla %53 seviyesine ulaşmıştır. Airbus A350'te de CFRP, kanatlar ve gövde gibi kritik bölümlerde yoğun olarak kullanılır. Yeni geliştirilen diğer yolcu uçakları ve bazı geniş gövdeli ticari jetler, %40-60 arası kompozit malzeme kullanım oranlarına sahiptir. Bu oran, uçağın tasarımına ve üreticiye bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Askeri uçaklarda ise, F-22 ve F-35 gibi savaş jetlerinde kompozit malzemeler, gizlilik, mukavemet ve ağırlık azaltımı gibi stratejik gereksinimleri karşılamak için tercih edilmektedir (Abbas et al., 2018; Godara et al., 2021; Tanasa & Zanoaga, 2013; Trzepieciński et al., 2021).



**Şekil 5:** Airbus A350 uçağının görüntüsü

Eski nesil uçaklarda örneğin, Boeing 737 veya Airbus A320 gibi daha eski modellerde kompozit malzeme kullanımı oldukça sınırlıdır ve genellikle %10'un altındadır. Bu uçaklar, çoğunlukla alüminyum alaşımlar ve diğer geleneksel malzemelerle inşa edilmiştir (Abbas et al., 2018; Godara et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022).



**Şekil 6:** Airbus A320

Kompozit malzemeler, modern uçakların çeşitli bölümlerinde, yapısal bileşenlerden iç mekan elemanlarına kadar yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçağın gövdesi, kanatları ve kuyruk yapıları gibi birincil yapısal parçalar, büyük yükleri taşır ve uçağın genel bütünlüğü açısından kritik öneme sahiptir. Birincil yapısal bileşenlerde genellikle kompozit malzemeler tercih edilir. Örneğin, Boeing 787 ve Airbus A350 gibi modern uçaklarda gövde büyük ölçüde kompozit malzemelerden yapılmıştır (Blanco et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Trzepieciński et al., 2021). Bu malzemeler, uçak ağırlığını azaltarak yakıt tasarrufu sağlar, aynı zamanda korozyona karşı dayanıklılık ve yorulma direnci sunar. Kanatlar ve stabilizatörler gibi aerodinamik açıdan önemli bölümlerde de kompozitler kullanılarak performans artırılır. Boeing 777X gibi uçaklarda kanat kaplamaları, kanat kirişleri ve nervürler kompozitlerden yapılır. Bu kompozit yapılar Aerodinamik performans, düşük ağırlık ve yorulma direncinde iyileşmeler sunar. Ayrıca yatay ve dikey stabilizatörler daha düşük ağırlık ve artırılmış sertlik avantajları sağlaması nedeniyle genellikle kompozit malzemelerden yapılır (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Godara et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022).

İkincil yapısal bileşenler; bu parçalar birincil yapıları destekler veya aerodinamik faydalar sağlar, de kompozitler önemli bir rol oynar. Uçağın yüzeyini pürüzsüz hale getiren kompozit kaplamalar aerodinamiği iyileştirir, ayrıca kontrol yüzeyleri (elevatör, dümen, kanatçık ve flaplar) hafiflik ve dayanıklılık sağlamak, manevra kabiliyetini artırmak amacıyla kompozit malzemelerden üretilir (W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022).

Havacılık sektöründe kompozit malzemelerin kullanımı, modern uçakların verimliliğini, dayanıklılığını ve aerodinamik performansını artırarak büyük bir dönüşüm yaratmıştır. Bu malzemeler hem uçak yapılarında hem de motor ve iç bileşenlerde sağladıkları avantajlar sayesinde havacılık endüstrisinin vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir.

### **5.1. Motor Kapakları ve Nacelle'ler**

Jet motorlarını çevreleyen motor kapakları ve nacelle adı verilen muhafazalar, uçak motorlarının korunması ve motor performansının artırılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu parçalar, motoru dış etkenlerden korumanın yanı sıra, hava akışını optimize ederek uçak aerodinamiğini geliştirir. Kompozit malzemeler, bu tür bileşenlerde sağladıkları dayanıklılık,

hafiflik ve ısı direnci sayesinde tercih edilmektedir. Hem zorlu çevresel koşullara dayanıklı hem de geleneksel malzemelere kıyasla daha hafif oldukları için uçakların ağırlığını önemli ölçüde azaltır ve yakıt verimliliğini artırır (Blanco et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022; Shivi Kesarwani, 2017).



**Şekil 7:** Motor kapağı ve nacelle örneği

## 5.2. Uçak İç Mekan Bileşenleri

Kompozit malzemeler, uçak kabin ve kokpitlerinin iç mekanlarında konfor, dayanıklılık ve ağırlık tasarrufu sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yalnızca hafif olmalarıyla değil, aynı zamanda estetik, izolasyon ve titreşim sönümlenme gibi özellikleriyle de öne çıkar (Blanco et al., 2021; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022; Shivi Kesarwani, 2017).

Uçakların kabin tabanında kullanılan paneller genellikle petek yapılı kompozit malzemelerden üretilir. Bu yapı, hem hafiflik hem de dayanıklılık sağlayarak zemin panellerinin uzun ömürlü ve verimli olmasını mümkün kılar. Kabin içindeki saklama alanlarında kullanılan kompozit malzemeler, hem hafif hem de dayanıklı oldukları için ideal bir tercihtir. Bu sayede, ağırlığı azaltırken bagaj raflarının sağlamlığını artırır. Yolcuların konforu ve uçak iç mekanının estetiği için kullanılan bu bileşenler, izolasyon sağlaması ve hafif olması nedeniyle kompozit malzemelerden üretilir. Koltuk çerçeveleri ve destek yapılarında kompozitler, ağırlığı azaltırken ergonomiyi artıran özellikler sunar. Bu, uçuş konforunu artırırken yakıt tüketimini azaltmaya da katkıda bulunur

(Blanco et al., 2021; W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Godara et al., 2021; Herakovich, 2012; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022).

### 5.3. Motor Bileşenleri

Kompozit malzemeler, jet motorlarında zorlu koşullara dayanacak şekilde tasarlanmış kritik bileşenlerde de kullanılmaktadır. Fan kanatları ve muhafazalarında kullanılan karbon fiber kompozitler, yüksek dayanıklılık ve ısı direnci sağlayarak motor performansını artırır. Hafif yapıları sayesinde motor ağırlığını azaltırken aerodinamik verimliliği artırır. Jet motorlarının egzoz çıkışları, aşırı sıcaklıklara maruz kaldığından seramik matris kompozitler (CMC'ler) bu bileşenlerde tercih edilmektedir. Bu malzemeler, ısıya dayanıklılık ve hafiflik açısından üstün performans sunar (Blanco et al., 2021; W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Herakovich, 2012; Kumar Sharma et al., 2022; Parveez et al., 2022; Shivi Kesarwani, 2017).



Şekil 8: Motor kapağı muhafazaları ve jet motoru

### 5.4. Özel Bileşenler

Havacılıkta kompozitlerin kullanıldığı diğer önemli alanlar, uçak performansını ve güvenliğini artırmaya yönelik yenilikçi çözümleri içerir.

Uçakların radar sistemlerini dış etkenlerden koruyan kubbeler (Radome), radar sinyallerine şeffaflık sağlamaları nedeniyle cam elyaf kompozitlerden üretilir. Bu malzeme, radar performansını optimize ederken kubbenin hafif ve



dayanıklı olmasını sağlar. Uçak iniş takımlarını çevreleyen kapaklarda kompozit malzemeler, ağırlığı azaltırken yüksek çevrimli kullanım koşullarına dayanıklılık sağlar. Aerodinamik verimliliği artırmak ve sürüklenmeyi azaltmak amacıyla kullanılan kanat uçları (Wingletler), hafif kompozit malzemelerden yapılır. Bu bileşenler, yakıt tasarrufu sağlayarak uçuş maliyetlerini düşürür (Blanco et al., 2021; W. D. Callister & Rethwisch, 2018; Kumar Sharma et al., 2022; Mazumbar, 2002; Parveez et al., 2022).



**Şekil 9:** Uçak kanat uçları

## 6. SONUÇ

Kompozit malzemeler havacılık uygulamalarında özellikle uçaklar için her geçen gün daha da kıymetli yapılar olmaktadır. Havacılık endüstrisi, sürdürülebilirlik ve performans odaklı ilerledikçe kompozit malzemelere olan talebin artması beklenmektedir. Gelecekte, daha fazla uçak modelinde kompozit malzemelerin kullanılması ve mevcut oranların daha da yükselmesi öngörülmektedir. Sonuç olarak, modern yolcu uçaklarının yaklaşık %50-60'ı kompozit malzemelerden üretilmekte olup, bu oran uçak modeline ve üreticiye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kompozit malzemelerin sağladığı avantajlar, havacılık endüstrisinin bu malzemelere olan ilgisini sürekli olarak artırmaktadır. Havacılık sektöründe malzeme teknolojilerindeki gelişmeler, özellikle kompozit malzemelerin kullanımını yaygınlaştırarak uçak tasarımında devrim yaratmıştır. Bu malzemelerin hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri, geleneksel malzemelere kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır. Kompozitlerin kullanımının artması,

uçakların yakıt verimliliğini artırarak çevresel etkileri azaltmakta ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir. Bu bölümünde ele alınan konular, kompozit malzemelerin sadece mevcut uygulamalarda değil, gelecekteki havacılık teknolojilerinde de vazgeçilmez bir yere sahip olacağını göstermektedir. Yenilikçi tasarımların ve ileri üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle, kompozit malzemelerin performansı daha da artırılacak ve sektöre katkıları büyüyecektir. Bu bağlamda, havacılıkta kompozitlerin kullanımının hem teknolojik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir role sahip olduğu açıktır.

**KAYNAKÇA**

- Abbas, S., Li, F., & Qiu, J. (2018). A review on SHM techniques and current challenges for characteristic investigation of damage in composite material components of aviation industry. *Materials Performance and Characterization*, 7(1), 224–258. <https://doi.org/10.1520/MPC20170167>
- Aly, N. M. (2017). A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 254(4). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/4/042002>
- Baig, N., Kammakakam, I., Falath, W., & Kammakakam, I. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2(6), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>
- Belan, J., Vaško, A., & Kuchariková, L. (2017). A brief overview and metallography for commonly used materials in aero jet engine construction. *Production Engineering Archives*, 17(17), 8–13. <https://doi.org/10.30657/pea.2017.17.02>
- Blanco, D., Rubio, E. M., Lorente, R., & Sáenz-Nuño, M. A. (2021). Lightweight structural materials in open access: Latest trends. In *Materials* (Vol. 14, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma14216577>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Callister, William D., & Renthwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering an Introduction* (8 th editi). John Wiley & Sons, Inc.
- Carlsson, L. A., Adams, D. F., & Pipes, R. B. (2013). Basic experimental characterization of polymer matrix composite materials. *Polymer Reviews*, 53(2), 277–302. <https://doi.org/10.1080/15583724.2013.776588>
- Clifton, S., Thimmappa, B. H. S., Selvam, R., & Shivamurthy, B. (2020). Polymer nanocomposites for high-velocity impact applications-A review. *Composites Communications*, 17(August 2019), 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.11.013>
- Culebras, M., Gómez, C. M., & Cantarero, A. (2014). Review on polymers for thermoelectric applications. *Materials*, 6(9), 6701–6732. <https://doi.org/10.3390/ma7096701>

Das, M., Sahu, S., & Parhi, D. R. (2020). A Review of Application of Composite Materials for Aerospace Structures and its Damage Detection Using Artificial Intelligence Techniques. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3714181>

Das, M., Sahu, S., & Parhi, D. R. (2021). A review of application of composite materials for aerospace structures and its damage detection using artificial intelligence techniques. *Materials Today: Proceedings*, 44, 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.005>

Das, S., & Yokozeki, T. (2021). A brief review of modified conductive carbon / glass fibre reinforced composites for structural applications : lightning strike protection , electromagnetic shielding , and strain sensing The University of Tokyo 7-3-1 Hongo , Bunkyo-ku , Tokyo 113-8656 , . *Composites Part C: Open Access*, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100162>

Egbo, M. K. (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(8), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>

Godara, S. S., Yadav, A., Goswami, B., & Rana, R. S. (2021). Review on history and characterization of polymer composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2674–2677. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.680>

Hasan, M., Zhao, J., & Jiang, Z. (2019). Micromanufacturing of composite materials: A review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 1(1). <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab0f74>

Hashin, Z. (1983). Analysis of composite materials: A survey. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 50(3), 481–505. <https://doi.org/10.1115/1.3167081>

Herakovich, C. T. (2012). Mechanics of composites: A historical review. *Mechanics Research Communications*, 41, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.01.006>

Kumar Sharma, A., Bhandari, R., Sharma, C., Krishna Dhakad, S., & Pinca-Bretotean, C. (2022). Polymer matrix composites: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2330–2333. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.592>

May, M., Rupakula, G. D., & Matura, P. (2020). Non-polymer-matrix

composite materials for space applications. In *Composites Part C: Open Access* (Vol. 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100057>

Mazari, S. A., Ali, E., Abro, R., Khan, F. S. A., Ahmed, I., Ahmed, M., Nizamuddin, S., Siddiqui, T. H., Hossain, N., Mubarak, N. M., & Shah, A. (2021). Nanomaterials: Applications, waste-handling, environmental toxicities, and future challenges - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105028. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105028>

Mazumbar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing*. CRC Press.

Mugahed Amran, Y. H., Alyousef, R., Rashid, R. S. M., Alabduljabbar, H., & Hung, C. C. (2018). Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. *Structures*, 16(July), 208–238. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.09.008>

Parveez, B., Kittur, M. I., Badruddin, I. A., Kamangar, S., Hussien, M., & Umarfarooq, M. A. (2022). Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. *Polymers*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/polym14225007>

Prunet, G., Pawula, F., Fleury, G., Cloutet, E., Robinson, A. J., Hadziioannou, G., & Pakdel, A. (2021). A review on conductive polymers and their hybrids for flexible and wearable thermoelectric applications. *Materials Today Physics*, 18, 100402. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100402>

Sandhanshiv, R. D., & Patel, D. M. (2020). Carbon Fibre Reinforced Composite Material: Review of Properties and Processing for various Metal Matrix Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 810(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/810/1/012014>

Shivi Kesarwani. (2017). Polymer Composites in Aviation Sector. *International Journal of Engineering Research And*, V6(06), 518–525. <https://doi.org/10.17577/ijertv6is060291>

Singh, B., Kumar, R., & Chohan, J. S. (2019). Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1562–1567. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.335>

Suresh Kumar, S., Thirumalai Kumaran, S., Velmurugan, G., Perumal, A., Sekar, S., & Uthayakumar, M. (2021). Physical and mechanical properties of various metal matrix composites: A review. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1022–1031. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.354>

Swolfs, Y., Verpoest, I., & Gorbatiikh, L. (2019). Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications. *International Materials Reviews*, 64(4), 181–215. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1467365>

Tanasa, F., & Zanoaga, M. (2013). Fiber-reinforced polymer composites as structural materials for aeronautics. *International Conference Of Scientific Paper AFASES*, 1–10. <http://www.newairplane.com/787>

Thor, M., Sause, M. G. R., & Hinterhölzl, R. M. (2020). Mechanisms of origin and classification of out-of-plane fiber waviness in composite materials — A review. *Journal of Composites Science*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/jcs4030130>

Trzepieciński, T., Najm, S. M., Sbayti, M., Belhadjsalah, H., Szpunar, M., & Lemu, H. G. (2021). New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications. *Journal of Composites Science*, 5(8). <https://doi.org/10.3390/jcs5080217>

Vassilopoulos, A. P. (2020). The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue. *International Journal of Fatigue*, 134(January), 105512. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105512>

Zabihi, O., Ahmadi, M., Nikafshar, S., Chandrakumar Preyeswary, K., & Naebe, M. (2018). A technical review on epoxy-clay nanocomposites: Structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 135, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.066>

## BÖLÜM 3

### ELEKTRONİK TEKNOLOJİSİNDE NANOMALZEMELERİN KULLANIMI

Arş. Gör. Kevser İrem DANACI <sup>1</sup>, Arş. Gör. İlhan DANACI <sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. kiremdanaci@sivas.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-4654-5140

<sup>2</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. idanaci@sivas.edu.tr, Orcid ID: 0000-0002-9148-1481





## 1.GİRİŞ

Nanomalzemeler, en az bir boyutu 1-100 nanometre arasında ifade edilebilen malzemelerdir. Bu malzemeler normal formlarına göre nano boyutta daha iyi elektriksel, optik ve mekanik özellikler göstermektedirler. Örneğin nano boyutta grafen daha fazla iletkenliğe ve esnekliğe sahip hale gelir. Yüksek elektriksel iletkenlik, elektronik uygulamaları için oldukça önemlidir. Devrelerde daha hızlı elektron taşımaya ve dolayısıyla daha düşük enerji kayıplarına neden olur. Ayrıca nano boyuttaki malzemelerde termal iletkenliğin de arttığı gözlenmektedir(Baig et al., 2021; Heiligtag & Niederberger, 2013).

Teknolojinin gelişmesiyle beraber verimi ve performansı artırma isteği, cihazların boyutlarını küçültme gereksinimi, esnek elektronik, optoelektronik gibi yeni elektronik dallarının ortaya çıkması ile beraber nanomalzemelere olan ihtiyacın arttığı görülmektedir. Nanomalzemeler sayesinde çok küçük ölçekli transistörler ve yüksek hassasiyetli sensörler üretilebilmektedir. Dolayısıyla işlemci performansları artmakta, yüksek çözünürlüklü görüntüleme sistemleri üretilmekte ve elektronik teknolojisi giderek gelişmektedir. Nanomalzemeler aynı şekilde sağlık alanında da biyosensörler ve giyilebilir cihazlarla birlikte sıkça kullanılır hale gelmiştir. Nanomalzemeler sayesinde elektronik alanında birçok yenilik meydana gelmiş ve performans sıkıntısından dolayı sınırlanan birçok çalışmanın önü açılmıştır. Moore Yasası'nda ifade edilen “bir çipteki transistör sayısının yaklaşık her iki yılda bir iki katına çıkacağı” öngörüsü nanomalzemelerin elektronik alanındaki önemini ayrıca gözler önüne sermektedir(Baig et al., 2021; Hossein Hosseini et al., 2006; Jeevanandam et al., 2018; Mazari et al., 2021; Street, 2009).

Nanomalzeme teknolojisi, yeni gibi görünse de milattan önceki yıllarda bile nanomalzeme örneklerine rastlamak mümkündür. Lycurgus Kupası olarak bilinen Roma kadehi yapımında cama yapışan altın ve gümüş nanopartikülleri sayesinde içinden ışık geçtiğinde renk değiştiren bir özelliğe sahip olmuştur (Freestone et al., 2007). Günümüz nanomalzeme teknolojisinin ilk örnekleri ise 1600'lü yıllara dayandırılabilir. Robert Hooke ve Antoni van Leeuwenhoek isimli bilim insanları mikroskoplarla mikroskobik parçacıkları gözlemleyerek nano dünyanın kapısını aralamışlardır (Gest, 2004). 1857'de Michael Faraday, kolloidal altını inceleyerek nanopartikül araştırmalarına öncülük etti (Thompson, 2008). Ünlü fizikçi Richard Feynman 1959 yılında bireysel atomların ve moleküllerin özelliklerinin değiştirilebileceğini ortaya koydu. 1981 yılında IBM bilim insanları Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer,

yüzeylerdeki tek tek atomların görselleştirilmesini sağlayan Taramalı Tünelleme Mikroskopunu (STM) icat ettiler. Bu icatla, 1986 yılında Fizik Nobel Ödülü'nü kazandılar. 1985 yılı Fullerenlerin keşfedildiği yıldır. Bilim insanları Harry Kroto, Robert Curl ve Richard Smalley, yeni bir karbon formu olan fullerenleri keşfettiler (Hare et al., 1992). Bu, karbon nanotüpler ve grafen gibi karbon bazlı nanomalzemelerin temelini oluşturan bir gelişmeydi. Bu zamana kadar yapılan keşifler, malzemelerin nanometre ölçeğinde farklı davrandığını, benzersiz elektriksel, optik ve mekanik özellikler sergilediğini ortaya koydu. Daha sonrasında ise nanomalzemeleri bir disiplin haline getiren gelişmeler gerçekleşti. 1990 yıllarda karbon nanotüpler ve kuantum noktaları keşfedildi. 2004 yılında grafenin keşfi ile nano dünyanın kapıları açılmış oldu. Günümüzde nanomalzemeler transistör, pil ve sensör teknolojisinde devrim niteliğinde gelişmelere imkan sunmuştur (Baig et al., 2021; Gajanan & Tijare, 2018; Salem et al., 2023; Schiavo et al., 2024).

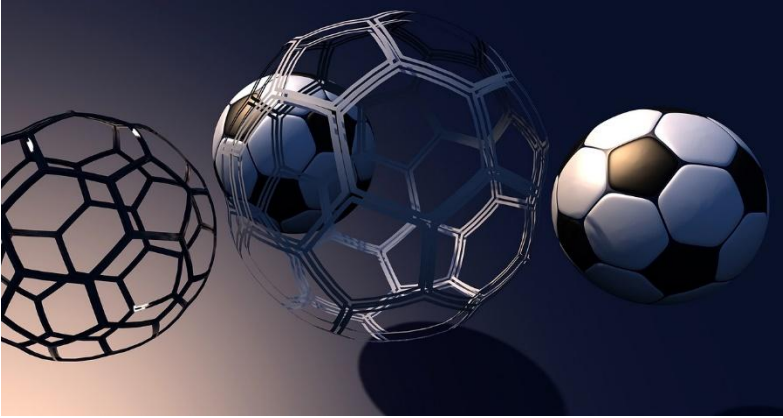
## 2.ELEKTRONİKTE KULLANILAN NANOMALZEME TÜRLERİ

Nanomalzemeler, elektronik malzemeler ve cihazlar için oldukça önemlidir. Devrelerdeki iletken nanomalzemelerden ekranlardaki kuantum noktalarına kadar nanomalzemeler, elektronikte temel bir role sahiptir. Her nanomalzeme türü kendine ait özellikleri sayesinde elektroniğin birçok alt dalında kullanılmaktadır. Nanomalzemeler bu özellikleri göz önüne alınarak karbon bazlı nanomalzemeler, organik bazlı nanomalzemeler, inorganik bazlı nanomalzemeler ve kompozit bazlı nanomalzemeler olarak ayrılmaktadır (Zhao et al., 2017).

Karbon bazlı nanomalzemeler; fullerenler, karbon nanotüpler (CNT), grafen olarak sınıflandırılabilir. Organik bazlı nanomalzemelere, polipirol, poli(anilin) gibi hafiflik ve esneklikleriyle elektronik cihazlarda yalıtkan ya da yarı iletken olarak kullanılan polimer nanomalzemeler örnek verilebilir (Ahir et al., 2008; Sloma et al., 2021; Zabihi et al., 2018). İnorganik bazlı nanomalzemelere bakacak olursak. altın, gümüş gibi metallerin nano ölçekli parçacıkları, ZnO, TiO<sub>2</sub> gibi malzemeler örnek olarak verilebilir. Kuantum noktaları da bir inorganik nanomalzeme çeşididir. Kompozit bazlı nanomalzemeler ise karbon bazlı nanomalzemelerin, metal ya da seramik matris içinde kullanılması veya metal nanoparçacıkların polimer matris içine dağılmasıyla gibi işlemler ile elde edilen malzemeleridir (Salem et al., 2023; Sloma et al., 2021).

## 2.1. Fullerenler

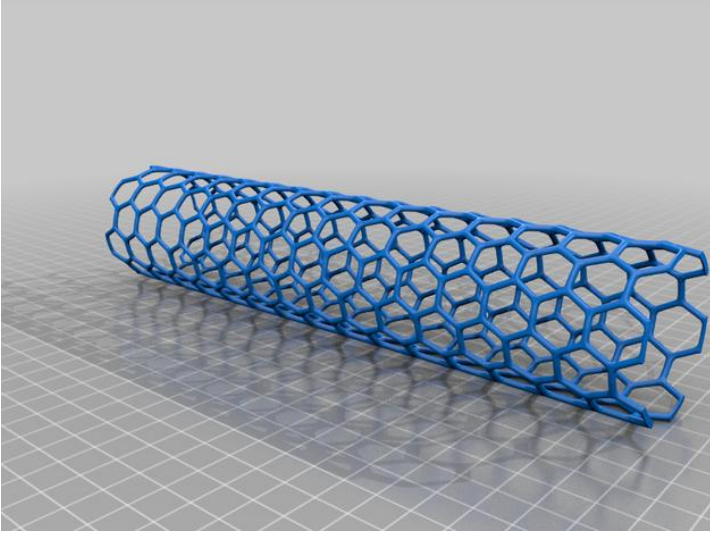
Fullerenler, diğer adıyla Buckyballs, karbon atomlarından meydana gelen küresel formadaki yarıiletkenlerdir. Elektriksel iletkenlik özellikleri ve hafiflikleri sayesinde elektronikte kullanılır. Organik fotovoltajik hücrelerde, organik ışık yayan diyotlarda (OLED'ler) ve organik alan etkili transistörlerde (OFET'ler) kullanılmaktadırlar. C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>, C<sub>80</sub> gibi türleri yaygın olarak kullanılan fullerenlere örnek olarak verilebilir (Hare et al., 1992).



**Şekil 1:** Örnek bir futbol topunun Fulleren Geometrisi (Pixabay, 2020)

## 2.2. Karbon Nanotüpler

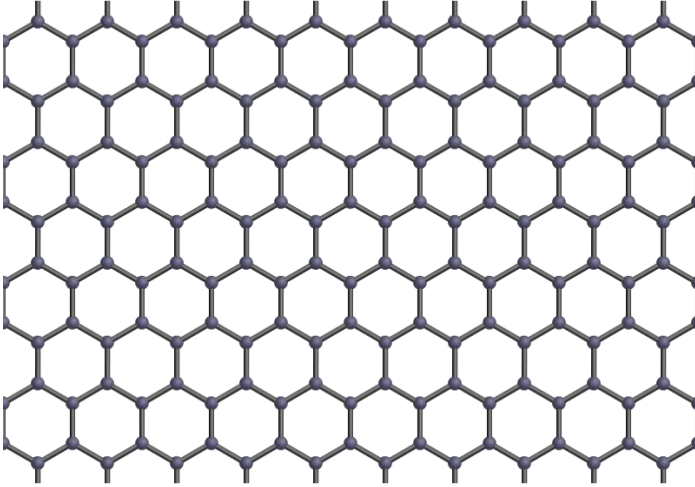
Karbon Nanotüpler (CNT), sahip oldukları elektriksel, mekanik ve termal özellikleri sayesinde elektronikte sıkça kullanılırlar. Nanometre boyutundaki ve silindirik yapıdaki moleküllerden oluşan CNT'lerin tek duvarlı SWNT ve çok duvarlı MWNT olarak iki çeşidi mevcuttur. CNT'ler elektriksel, mekanik ve termal özellikleri sayesinde ön plana çıkarlar. CNT'ler daha çok giyilebilir elektronikte kullanılırlar. Ayrıca alan etkili transistörlerde de kullanımı mevcuttur (CNT-FET). Sensör teknolojisinde de CNT'lere rastlamak mümkündür (Ahir et al., 2008; Sloma et al., 2021; Toshima, 2017).



Şekil 2: Örnek bir Karbon Nanotüp yapısı (Creazilla, 2019)

### 2.3.Grafen

Grafen, bal peteği yapısında bir malzemedir. Elektronik uygulamalar için oldukça önemli olan grafen, yüksek elektron akışı, saydamlık ve esneklik özelliklerine sahiptir. Enerji depolama ünitelerinde, nanoelektronik cihazlarda ve sensörlerde kullanılır (Allen et al., 2010).



Şekil 3: Örnek bir grafen yapısı (Firkin, 2017).

### 2.3.1. Diğer Nanomalzemeler

Nanoteller (1D malzemeler), adının da anımsattığı üzerine nano boyutlu telleri ifade eder. Gümüş, bakır gibi yarı iletkenlerden elde edilir. Elektron akışının kontrol edilmesi gereken uygulamalarda (örneğin transistörler), esnek elektronik ve sensörlerde kullanılır.

2D malzemeler, bir veya birden fazla atom katmanından oluşan malzemelerdir. Grafen, molibden disülfür ( $\text{MoS}_2$ ) ve atomik ince malzemeler örnek olarak verilebilir. Bu malzemeler, elektriksel ve mekanik özelliklerindeki yüksek performansları sayesinde elektronik uygulamalar için oldukça uygundur. Örneğin yeni nesil yüksek hız gerektiren elektronik cihazlarda grafen oldukça sık kullanılmaktadır. Bunun sebebi grafenin yüksek elektronik hareketliliğine ve mekanik dayanıklılığa sahip olmasıdır. Grafende CNT'ler gibi karbon bazlı bir nanomalzemedir ve dolayısıyla elektriksel iletkenliği dikkat çekici seviyelerdedir. Yeni nesil yüksek hızlı transistörler ve esnek elektronikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Allen et al., 2010; Huo et al., 2024; Mazari et al., 2021; Salem et al., 2023).

Nanopartiküller, çapları nanometre boyutunda olan metalik ve yarıiletken partiküllerdir. CdSe, ZnO gibi yarıiletken nanopartiküller, elektronik cihazların boyutunun küçültülmesinde ve veriminin artırılmasında kullanılır. Altın, gümüş gibi metalik nanopartiküller ise, baskı devre yapımı ve iletken mürekkep gibi uygulamalarda kullanılır.

Kuantum noktaları, elektronları üç boyutta hapseden ve elektriksek-optik özelliklerinin değiştirilmesine olanak sağlayan nanoparçacıklardır. Yüksek elektron hareketliliği ve kararlılığa sahiptirler. Aynı zamanda farklı dalga boylarında ışımaya yapabilirler. Bu özellikleri sayesinde LED, ekranlar ve fotovoltaiik hücreler gibi optoelektronik uygulamalarında sıkça kullanılırlar (Nabil & Megahed, 2023).

Nanokompozitler, nanopartiküllerin başka malzemelerle birleştirilmesi ile oluşurlar. Bu birleştirmenin amacı, kullanılan malzemelerin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini iyileştirmektir. Nanokompozitler dayanıklı ve hafiftirler. Bu sayede elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda esnek olan nanokompozitler, esnek elektronik uygulamalarında da kullanılmaktadır.

### 3.NANOMALZEMELERİN SENTEZ VE ÜRETİM TEKNİKLERİ

Nanomalzeme üretimi, boyutların küçük olması ve en ufak bir müdahalenin malzemenin optik, elektriksel ve mekanik özelliklerini etkilemesinden dolayı oldukça zorlayıcıdır. Örneğin, aynı elektriksel özellikleri elde etmek için malzemedeki şeklin ve boyutun aynı olması gerekir. Buda tutarlı bir üretim prosesi gerektirmektedir. Ayrıca nanomalzemeler, oksitlenme ve bozulmaya elverişli olup hassas malzemelerdir. Sentez ve üretim teknikleri maliyetli olup uzmanlık gerektirmektedir. Bazı nanomalzemeler insan sağlığı için riskli olduğundan güvenlik önlemlerine dikkat edilmesi gerekmektedir(Mazari et al., 2021; Salem et al., 2023) .

Nanomalzemelerin sentezlenmesinde ve üretilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu konuda en yaygın söz edilen teknikler bottum-up ve top-down olsa da, farklı nanomalzeme türleri için kullanılan farklı yöntemlerde mevcuttur.

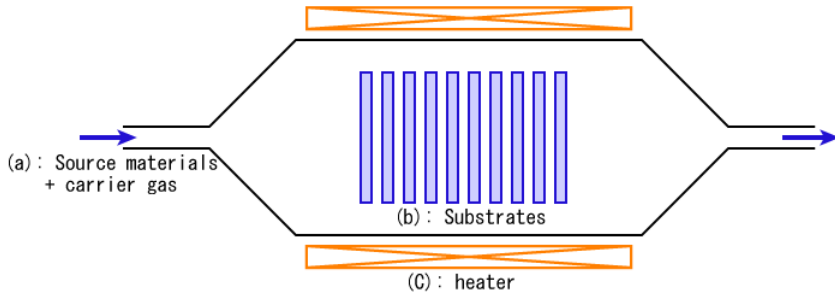
#### 3.1.Bottom-Up (Aşağıdan Yukarıya) ve Top-Down (Yukarıdan Aşağıya) Üretim Teknikleri

Top-down tekniğinde, katı bir malzemeden nanoyapılar elde edilmektedir. Bu teknik en yaygın fotolitografi ve elektron ışını litografisi gibi geleneksel uygulamalar için kullanılır. Litografi, nano ölçekli yapılarını yarı iletken yüzeylere aktarılmasını sağlar. Nano boyutlu entegre devrelerin elde edilmesinde kullanılır.

Bottom-up teknikleri ise, atom veya moleküllerden nanopartikül veya nanotel üretilmesi olarak ifade edilebilir. Bu yöntem Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), Moleküler Işın Epitaksisi, Sol-Jel işlemi gibi yeni nesil yöntemleri kapsar.

##### 3.1.1.Kimyasal Buhar Biriktirme

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD), gaz öncüllerini reaksiyona sokarak nanomalzemelerin ince filmlerini substratlara biriktirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem çoğunlukla Nanotüpler ve Grafen katmanları oluşturmak için kullanılır.



**Şekil 4:** Kimyasal Buhar Biriktirme yönteminin şematik gösterimi (S-kei, 2008)

### 3.1.2. Moleküler Işın Epitaksisi

Moleküler Işın Epitaksisi, hassas ince katmanlar oluşturmak için kullanılır. Bu yöntem geçiş metali dikalkogenidleri (TMD'ler) gibi 2D malzemeler üretmek için kullanılır.

### 3.1.3. Sol-Jel Yöntemi

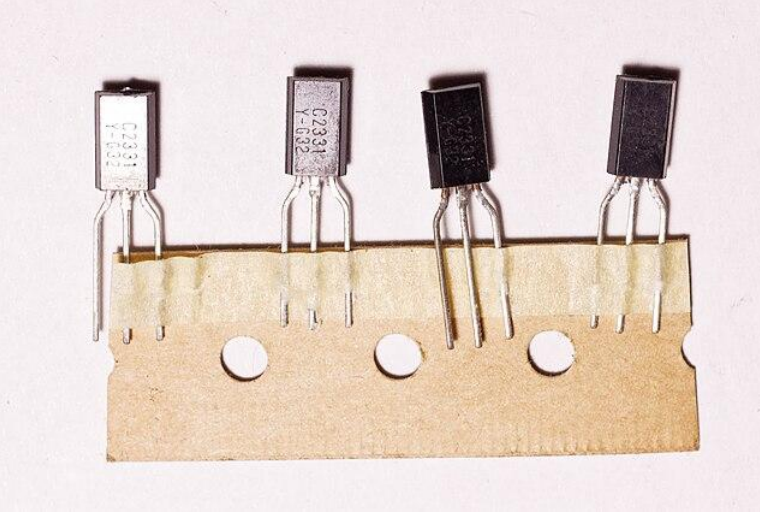
Sol-jel işlemi, sıvı bir "sol"ün katı bir "jele" kimyasal dönüşümünü ile yapılıdır. Nanopartiküller ve nanokompozitlerin üretiminde kullanılır. Bu teknikle, sensörler, kapasitörler gibi elektronik malzeme ve cihazlar için oksit nanopartiküller ve ince filmler üretilmektedir.

## 4. ELEKTRONİK MALZEME TEKNOLOJİSİNDE NANOMALZEME UYGULAMALARI

Nanomalzemeler, elektronik için vazgeçilmez yapılardır. Günümüzde birçok alanda kullanımının yanı sıra elektronik cihazların geleceği için yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Nanomalzemelerin elektronikte kullanılmaya elverişli kılan onların benzersiz elektriksel, mekanik, optik ve termal özellikleridir. Aynı şekilde yüzey-hacim oranının yüksek olması, kuantum etkileri ve boyutlarına göre ayarlanabilir elektronik davranışları nanomalzemeleri elektronik uygulamalarda ön plana çıkarmaktadır. Nanomalzemeler şuan aktif olarak transistörler, led ekranlar, esnek elektronik ve sensör teknolojilerinde araştırılmaktadır (Allen et al., 2010; Mazari et al., 2021; Salem et al., 2023).

#### 4.1. Transistörler ve Entegre Devreler

Teknolojinin gelişmesiyle beraber cihaz boyutları giderek küçülmekte fakat performansları artmaktadır. Buna en iyi örnek işlemcilerdir. İşlemci içerisindeki transistörün boyutları giderek küçülmekte ama verimi ve performansı artmaktadır. Transistör yapımında kullanılan CNT ve grafen gibi nanomalzemelerin elektriksel iletkenlikleri oldukça yüksektir ve dolayısıyla elektron hareketliliği fazladır. Bu performansa etki eden bir özellikken, daha düşük bir enerji ile daha fazla elektron akıtması verimi artıran bir özelliktir. Aynı şekilde 2d nanomalzemelerde transistör yapımında kullanılmaktadır. Örneğin MoS<sub>2</sub> ve WSe<sub>2</sub> gibi geçiş metali TMD'ler, hem ince transistör hem de mantık devreleri yapımında kullanılan 2d nano yarıiletkenlerdir (Franklin, 2015; Street, 2009; Syedmoradi et al., 2019).



**Şekil 4:** Örnek bir transistör resmi (KSC2331 transistors in TO-92L case, 2023)

#### 4.2. Esnek ve Giyilebilir Elektronikler

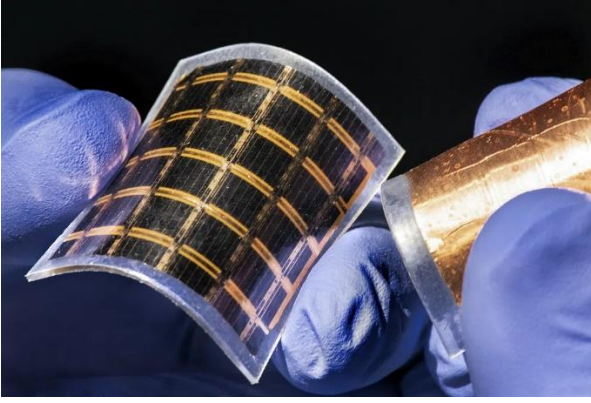
Malzemelerin nano boyuta getirilmesi esnek elektronik uygulamalarında gelişmesine olanak sağlamıştır. Giyilebilir teknolojiler, esnek ekranlar vb. uygulamalar için nanoteller ve grafen sıkça kullanılmaktadır. Gümüş nanoteller, grafen ve iletken polimerler gibi malzemeler esnek devrelerde ve giyilebilir cihazlarda kullanılır. Aynı şekilde giyilebilir cihazlarla elektrik enerjisi üretmek için kullanılan nanojeneratörler mevcuttur. Bu jeneratörler,



piezoelektrik veya triboelektrik nanomalzemeleri olarak ifade edilen ZnO nanotelleri gibi nanomalzemeler aracılığı ile üretilmektedir.

### 4.3.Enerji Depolama

Nanomalzemeler, yüksek kapasiteli kapasitörler ve uzun ömürlü lityum iyon piller üretmek için de oldukça önemlidir. Grafen ve silikon nanomalzemeler bu tarz uygulamalar da sıkça kullanılır. Aynı şekilde fotovoltaiik piller içinde kuantum noktaları oldukça önemlidir. Nanomalzemeler sayesinde esnek yapıllı, hafif ve verimi yüksek güneş hücreleri üretilebilmektedir.



Şekil 4: Örnek bir fotovoltaiik pil (V-TOL Aerospace, 2023)

### 4.4.Sensörler

Nanomalzemeler, hassas olmaları sebebiyle sensör teknolojisinde de önemli bir konumdadır. Bu hassasiyet, nanomalzemelerin yüzey alanı/hacim oranının yüksek olmasından kaynaklanır. Gaz sensörleri, biyosensörler, tıbbi teşhis cihazları gibi uygulamalarda nanomalzemelerin kullanımı oldukça önemlidir. Karbon nanotüpler, metal oksitler ve grafen gibi nanomalzemeler CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> ve NO<sub>2</sub> gibi gazları tespit eden sensörlerde kullanılırken, altın nanopartiküller, grafen ve nanoteller genellikle biyolojik molekülleri ve patojenleri tespit eden sensörlerde kullanılmaktadır. Aynı şekilde nanomalzemeler ile esnek elektroniklerde, robotik ve insan-bilgisayar etkileşim arayüzlerinde kullanılan basınç-gerilim sensörleri de üretilmektedir (Toshima, 2017).

#### 4.5.Optoelektronik Aygıtlar

Günümüz ekran teknolojisinde kuantum noktaları büyük bir kullanım alanına sahiptir. Kuantum noktaları sayesinde üretilen QLED'ler diğer ekranlara oranla daha canlı ve daha parlak renklere sahiptir. Bunun dışında grafen oksit gibi nanomalzemeler OLED ekranlarda ve nano-LED teknolojisinde kullanılır. Nanomalzemeler sayesinde yeni nesil giyilebilir cihazlar, katlanabilir ekranlar ve akıllı tekstil ürünleri üretilebilmektedir. Bu alanların dışında da nanomalzemelerin elektronikte yer aldığı birçok uygulama mevcuttur. Nanomalzemelerin termal iletkenliklerinin yüksek olması onların Termal Arayüz Malzemeleri (TIM'ler) olarak kullanılmasına olanak sağlar (Lewis, 2021). Örneğin, TIM'ler CPU'lar, GPU'lar ve LED'ler gibi yüksek güçlü cihazlarda soğutmada kullanılır ve aşırı ısınmayı engelleyerek cihaz ömrünü ve performansını artırır. Grafen ve Karbon Bazlı Nanokompozitler hafif ve esnek oldukları için EMI kalkanlama uygulamalarında kullanılır (Li et al., 2006).

#### 5.GELECEKTEKİ TRENDLER VE ARAŞTIRMA YÖNLERİ

Nanomalzemeler, geniş bir uygulama alanına sahip olup elektronik, enerji, biyomedikal, çevre, tekstil ve savunma sanayi gibi pek çok sektörde kullanılmaktadır. Elektronik alanında, özellikle nanoelektronik cihazlar ve yarı iletken teknolojilerinde, daha hızlı, daha küçük ve daha verimli cihazların geliştirilmesine olanak sağlarlar. Enerji alanında, güneş pilleri, bataryalar ve süper kapasitörlerde kullanılmaktadırlar. Ayrıca, savunma sanayinde hafif, dayanıklı ve gelişmiş özelliklere sahip malzemelerin üretilmesinde de kritik bir öneme sahiptirler. Bu bağlamda günümüzde yaygın olarak araştırılan ve gelişen bir konudur. Fakat üretim aşamasındaki kısıtlamalar, maliyetli olması ve üretim aşamalarının zaman alması gibi sebeplerden dolayı uygulaması zor bir alandır. Bu kapsamda son yıllarda nanomalzeme üretiminde maliyet azaltma, ölçeklendirme sıkıntılarını için çözüm teknikleri yaygın olarak araştırılmaktadır.

Nanomalzeme alanında gelecek vadeden çalışmalar ise;

- Daha yüksek kaliteli nanomalzemelerin keşfedilmesi,
- Nanomalzemelerin çevresel etkenlerden korunması amacı ile kaplama, kompozit malzemeler gibi tekniklerin kullanılması (bu konu özellikle fotovoltaiik piller ve sensörler için önemlidir),
- Nanomalzeme üretimini basitleştirmek veya şuanda mevcut olan sistemlere entegre etmek,

- Geri dönüşüm, ucuz hammadde kullanımı gibi çözümler ile nanomalzeme üretim maliyetlerinin düşürecek yaklaşımların geliştirilmesi,
- Nanomalzeme üretiminde kaliteyi artırmak ve optimize etmek amacıyla makine öğrenmesi ve derin öğrenme gibi yöntemlerin kullanılması,
- İnsan sağlığına zararı azaltmak adına biyolojik nanomalzemelerin geliştirilmesi,
- Yapay zekanın nanomalzeme özelliklerini tahmin etmede ve sentez aşamalarında kullanılması şeklinde verilebilir.

Özetle, Nanomalzemelerin geleceği, yeni malzemeler yaratmaktan (yapay dokularda dahil) ultra hızlı bilgi işlem çipleri tasarlamaya kadar geniş bir potansiyele sahiptir. Alandaki çalışmalar devam ettikçe nanomalzeme teknolojisi muazzam boyutlara varacak ve önemi her geçen gün artacaktır.

## 6. SONUÇ

Nanomalzemeler, elektronik alanının makro boyuttan nano boyuta geçmesini sağlayıp teknolojik açıdan birçok uygulamanın önünü açmıştır. Daha küçük, daha hızlı, daha verimli ve esnek cihazlara olanak sağlayan, nanomalzemeler modern elektroniğin temelini oluşturmaktadır. Nanoteknolojiye olan ihtiyaç göz önünde bulundurulduğunda ileriki yıllarda nanomalzemelerin kullanımının artacağı ve bunun yanı sıra farklı nanomalzemelerin de ortaya çıkacağı tahmin edilmektedir.

**KAYNAKÇA**

Ahir, S. V., Huang, Y. Y., & Terentjev, E. M. (2008). Polymers with aligned carbon nanotubes: Active composite materials. *Polymer*, 49(18), 3841–3854. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.05.005>

Allen, J. M., Vincent, T. C., & Richard, K. B. (2010). Honeycomb carbon : A Review of Graphene What is graphene ? *Chemical Reviews*, 110, 132–145.

Baig, N., Kammakakam, I., Falath, W., & Kammakakam, I. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, 2(6), 1821–1871. <https://doi.org/10.1039/d0ma00807a>

Creazilla. İki duvarlı karbon nanotüp mikroyapısı (2018). Şuradan alındı (<https://creazilla.com/media/3d-model/7866424/multiwalled-vertical-carbon-nanotubes>)

Firkin .(2017). Nanoboyuttaki Grafenin moleküler yapısı. Şuradan alındı <https://openclipart.org/detail/288562/graphene-pattern-1>

Franklin, A. D. (2015). Nanomaterials in transistors: From high-performance to thin-film applications. *Science*, 349(6249). <https://doi.org/10.1126/science.aab2750>

Freestone, I., Meeks, N., Sax, M., & Higgitt, C. (2007). A Roman Nanotechnology. *Gold Bulletin*, 40(4), 270–277.

Gajanan, K., & Tijare, S. N. (2018). Applications of nanomaterials. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1093–1096. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.187>

Gest, H. (2004). The discovery of microorganisms by Robert Hooke and Antoni van Leeuwenhoek, fellows of the Royal Society. *Notes and Records of the Royal Society*, 58(2), 187–201. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2004.0055>

Hare, P., Leach, S., Vervloet, M., Desprks, A., Brcheret, E., Dennis, T. J., Kroto, H. W., Taylor, R., & Walton, D. R. M. (1992). Electronic Spectra and Transitions of the Fullerene C60. *Chemical Physics*, 160, 451–466.

Heiligttag, F. J., & Niederberger, M. (2013). The fascinating world of nanoparticle research. *Materials Today*, 16(7–8), 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.07.004>

Hossein Hosseini, S., Dabiri, M., & Ashrafi, M. (2006). Chemical and

electrochemical synthesis of conducting graft copolymer of acrylonitrile with aniline. *Polym Int*, 55(May 2006), 961–969. <https://doi.org/10.1002/pi>

Huo, S., Guo, Y., Yang, Q., Wang, H., & Song, P. (2024). Two-dimensional nanomaterials for flame-retardant polymer composites: a mini review. *Advanced Nanocomposites*, 1(1), 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.adna.2024.07.001>

Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9(1), 1050–1074. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>

KSC2331 transistors in TO-92L case. Transistör resmi. (2023). Şuradan alındı [https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:KSC2331\\_transistors\\_in\\_TO-92L\\_01.jpg](https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:KSC2331_transistors_in_TO-92L_01.jpg)

Lewis, J. S., Perrier, T., Barani, Z., Kargar, F., & Balandin, A. A. (2021). Thermal interface materials with graphene fillers: review of the state of the art and outlook for future applications. *Nanotechnology*, 32(14), 142003.

Li, N., Huang, Y., Du, F., He, X., Lin, X., Gao, H., Park, U. V., & Pennsylv, V. (2006). <Nano Letters Volume 6 issue 6 2006 [doi 10.102.pdf>. *Nano Lett*, 6(6), 1–5.

Mazari, S. A., Ali, E., Abro, R., Khan, F. S. A., Ahmed, I., Ahmed, M., Nizamuddin, S., Siddiqui, T. H., Hossain, N., Mubarak, N. M., & Shah, A. (2021). Nanomaterials: Applications, waste-handling, environmental toxicities, and future challenges - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105028. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105028>

Nabil, M., & Megahed, F. (2023). Quantum Dot Nanomaterials: Preparation, Characterization, Advanced Bio-Imaging and Therapeutic Applications. *Journal of Fluorescence*. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03472-0>

Pixabay. (2020). Futbol topu fulleren geometrisi gösterimi. Şuradan alındı (<https://www.needpix.com/photo/893611/football-fullerene-geometry-abstract-construction-regularly-graphic-pattern-blue>)

Salem, S. S., Hammad, E. N., Mohamed, A. A., & El-Dougdoug, W. (2023). A Comprehensive Review of Nanomaterials: Types, Synthesis, Characterization, and Applications. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(1). <https://doi.org/10.33263/BRIAC131.041>

Schiavo, L., Cammarano, A., Carotenuto, G., Longo, A., Palomba, M., & Nicolais, L. (2024). An overview of the advanced nanomaterials science. *Inorganica Chimica Acta*, 559(June 2023), 121802. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2023.121802>

Sloma, M., Glod, M. A., & Walpuski, B. (2021). Printed Flexible Thermoelectric Nanocomposites Based on. *Materials*.

Street, R. A. (2009). Thin-film transistors. *Advanced Materials*, 21(20), 2007–2022. <https://doi.org/10.1002/adma.200803211>

Syedmoradi, L., Ahmadi, A., Norton, M. L., & Omidfar, K. (2019). A review on nanomaterial-based field effect transistor technology for biomarker detection. *Microchimica Acta*, 186(11). <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3850-6>

S-kei. Kimyasal buhar biriktirme yönteminin şematik gösterimi. (2008). Şuradan alındı (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ThermalCVD.PNG>)

Thompson, D. T. (2008). Michael Faraday's recognition of Ruby Gold: The birth of modern nanotechnology. *Gold Bulletin*, 40(4), 267–269. <https://doi.org/10.1007/BF03215598>

Toshima, N. (2017). Recent progress of organic and hybrid thermoelectric materials. *Synthetic Metals*, 225, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.12.017>

V-TOL Aerospace. (2023). Şuradan alındı <https://v-tol.com/halocell-arrives-at-v-tol-for-pegasus-i-test-program/>

Zabihi, O., Ahmadi, M., Nikafshar, S., Chandrakumar Preyeswary, K., & Naebe, M. (2018). A technical review on epoxy-clay nanocomposites: Structure, properties, and their applications in fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 135, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.066>

Zhao, Z., Teng, K., Li, N., Li, X., Xu, Z., Chen, L., Niu, J., Fu, H., Zhao, L., & Liu, Y. (2017). Mechanical, thermal and interfacial performances of carbon fiber reinforced composites flavored by carbon nanotube in matrix/interface. *Composite Structures*, 159, 761–772. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.022>

## BÖLÜM 4

### GÜRÜLTÜ VE İŞİTME KAYIPLARI, KORUNMA YÖNTEMLERİ

Doç. Dr. Mansur DOĞAN<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Kulak Burun Boğaz Anabilim Dalı, Sivas, Türkiye. ORCID ID: 0000-0002-3964-9363 mansurdogan@hotmail.com





## GİRİŞ

Gürültü hoş gitmeyen, istenmeyen ve rahatsız edici ses olarak tanımlanmaktadır. Ancak istenmeyen ve rahatsız edici terimi kişiden kişiye değişebileceği için gürültü için subjektif bir tanım olmaktadır. Gürültünün objektif tanımı belirli bir frekans ve şiddetteki ses dalgalarının, belirli bir süre boyunca devamlı veya aralıklı yayılmasıdır. İnsan kulağı 20-20.000 Hz arasındaki sesleri duyar. Bu sınırın altındaki seslere infrasonik, üstündeki seslere de ultrasonik sesler denir. Konuşma sesi aralığı da 500-2000 hz arasında değişir. Uluslararası standartlara göre, işitme sistemine zarar veren gürültü düzeyi 100-10.000 Mhz ve 85 dB düzeyidir. Gürültünün insan sağlığına çok sayıda fiziksel, biyolojik ve psikolojik olumsuz etkisi vardır. Tablo 1 de gürültünün etkileri görülmektedir. En belirgin olumsuz etkisi olan gürültüye bağlı ortaya çıkan işitme kayıplarıdır. Gürültü günümüzde erişkinlerde karşılaşılan en önemli işitme kaybı ve en yaygın meslek hastalığı nedenlerindedir. Sanayileşme ve kentleşmenin yoğun olarak yaşandığı pek çok ülkede insan sağlığını ve yaşam kalitesini giderek daha fazla etkileyen önemli bir çevre sorunu olma özelliğini taşıyan önemli sorunların başında gürültü gelir (Kenar ve ayçiçek 2015).

Gürültüye bağlı işitme kayıplarının en önemli özelliği dikkat edildiğinde aztlılabılır hatta ciddi tetbirlerle önlenabilir olmasıdır. Gürültüye bağlı sadece işitme kaybı değil aynı zaman da kulakta çınlama, denge bozuklukları gibi başka sıkıntılara da neden olmaktadır.

Gürültünün insan vücuduna zararlı etkileri gürültüye maruz kalma süresi, şiddeti ve sahip olduğu frekans ile doğrudan ilişkilidir. Gürültü zamansal değişime ve sahip olduğu frekans bandına göre ikiye ayrılır. Zamansal değişime göre gürültü tipleri beş grupta incelenmektedir. Kararlı gürültü; gürültü seviyesi tespit edilirken kayda değer bir değişkenliğin olmadığı gürültüdür. Kararsız gürültü; gürültü seviyesi tespit edilirken kayda değer bir değişkenliğin olduğu gürültüdür. Dalgalı gürültü; gürültü seviyesinde devamlı ve kayda değer değişikliğin olmasıdır. Kesikli gürültü; gürültü seviyesinde ani düşüşlerin olduğu gürültü tipidir. Darbe gürültüleri; süreleri 1 saniyeyi geçmeyen vuruş gürültüleridir. Odun kıran bir marangoz örnek verilebilir. Frekans bandına göre gürültü tipleri dar ve geniş bant gürültü olarak karşımıza çıkmaktadır. Dar bant gürültü dediğimiz de belli frekans aralığında sesler oluşturmaktadır. Tıpkı elektrikli bir testerenin gürültüsüdür. Geniş bant gürültü de ise bilinen adı ile Beyaz gürültü de bütün frekanslar aralıklarını kapsayan gürültü tipidir. Günümüz teknolojisinde bebekleri uyutmak için düzenlemiş oyuncularda

karşımıza çıkmaktadır (Aydoğan, 2023). Ayrıca gürültünün zararlı etkileri açısından ses şiddetine göre 5 derecede inelenmiştir. Tablo 2 de yer alan farklı bir sınıflamayı ve vücuda zararlarını görmekteyiz (Serin ve ark, 2013).

**Tablo 1.** Gürültünün etkileri (Serin ve ark, 2013)

Fiziksel etkiler	İşitme hasarı
Fizyolojik etkiler	Vücuttaki bozukluklar Kalp atışındaki bozukluklar Metabolik bozukluklar Uyku bozukluğu İşitme kaybı
Psikolojik etkiler	Sinir sistemi dejenerasyonu Aşırı tepkiler Tedirginlik
Performans etkileri	Dinlenme ve iletişim güçlüğü Konsantrasyon bozukluğu Eylem etkisi Çalışma performansında düşme

**Tablo 2.** Gürültülerin sınıflandırılması (Serin ve ark, 2013)

30-65dBA	<b>I. Derecedeki Gürültüler</b> Konforsuzluk Rahatsızlık Sıkılma duygusu Kızgınlık Konsantrasyon ve Uyku Bozukluğu
65 - 90 dBA	<b>II. Derecedeki Gürültüler Fizyolojik gürültü</b> Kalp atışının değişimi Solunum hızlanması Beyindeki basıncın azalması
90- 120 dBA	<b>III. Derecedeki Gürültüler</b> Fizyolojik gürültü Baş ağrısı
120-140 dBA	<b>IV. Derecedeki Gürültüler</b> İç kulakta bozukluk
140 > dBA	<b>V. Derecedeki Gürültüler</b> Kulak zarının patlaması

Gürültü ölçümü için kullanılan en yaygın yöntem sound pressure level meter'dir (SPLM). Kullanımı oldukça basit mikrofonlu bir cihazdır. Sahip olduğu mikrofon diyaframı ses basıncını ölçer (Aydoğan, 2023). Günümüzde taşınabilir dijital müzik çalarlar, mobil telefonlar ve kulaklık genç nüfus tarafından fazlaca ilgi görmektedir. Bu nedenle, erken yaşlardan itibaren yüksek ses seviyesine maruz kalma oranında artış izlenmektedir. Bu elektronik aletlerin getirdiği kalıcı işitme kaybı riski üzerine yayıncılar giderek çoğalmakla birlikte halen önlem ve bilgilendirme konusunda eksiklikler devam etmektedir.

Gürültü kaynaklı işitme kaybının bir diğer kaynağı da eğlence amaçlı kulaklıkla yapılan dinlemedir. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) 2015 yılı verilerine göre bir milyardan fazla gencin yüksek sesle ve uzun süre müzik dinleme alışkanlıkları nedeniyle işitme kaybı geliştirme riski altında olduğunu tahmin etmiştir. Eğlence mekanları eğlence amaçlı işitme kaybı riskine katkıda bulunmakta olup, son yirmi yılda sosyal ortamlarda yüksek sese maruz kalanların sayısında üç kat artış olduğu görülmüştür. Akıllı telefonlar ve MP3 çalarlar gibi taşınabilir müzik cihazlarının yaygınlaşması bu riski artırmıştır. Akıllı telefon kullanımı tüm dünyada hızla artış göstermektedir. Kulaklıkla dinleme yapanların %5-10'unun, ses seviyesi ve dinleme süresine ilişkin kişisel tercihleri nedeniyle gelecekte işitme kaybı geliştirme olasılığının yüksek olduğunu belirtilmektedir.

Engellenebilir işitme kayıpları arasında ilk sıralarda kulak infeksiyonları, ototoksik ilaç kullanımı ve gürültüye bağlı işitme kayıpları yer almaktadır. Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre günlük hayatta pek çok bireyin 75 dB(A) SPL seviyesinin üzerinde gürültüye maruz kaldığı gösterilmiştir.

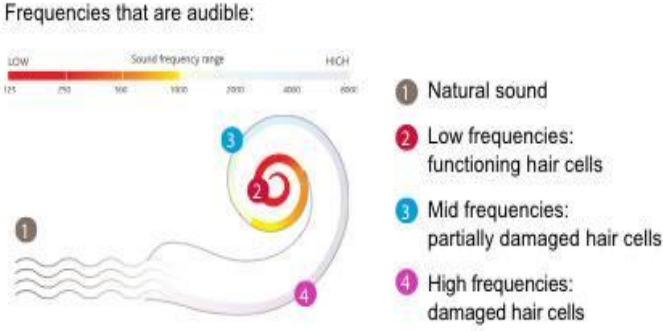
Dünya Sağlık Örgütü'nün 2012 yılı verilerine göre, dünya nüfusunun % 5,3'ünde, yani yaklaşık 360 milyon insanda işitme kaybı vardır. Bu rakamlar her geçen yıl daha da artış göstermektedir. Sayının 2030 yılında 630, 2050 yılında 900 milyona ulaşacağı öngörülmektedir. İşitme kayıplı olguların yüzde ellisinde gürültüye maruziyet yer almaktadır (Islam ve ark., 2011).

**Tablo 3.** Farklı gürültü kaynakları ve işitsel etkileri (Kenar ve Ayçiçek, 2015)

dB	Kaynak	Etki
0		
10	Normal nefes alma	Zorlukla işitilebilir
30	Fısıltı	Zorlukla işitilebilir
40-70	Normal konuşma	
80-85	Şehir trafiği, elektrikli süpürge	İşitsel hasar açısından gürültü sınırı
95-110	Motosiklet,havalı delici vb alet	Çok rahatsızlık verici
100	İpod maksimum seviyesi	Çok rahatsızlık verici
110-130	Rock konseri, spor karşılaşması	Zarar verici
140	Jet motoru	
170-195	Uzay roketi	Zar perforasyonu

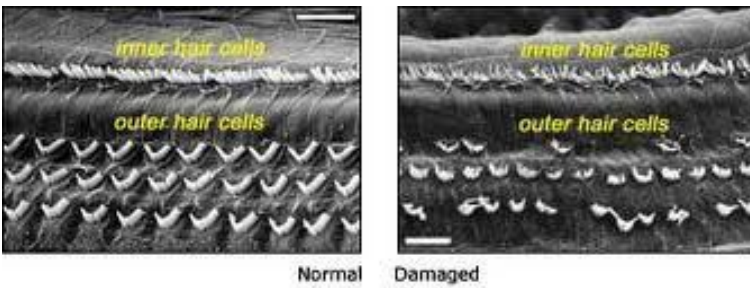
Gürültüye bağlı işitme kayıpları (GBİK) ilk etapta geçici olmaktadır. Gürültüye maruz kalınan sürenin 10 katı kadar bir istirahat süresi işitmeyi rehabilite edebilir. GBİK'ı geçici eşik değişikliği, kalıcı eşik değişikliği, akustik travma olmak üzere üç ana başlıkta toplamaktadır.

Geçici eşik değişikliği, gürültüye maruz kaldıktan belirli bir süre sonra işitme seviyesinde azalma olmasıdır. Ancak bu eşik değişikliği gürültü maruziyetinden önceki seviyeye geri dönerse bu tanım kullanılır. 40 dB aşan işitme eşikleri geçici kabul edilmemektedir. İşitme eşiklerinde belirgin düzelme görülmezse Kalıcı eşik değişikliği tanımı kullanılır. Kalıcı işitme kaybı en belirgin 4000 Hz'den sonra görülür. Neden en belirgin 4000 Hz etkilenir sorusunun cevabı ise kokleanın tonotopik özelliğinin etkisidir (şekil-1). Gürültünün şiddetli frekansının etkilediği vibrasyon kokleanın bazal kıvrımıdır. Tonotopik özelliğinden dolayı bazal kıvrım yüksek frekansları ilettiği için işitme kaybı 4000 Hz de belirgin olmaktadır. Şiddetli bir gürültüyü takiben ortaya çıkan yanında çınlama baş dönmesi gibi somatik bulguların eşlik ettiği işitme kaybına akustik travma denir. Tedavi edilmediği takdirde kalıcı işitme kaybı olabilir (Gün, 2022).



### Şekil-1 Kokleanın Tonotopik Özelliği

Gürültünün şiddeti, hangi frekans aralığında olması ve maruziyet süresi; işitme kaybının kalıcı ve geçici olması ve işitme kaybının tipi açısından çok önemli farklılıklar yaratmaktadır. Uzun süre maruz kalınan gürültüler genellikle sinirsel tip işitme kaybına sebep olurken, ani maruz kalınan yüksek şiddetteki sesler kulak zarında hasar meydana getirip iletim tipi işitme kaybını da beraberinde getirebilir. Ortaya çıkan sinirsel kayıplar korti organında meydana gelen hasar sonucu olmaktadır. Dış tüylü ve iç tüylü hücrelerde vezikülasyon ve dejenerasyon meydana gelmektedir. Bu hasarın elektron mikroskopik görüntüsü şekil-2 de görülmektedir (Girard ve ark, 2015).



Şekil-2. Tüylü hücrelerin normal ve hasarlı elektron mikroskopik görüntüsü(<https://www.hearinghealthcarecenters.com/hearing-loss-articles/inner-ear-disorders-hearing-loss>)

Gürültüye maruz kalan kişilerde; genetik yatkınlık, Rh pozitif kan grubu, diyabet, kalp damar hastalıkları, kolesterol yüksekliği, demir ve A vitamini eksikliği, kulağa yan etkisi olan ilaç kullanımı, ileri yaş ve sigara kullanımı

öyküsü varsa işitme kaybı oluşma riski yükselmektedir. Bazı meslek grupları da örneğin maden, tekstil, ahşap, cam, metal, havaalanı çalışanı, ormancı, trafik polisi, bakırcı çalışanları da işitme kaybı açısından riskli grupta yer almaktadır. Gürültüye maruz kalan kişilerde en önemli dikkat edilmesi gereken konu meydana gelen işitme kaybıdır. Amacımız oluşan işitme kaybının rehabilite edilmesi ve hastada kalıcı hasar oluşmamasıdır (Avan, 2022).

2017 WHO Avrupa verilerine göre işyerinde gürültüye maruz kalma, işyeri yaralanmalarının ardından işyerinde en yaygın ikinci risk faktörü olduğu görülmektedir. Gürültüye maruz kalma, işyeriyle ilgili sağlık sorunlarının %22'sine neden olur. Birçok çalışma, mesleki gürültüye maruz kalmanın doğrudan işitme kaybına yol açtığını göstermektedir. Bu işitme kayıpları da önlenilebilir bir durum olması nedeniyle üzerinde durulup çözümlenmesi insan sağlığını ve ülke ekonomilerini ciddi oranda rahatlatacaktır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarla ülkemizde mesleki gürültü nedeniyle işitme kaybı olanların sayısının 200.000'i aştığı belirtilmektedir. Tüm dünya nüfusunun %10'unda işitme kaybı şikayeti olduğu ve bu olguların yaklaşık %50'sinde işitme kaybının sebebinin yoğun gürültü maruziyetten kaynaklandığı belirtilmektedir (WHO, 2018).

Gürültülü ortamda çalışan bireylerin ne kadar etkilendiğini ya da akut meydana gelmiş bir hasarın tanısı için bir Kulak Burun Boğaz Hekimi olarak öncelikle ayrıntılı anamnez alınması, kulak zarı ve orta kulağın muayenesi ardından odyogram ve özellikle dış tüylü hasarı için gerekli olan “Transient Evoked” otoakustik emisyon (OAE) ve “Distortion Product” OAE testleri istenerek başlanır. İç kulakta meydana gelen hasarı ve sonrasında iyileşmenin takibi için bu testler kullanılır (Müderriş ve ark., 2014). Odyogram da en önemli işitme hasarı 4000 Hz'den sonra meydana gelen düşüştür. Bazı yazarlar akustik çentik olarak ifade etmektedir. Gürültülü ortamdan uzak kaldıktan sonra tekrar odyogram yapıldığında eşiklerin değişmesi beklenir. 48 saatlik bir istirahat en ideal süre olarak kabul edilir. Gürültünün etkilerinin konuşma frekanslarında geç ortaya çıkması tanıda gecikmeye sebebiyet vermektedir. Birçok hastada da kalıcı çınlama meydana gelmektedir. Hayatımızı bu denli etkileyen halk sağlığı problemi olması nedeniyle gürültü hassasiyetini belirleyen dünya çapında geçerli bir ölçek bulunmaktadır. Weinstein gürültü hassasiyet ölçeği (WGHÖ) 2015 yılında Türkçeye çevrilmiştir. 21 soruluk ölçekte 1-6 arasında puanlama ile yapılabilmektedir. En yaygın kullanılan ölçektir. Bu ölçek bir işitme testi olmadığından bireylerin işitme seviyeleri hakkında bilgi vermemektedir. Özellikle işitme kaybı olmaksızın gürültüye hassasiyeti olan bireyler hakkında

bilgi edinmeye olanak sunmaktadır. Gürültü hassasiyeti olanlar için ortalama puan 67,9 ve gürültü hassasiyeti olmayanlar için ortalama puan 39,8'dir. Mümkün olan en yüksek gürültü hassasiyeti puanı 126'dır (Tanrıver, 2023).

WGHÖ gürültü hassasiyetini ölçmede kullanılan en yaygın ölçeklerdendir ve 21 sorudan oluşan bu ölçek likert tipinde olup Katılıyorum/Katılmıyorum yanıtı 1'den 6'ya kadar derecelendirilmiş olup ölçeği yanıtlayan kişiden okuduğu maddeye katılma veya katılmama derecesine göre kendine en yakın hissettiği numarayı işaretlemesi istenir. Verilen cevaplar toplanarak WGHÖ skoru elde edilir. Elde edilen yüksek puan, yüksek hassasiyet derecesini göstermektedir.

Koruyucu tedbirler hayati önem taşımaktadır; çünkü GBİK önlenebilir bir morbititedir ve özel bir tedavisi yoktur. Koruyucu tedbirler temel olarak 3 ana grupta ele alınmalıdır. Yönetimsel Kontroller, Mühendislik Kontroller, Kişisel koruyucu ekipman kullanımı olmak üzere ayırabiliriz. Mühendislik Kontroller dediğimizde ise iki kısımda ele alabiliriz. Birincisi gürültüyü kaynağında azaltmak, ikincisi gürültüyü ortamda azaltmak için yapılacak tedbirlerdir (İlgürel ve Sözen, 2008). Kritik öneme sahip ilk uygulanması gereken gürültünün kaynağında önlem almaktır. Yani iş yerlerindeki makine gürültüsünü ve seçilen teknik imalat malzelerinde ki düzenlemeleri içerir. Dökümhanelerde alınan mühendislik önlemleri tablo 4'te gürültünün kaynağında önlem alınmasına örnek olarak gösterilebilir. Yönetimsel kontroller açısından ülkemizde çalışanların gürültü ile ilgili risklerden ve zararlardan korunmalarına yönelik hazırlanmıştır. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nın yayınladığı yönetmeliklere ek Çevre ve Orman Bakanlığı'nın 2009-2020 Çevresel Gürültü Eylem Planı uygulanmaktadır. Avrupa Birliği mevzuatına uyumlu 4 Haziran 2010'da yürürlüğe giren Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliğini esas almaktadır. Eylem planının amacı; gürültü haritalarının çıkarılması, çevresel gürültünün oluşturduğu sorunların belirlenmesi takip ve izlemelerini içerir. Endüstriyel tesislerde çevresel gürültü sınır değerleri gündüz saatlerinde 60-70 dB(A), gece saatlerinde 50-60 dB(A) olması gerekmektedir. Metal işleme ve üretimi tesisleri, demir-çelik ve alüminyum jant üretimi yapan firmalar örnek verilebilir. Bu gibi tesislerde gürültü sınır değer kontrolünün yapılması ve izin belgelerinin alınması zorunlu tutulmuştur (Odabaşı ve ark.).

**Tablo 4.**Gürültü kaynakları ve koruyucu Mühendislik önlemleri (Odabaşı ve ark.)

Gürültü Kaynağı	Kontroller	Uygulama öncesi ve sonrası Gürültü seviyesi dB(A)
Kalıplama Makinesi Egzosu	Egzos borusunun uzatılarak uzaklaştırılması	107-----85
Hava ile çalışan taşlama cihazları	Elektrikli cihazların kullanımı	102-----84
Düşen parçaların darbe gürültüleri	Tahta veya kauçuk gibi darbe sönmüleyici astarlar kullanmak, düşme mesafesini azaltmak	110-----92
Metal çalışma masalarında çalışmak	Masa yüzeyinin tahta veya kauçuk gibi malzemelerle kaplanması	95-----83
Kumlama	Ağır kauçuk astarlar muhafaza	100-----80
Temizleme işlemleri	Torç kullanımı	110-----90
Kalıp bozma işlemleri	Kısmi kapalı muhafaza kauçuk tamponlar	102-----94
Daire testere	Kısmi kapalı muhafaza	92-----84
Kupol fırın üfleci 150 beygir motor	Duvar ve kapalı muhafaza altına alınarak izole etmek	102-----83

Mühendislik kontrollerinin ikincisi olan gürültünün ortamda önlenmesi de gürültünün kaynağını azaltmak kadar önemlidir. Gürültünün ortamda azaltılmasında da mühendislik bilgisi gerekmektedir. Daha teknolojik makinelerin kullanımının sağlanması hem gürültünün kaynağını azaltır hem ortamın gürültüsünü azaltır. Ayrıca ses absorbiyonu, yansıma önleyici panel ve örtüler ortam gürültüsünü anlamlı azaltmaktadır. Bu yöntemler pahalı olmakla birlikte ilk uygulanması gereken yöntemlerdir. Belçika'daki bir dökümhanede sürdürülen gürültü azaltma planı çerçevesinde 170 gürültü kaynağı incelenip gerekli tedbirler alındığında, genel gürültü seviyesi 50 dB(A)'dan 40 dB(A) değerine düşürülmüştür. Gürültünün içeride kalmasını sağlamak için dökümhaneye ilave hava üfleme yapılarak, küçük bir basınç farkı oluşturulmuştur. İçerideki toplam hava hacmi saatte 36 kez yenilenmektedir. Bu teknik elbetteki bütün yeni ve eski dökümhanelere uygulanabilir (Odabaşı ve ark.). Başka bir çalışmada demir döküm için kullanılan Rotary Fırınlarında sıvı yakıt-hava karışımı yerine gaz-oksijen kullanılmış ve %53'lük enerji tasarrufu elde edilmiş. Buradaki değişim aynı zamanda gürültü emisyonlarında



15-18 dB(A)'lık bir düşüş sağlayarak yapılan ölçümlerde 48 dB(A) değerine ulaşılmıştır (Integrated Pollution Prevention and Control, 2005).

17.yy'da yaşayan İtalyan Hekim Bernardino Ramazzini mısır değirmenci ve bakır işçilerinde işitme kaybını tanımladı ve gürültüye maruziyet devam ettiğiinde geri döndürülemez ve ilerleyici olduğunu fark etti. İşçi sınıfına kulak tıkacı kullanımını öneren tarihsel öneme sahip sanayi öncesi dönemi için çalışmaları öncü görünmektedir (Paladino ve ark., 2023).

İşyerlerindeki alınacak bu tarz önlemlerle gürültünün azaltılması, maruziyetin azaltılması ve buna bağlı işitme kayıplarının önüne geçilmesi olacaktır. Bunun için de işverenlerden başlayarak, iş yeri hekimlerinin, iş güvenliği uzmanlarının gürültü ile baş etmenin yollarını bulması ve çalışma saatlerini ona göre ayarlaması da oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca çalışanların da bilinçlenmesi ve bu konulan kurallara uyması gereklidir. Yerel yönetimlerin yaşam alanlarının gürültü haritalarını çıkarması ona göre yerleşim planlarını, yaşam ve eğlence mekanlarını inşa etmesi, yolları buna göre konumlandırması gürültüye maruziyetin azalması için önemli bir adım olacaktır. Gürültü haritalanmasına örnek verilecek bir çalışmayı ele alacak olursak Morova ve ark., 2010 Süleyman Demirel üniversitesi yerleşkesindeki hazırladıkları gürültü haritasıdır. Süleyman Demirel Üniversitesi yerleşkesine ait dış mekânlarda gürültü haritası, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile hazırlanmıştır. Bu amaçla yerleşke içerisinde daha önceden koordinatları belirlenen 96 noktada maksimum (L<sub>max</sub>), minimum (L<sub>min</sub>) ve eşdeğer gürültü seviyeleri (L<sub>eq</sub>), ölçülerek ArcGIS 9.0 yazılımında IDW interpolasyon yöntemi kullanılarak her bir gürültü seviyesi için gürültü haritaları oluşturulmuştur. Hazırlanan bu haritalar Quickbird uydu görüntüsü ile örtüştürülerek Süleyman Demirel Üniversitesinin gürültüden etkilenen alanları belirlenmiştir. Yapı dışı gürültüleri, daha çok kent gürültüsü olarak ifade edilen, trafik, halka açık Pazar alanları, parklar gibi çevre kaynaklı gürültüleri kapsamaktadır. Gürültü Kontrol Yönetmeliği'nin 12. Maddesine göre karayolu trafiği gürültüsü için çeşitli gürültü düzeyi değerleri Tablo 5 de yer almaktadır.

**Tablo 5.** Yapı dışı kabul edilebilir gürültü düzeyi değerleri (Morova ve ark., 2010)

Bölge kodu	Bölge tanımı	Gürültü düzeyi (Leq dBA)
I. Bölge	Şehir dışı konut alanı	35-45
II. Bölge	Şehir kenarı konutları	40-50
	Şehir konut alanı (Trafik akımına 100 m uzakta)	45-55
	Şehir konut alanı, anayolları, işyerleri (Trafik akımına 60 m uzakta)	50-60
III. Bölge	Şehir merkezi konut alanı, anayolları, işyerleri (Trafik akımına 20 uzakta)	55-65
IV. Bölge	Endüstri bölgesi ve ağır vasıta ve otobüslerin geçtiği ana yollar)	60-70

GBİK önüne geçmenin en önemli basamaklarından biri de bu konuda farkındalık yaratmak olmalıdır (Zeren ve ark., 2018). Farkındalık yaratmak için sadece doktorların değil öğretmenlerin, sosyal medyanın ve toplumun ileri gelenlerinin öncülük ettiği bilgilendirmeler yapılması, gürültüye maruz kalan iş yerlerinin bilgilendirilmesi, koruyucu yeni ekipmanların yapılması uygun olacaktır. Bireysel alınabilecek önlemler en son başvurulması gereken önlemler olmalıdır. Bu önlemler arasında kulak pamuğu, parafinli pamuk, kulak tıkacı, kulaklık gibi koruyucular yer almaktadır. Koruyucu ekipman kullanımı çalışan kişilere gürültünün zararlı etkileri açısından yeterli eğitim verildiğinde böylelikle koruyucu önlemlere karşı daha duyarlı olduklarında etkili kullanım sağlanabilmektedir (Tanrıku ve ark., 2013). Kulak tıkaçları sadece fiziksel bir bariyer oluşturdukları için en fazla 20 dB etki yapar. Ancak yeni teknolojik gelişimlerle birlikte gürültü önleyici kulaklıklar 40 dB kadar gürültü azaltma etkileri vardır (Tablo-6). Ucuz olmadıkları için ve kullanımındaki zorluklar nedeniyle kulaklık yerine daha çok kulak tıkaçları tercih edilmektedir.

**Tablo 6.** Kulak koruyucularının gürültü engelleme değerleri (Kenar ve Ayçiçek, 2015)

Kulak koruyucularının cinsi	Gürültü engelleme değerleri
Pamuk	5-16 dB
Parafinli pamuk	20-35 dB
Cam pamuğu	7,5-32 dB
Kulak tıkacı	10-20 dB
Kulaklık	12-48 dB

Başka bir yazarın kişisel koruyucu ekipman sınıflamasını inceleyecek olursak 10 farklı sınıfta kulak koruyucusu bulunmaktadır. Standart tek kullanımlık kulak tıkaçları; 15-30 dB oranında koruyan polimer benzeri bir malzeme kullanılarak yapılan gürültü seviyesinin çok sık artmadığı iş yerlerinde daha çok tercih edilen tek kullanımlık tıkaçtır. Standart kulak tıkaçları; 25-35 dB oranında koruyan foam veya kaliteli plastik benzeri bir malzeme kullanılarak yapılan gürültü seviyesi yüksek işyerlerinde tercih edilen ekonomik bir tıkaçtır. Bireysel kulak tıkaçları; kullanacak olan kişinin kulak ölçüsüne göre yapılan silikon ya da biopor malzemesi içeren 20-35 db oranında koruyucu tıkaçtır. İki flanşlı kulak tıkaçları; gürültünün yanı sıra basınç etkisi de bulunan iş yerlerinde tercih edilen iki adet boğumu olan tıkaçtır. Üç flanşlı kulak tıkaçları; basınç etkisinin daha fazla olduğu durumlarda kullanılan tıkaçtır. Bireysel, kulak kanalını ve konkayı kapatan kulak koruyucuları; gürültü seviyesinin çok yüksek olduğu işyerlerinde tercih edilen, kullanacak kişinin kulak kalıbının özel alındığı, silikon ya da biopor kullanılarak hazırlanır. Filtreli bireysel kulak koruyucuları; 10-15 ve 25 dB olarak kullanılan filtrelerle, ortamdaki duruma göre filtre seçimi yapılabilen, gürültü seviyesini birbirine yakın seviyede azaltmak amaçlı kullanılan, kişisel ölçü alınarak hazırlanan koruyucudur. Dışarıdan bağlantı (Höparlör veya alıcı) yapılmaya uygun kulak koruyucuları; ortam gürültüsünün yüksek olduğu ancak dışarıdan gelecek uyarıları da duyması gereken işlerde görev yapan örneğin makine operatörleri gibi kullanıcılardan özel alınan ölçüyle hazırlanan silikon malzemesi kullanılan dış kısımlarına ayrıca hoparlör veya alıcı yerleştirilen koruyuculardır. Kulağı tamamen kapatan kulaklıklar (ear- muff); ortamdaki gürültü seviyesi kulak tıkaçları ile elde edilecek koruyucu seviyenin üzerindeyse kulağı dıştan tamamen kapatarak koruyan koruyuculardır. Aktif gürültü azaltıcı kulaklıklar; otomatik olarak ortamdaki grültü tipini algılayan ve filtreleri otomatik olarak çalıştıran sistemleri bulunan ekonomik olmayan koruyuculardır (Ataş).

Gürültü açısından riskli meslek gruplarında işe girişte başlangıç odyogram değeri hastanın belirlenmesi gerekir. Sonrasında 6 ayda bir işitme testi ile sağlık taraması yapılması gerekmektedir. Erken tanı ve tedavi açısından takipler önemlidir. İş yerlerindeki gürültünün azaltılması ve bireyin kendisinin kişisel tedbir alması gibi önlemler uygulanabilir. Anti alerjik, dış kulak yolunun hava alabileceği, herhangi bir enfeksiyona yol açmayan özel aparatların kullanılması da enfeksiyonların önüne geçilmesi açısından önemlidir (Göçer ve ark., 2003).

Bize göre ise en önemli ve önlenbilir sorunlardan biri de gençlerin kulaklık ile yüksek sese maruz kalmalarıdır. Bu konu da tüm birimlerin koordineli bir şekilde çalışması ve toplumun bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Uzaktan eğitim gören öğrencileri kapsayan bir çalışmada tercih edilen kulaklık tipinin azalmış ses toleransı ve işitsel semptomlarla ilişkisi bulunmazken, haftalık derse katılım süresi uzun olan bireylerin hiperakuzi, fonofobi puanlarının daha yüksek olduğu, yüksek ses şiddetinde derse katılım gösteren bireylerin hiperakuzi, mizofoni puanlarının daha yüksek olduğu, uzaysal algı becerilerinin daha düşük olduğu göstermişlerdir. Ders katılım gösterilen gürültülü dinleme ortamının hiperakuzi ve işitsel semptomlar üzerinde olumsuz etkisi olduğunu; tinnitus öyküsünün azalmış ses toleransı, konuşma algısı ile ilişkili olduğu ve tinnitusun çevresel seslere karşı toleransı azalttığı, konuşma algısını bozduğu sonucuna varmışlardır (Alluşoğlu ve ark.). Bu tarz çalışmaların farkındalığı artırmak açısından katkı sağladığını düşünmekteyiz.

Sonuç olarak gürültüye bağlı ortaya çıkan kulak semptomları toplumsal bilinçlendirme ile ciddi oranda azaltılabilecek bir durumdur.

## KAYNAKÇA

Alluşoğlu, S., Aydın, E. A. Ö., Tuz, D., & Uzun, E. D. Uzaktan Eğitim Gören Üniversite Öğrencilerinde Farklı Kulaklık Tiplerinin ve Farklı Dinleme Koşullarının Azalmış Ses Toleransı ve İşitme Fonksiyonları Üzerine Etkisi. Hacettepe University Faculty of Health Sciences Journal, 11(2), 448-465.

Ataş, A. KİŞİSEL KULAK KORUYUCULARI. Çalışma Yaşamında Gürültü ve İşitmenin Korunması, 83.

Avan, B. T. (2022). Koklear İmplant Kullanıcısı 18-50 Yaş Arası Bireylerin Gürültü Hassasiyet Düzeyleri ile Dikkat Eksikliği ve Hiperaktivite Bozukluğunun İncelenmesi (Master's thesis, Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü, Odyoloji Anabilim Dal

Aydoğan, T. N. (2023). Gürültü düzeyi sabit ortamlarda çalışan işçilerde son 3 yıllık işitme eşiği değişimlerinin retrospektif olarak değerlendirilmesi (Master's thesis, Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim ve Araştırma Enstitüsü).

Girard, S. A., Leroux, T., Courteau, M., Picard, M., Turcotte, F., & Richer, O. (2015). Occupational noise exposure and noise-induced hearing loss are associated with work-related injuries leading to admission to hospital. Injury prevention, 21(e1), e88-e92.

Göçer, C., Ayse, İ. R. İ. Z., Dağlı, M., Tastan, E., Boynueğri, S., Adnan, U. Z. U. N., & Eryılmaz, A. (2003). Cep Telefonu Kullanımının İşitme Üzerine Etkilerinin Yüksek Frekans Odyometri İle Araştırılması. Journal Of Ear Nose Throat And Head Neck Surgery, 11(3).

Gün, Ö. M. (2022). İşitme cihazı kullanan hastalarda cihaz memnuniyetinin APHAB anketi ile değerlendirilmesi (Master's thesis, İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).

Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, European Commission, May 2005.

İslam, M. A., İslam, M. S., Sattar, M. A., & Ali, M. I. (2011). Prevalence and pattern of hearing loss. Medicine Today, 23(1), 18-21.

İlgürel, N., & Sözen, M. Ş. (2008). Değişik Sanayi Kuruluşlarında Gürültünün Nesnel, Öznel Ve Yönetmelikler Bağlamında İncelenmesi. Megaron, 3(1).

Kenar, F.,Ayçiçe, A. (2015). Endüstriyel Odyoloji ve Gürültüye Bağlı İşitme Kayıpları. Türkiye Klinikleri, Kulak Burun Boğaz-Özel Konular, 8(2), 132-6.

Morova, N., Şener, E., Terzi, S., Beyhan, M., & Harman, B. (2010). Süleyman Demirel Üniversitesi yerleşkesinin gürültü haritalarının coğrafi bilgi sistemleri ile hazırlanması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(3), 271-278.

Müderriş S, Altuntaş EE. Travmatik İşitme Kayıpları. Gerçekler M, editör. Kulak Burun Boğaz Hastalıkları Baş ve Boyun Cerrahisi. 1. Baskı. Ankara: Akademisyen Kitabevi; 2014. p.315-32.

Odabaşı, A., Turan, A., Ünlü, N., & Niyazi, M. Dökümhanelerde Gürültü Kontrolü.

Paladino ME, Belingheri M, Mazzagatti R, Riva MA. Noise-induced hearing loss in the pre-industrial era: early contributions in De Morbis Artificum by Bernardino Ramazzini (1633-1714). J Laryngol Otol. 2024 Jan;138(1):7-9. doi: 10.1017/S0022215123001457. Epub 2023 Aug 30. PMID: 37646190; PMCID: PMC10772019.

Serin, H., Şahin, Y., & Durgun, M. (2013). Küçük Ölçekli Mobilya İşletmelerinde Gürültü Analizi. Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi, 9(2), 1-8.

Tanrıver, E. (2023). Çiftçilerde İşitme Kaybı ve Gürültü Hassasiyeti İncelenmesi (Master's Thesis, Kapadokya Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim, Öğretim Ve Araştırma Enstitüsü

Tanrikulu, N., Özgül, A. Ş., Aydın, E., Özlüoğlu, L., & Tekindal, M. A. (2013). Üniversite Öğrencilerinin Kulaklıkla Müzik Dinleme Alışkanlıklarının İşitme Eşikleri Üzerine Etkisi: Başkent Üniversitesi Örneği. Journal Of Ear Nose Throat And Head Neck Surgery, 21(3).

World Health Organization. (2018). Addressing The Rising Prevalence Of Hearing Loss.

Zeren, S., Bolulu, A., Köse, B., Ocağ, S., Topal, A., Kurt, E., Barut, A. Y. (2018). Üniversite Öğrencileri Ve Çağrı Merkezi Çalışanlarının İşitme Sağlığı Bilgisi Ve İşitme Kaybı Farkındalığı. Istanbul Gelisim University Journal Of Health Sciences, (6), 573-584.

## **BÖLÜM 5**

### **ENERJİK MATERYALLERDE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ**

Dr. Yılmaz MERT<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, KOSGEB Sivas, Türkiye. yilmaz.mert@sivas.edu.tr  
Orcid ID: 0000-0003-3843-9177





## 1. GİRİŞ

Enerjik malzemeler, kimyasal bir işlem sırasında, genellikle yanma veya patlama yoluyla hızla enerji açığa çıkaran maddeler veya karışımlardır. Patlayıcılar, itici gazlar ve piroteknikler de dahil olmak üzere, kısa bir süre içinde önemli miktarda enerji salınımı gerektiren durumlarda sıklıkla kullanılırlar. Bu malzemeler, nesnelere (roketler, mühimmatlar vb.) itebilecek veya patlayıcı etkileri (yıkım işleri vb.) tetikleyebilecek önemli miktarlarda gaz, ısı veya her ikisini birden üretecek şekilde tasarlanmıştır (Osmont ve Lefrancois, 2022). Enerjik malzemelerin üç ana kategorisi vardır:

**a-) Patlayıcılar:** Hızlı ayrışmaya uğrayan ve enerjiyi hızla serbest bırakarak şok dalgası oluşturup patlama etkisi yaratan bileşiklerdir. Örnekler; TNT (Trinitrotoluen) ( $C_7H_5N_3O_6$ ), RDX (siklotrimetilen-trinitramin) ( $C_3H_6N_6O_6$ ), Nitrogliserin ( $C_3H_5N_3O_9$ ). Patlayıcılar ısı, şok veya sürtünme gibi uyaranlara duyarlılıklarına göre birincil (örn. kurşun azid), ikincil (örn. RDX, TNT) ve üçüncül patlayıcılar (örn. ANFO (Amonyum Nitrat-Fuel Oil)) olarak sınıflandırılabilirler. Aşağıda şekil 1’de bazı patlayıcılara ait iki ve üç boyutlu kimyasal yapılar gösterilmektedir.

**b-) İtici gazlar:** Roketler, mühimmatlar ve silahlar da dahil olmak üzere itici sistemler için tasarlanmış, itme gücü üretmek için çok büyük hacimlerde gaz açığa çıkaran maddelerdir. Bu malzemeler patlayıcılara kıyasla daha yavaş bir yanma hızına sahiptir. Barut ve amonyum perklorat gibi oksitleyiciler içeren kompozitler bu sınıfa örnek olarak verilebilir.

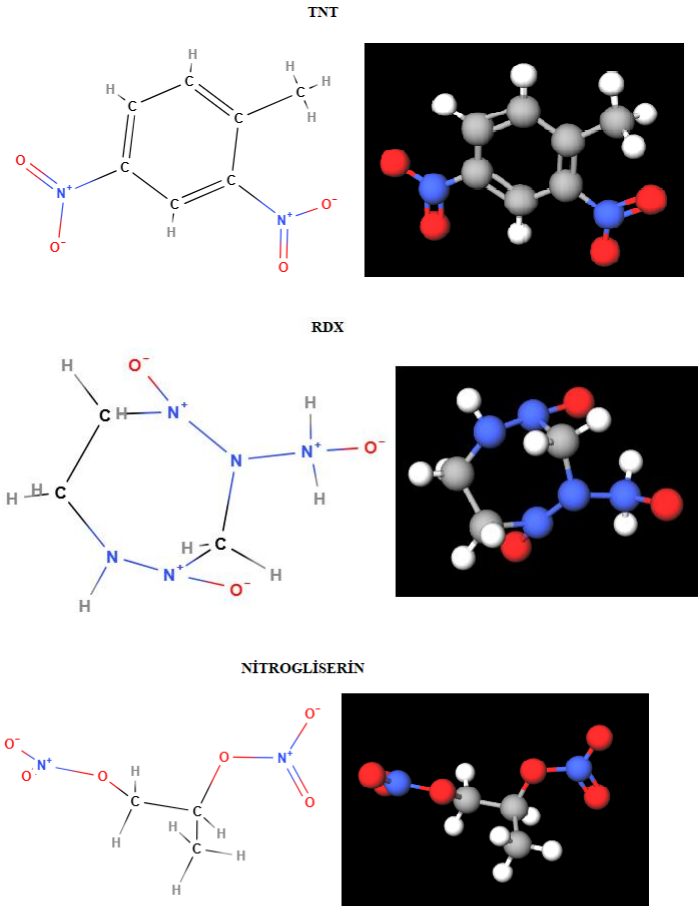
**c-) Piroteknikler:** Yıkıcı güçten ziyade görsel ve termal etkiler için kullanılırlar. Havai fişekleri, işaret fişekleri ve askeri aydınlatma aparatları önemli örneklerdir (Akhavan, 2004; Meyer ve diğerleri, 2002).

Enerjik malzemeler ayrıca kimyasal bileşimlerine göre de kategorize edilebilir ve tipik olarak iki ana kategoriye ayrılır: organik ve inorganik enerjetik bileşikler.

*Organik Enerjetik Bileşikler:* Bu malzemeler genellikle karbon, hidrojen, nitrojen ve oksijen atomları içerir. Nitro bazlı bileşikler ve nitrat esterleri en yaygın organik enerjik malzemeler arasındadır. TNT ve RDX gibi nitro bileşikleri ve nitrogliserin gibi nitrat esterleri, hızlı ayrışma ve gaz ürünlerinin salınımından kaynaklanan yüksek enerji verimleri nedeniyle enerjik malzemeler içerisinde önemli bir yer tutarlar. Bu bileşikler, patlayıcı güçleri ve

enerjiyi hızlı bir şekilde serbest bırakma yetenekleri nedeniyle askeri ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

*İnorganik Enerjik Bileşikler:* İnorganik enerjik bileşikler öncelikle oksitleyici olarak işlev görür ve tipik olarak kompozit itici gazların ve piroteknik bileşimlerin yapısına dahil edilir. Örneğin amonyum perklorat katı roket iticilerinde önemli bir oksitleyicidir ve uzay gibi oksijen eksikliği olan ortamlarda yakıt bileşenlerinin yanmasını sürdürmek için gerekli oksijeni sağlar. Diğer örnekler, ANFO'da kullanılan amonyum nitrat ve barut formülasyonlarında yaygın olarak kullanılan potasyum nitrattır (Agrawal ve Hodgson, 2006; Conkling ve Mocella, 2019).



**Şekil 1.** TNT, RDX ve Nitroglicerine ait iki ve üç boyutlu kimyasal yapılar

**Kaynak.** <https://molview.org/>

Enerjik malzemeler savunma dışında başta endüstri olmak üzere pek çok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Patlayıcı ve itici gazlar askeri uygulamalarda silah sistemleri, mühimmat, yıkım ve tahrik sistemleri için gereklidir. Kontrollü ve yüksek enerjili reaksiyonlar oluşturma yeteneği, silahların ve koruyucu önlemlerin etkili bir şekilde oluşturulmasını sağlamaktadır. Uzay ve havacılıkta özellikle katı ve sıvı roket motorlarında kullanılan itici gazlar çok önemlidir. Araçları uzaya fırlatmak için gerekli itme gücünü sağlayarak uzay araştırmalarını ve uydu konuşlandırılmasını mümkün kılarlar. Madencilikte kontrollü patlamalar, kaya kırma ve mineral çıkarma işlemlerini kolaylaştırır. Madencilik ve inşaat endüstrisinde enerjik malzemeler, en az el emeği gerektirerek, enkazın ve kazıların etkili bir şekilde temizlenmesini sağlarlar. Enerjik malzemeler sivil kullanımlarda havai fişek ve pirotekniklere ek olarak, kurtarma operasyonlarında beton veya metal bariyerlerden acil çıkışlar oluşturmak veya araçlardaki hava yastığı açma sistemleri gibi çok çeşitli görevler için kullanılırlar.

Enerjik malzemeler yukarıda bahsedilen tüm bu geniş kullanım alanlarında, doğalarında bulunan riskler nedeniyle çok dikkatli çalışılmayı gerektirmektedirler. Enerjik malzemelerin karakteristik özelliklerinin anlaşılması, performanslarının optimize edilmesine yardımcı olur. Örneğin yanma hızı, enerji salınımı ve çeşitli koşullar altındaki kararlılıkları ayrıntılı karakterizasyona dayalı olarak tasarlanabilmektedir. Enerjik malzemeler yapıları gereği hassas ve potansiyel olarak çok tehlikelidir. Enerjik malzemelerde karakterizasyon; güvenli taşıma, depolama ve kullanım için kritik olan termal stabilite, şok, sürtünme ve elektrostatik deşarja duyarlılık gibi faktörleri içermektedir. Safsızlıkların tespit edilmesi veya faz değişikliklerinin belirlenmesi önemli kazaları önleyebilmektedir. Üretim sırasında karakterizasyon enerjik malzemelerde tutarlılık ve kalite sağlar. Bileşim, parçacık boyutu veya morfolojideki küçük farklılıklar performans ve güvenlikte büyük farklılıklara yol açabilmektedir. Karakterizasyon verileri, enerjik malzemelerin farklı koşullar altındaki davranışlarını tahmin eden modeller geliştirmek için temel oluşturur. Böylece sanal test ve optimizasyona olanak tanıyarak maliyetli ve potansiyel olarak tehlikeli canlı test ihtiyacı azaltılmış olmaktadır. Ayrıntılı karakterizasyon yanma veya patlamanın yan ürünleri gibi çevresel etkilerin değerlendirilmesine yardımcı olur. Bunlar mevzuata uygunluk ve çevre dostu enerjik malzemeler geliştirmek için kritik öneme sahiptir. Ar-Ge çalışmalarında karakterizasyon, gelişmiş performans ve güvenlik profillerine sahip yeni enerjik malzemeler geliştirmek için çok

önemlidir. Araştırmacıların moleküler veya yapısal düzeydeki değişikliklerin davranışı nasıl etkilediğini sistematik olarak anlamalarını sağlar. Tüm bu bahsedilenlerden de anlaşılacağı üzere enerjik malzemelerin etkili, güvenli ve yenilikçi kullanımı için gereken tüm bilgi karakterizasyon çalışmaları sonucu elde edilir. Bu bölüm genelinde enerjik materyallerde karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilecektir. Enerjik malzemeler için termokimyasal prensipler incelenecek ve deneysel karakterizasyon teknikleri hakkında bilgiler verilecektir. Bölüm sonunda ise enerjik materyallerin karakterizasyonunda önemli bir yer tutan performans testleri açıklanacaktır. Bu bölümde ayrıca enerjik malzemelerin karakterizasyonu konusunda yapılmış akademik araştırmalara ve literatür bilgilerine değinilecektir.

## 2. ENERJİK MALZEMELERDE TERMOKİMYASAL PRENSİPLER

Enerjik malzemelere ait termokimyasal ilkeler, enerji salım mekanizmalarını, kararlılıklarını ve uygulamalardaki genel performanslarını anlamak için çok önemlidir. Bu ilkeler temel termodinamik parametreleri kapsar ve bunlar toplu olarak enerjik reaksiyonların verimliliğini ve güvenliğini tanımlar.

### 2.1. Enerjik Malzemelerde Temel Termokimyasal Kavramlar

#### 2.1.1. Oluşum Isısı

Bir bileşiğin oluşum ısısı ( $\Delta H_f$ ) önemli bir termodinamik özelliktir ve standart koşullar altında (298,15 K ve 1 bar basınç) kendisini oluşturan elementlerden bir mol bileşik oluştuğunda absorbe edilen veya açığa çıkan enerji miktarını temsil eder. İtici gazlar ve patlayıcılar gibi enerjik malzemelerin kararlılığını ve reaktivitesini belirlemek için gereklidir. Genel olarak, ekzotermik bir reaksiyon için  $\Delta H_f$  negatiftir ve enerjinin serbest bırakıldığını gösterir. Endotermik bir reaksiyon için ise  $\Delta H_f$  pozitifdir ve enerjinin emildiğini gösterir. Enerjik malzemelerde oluşum ısısı, patlama veya infilak ısısının belirlenmesine yardımcı olur. Reaktanlar ve ürünler arasındaki oluşum ısısı farkı dikkate alınarak hesaplanır:

$$H_{exp} = \Delta H_{f,R} - \Delta H_{f,P}$$

burada  $\Delta H_{f,R}$  reaktanların,  $\Delta H_{f,P}$  ise ürünlerin oluşum ısısıdır.  $\Delta H_{f,R}$  için daha yüksek değerler ve  $\Delta H_{f,P}$  için daha düşük değerler, patlama ısısını artırarak enerjik malzemeyi daha güçlü hale getirir.

Hess Yasasını kullanarak RDX için patlama ısısını hesaplarken, oluşum ısısını ve ürünlerin ısısını dikkate alırız. RDX'in patlaması karbon monoksit (CO), su buharı (H<sub>2</sub>O) ve nitrojen gazı (N<sub>2</sub>) gibi gazlar üretir ve bunların hepsi önemli miktarda enerji açığa çıkmasına katkıda bulunur. RDX'in patlama entalpisi yaklaşık -1118 kJ/mol'dür. Sonuçta kimyasal formülü C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>N<sub>6</sub>O<sub>6</sub> olan RDX için oluşum ısısı: +62.0 kJ/mol olarak hesaplanır.

PETN (pentaeritritol tetranitrat) için patlama ürünleri CO, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O'yu içerir. Hesaplama, PETN'in kendisinden, ürünlerin oluşum ısısının çıkarılmasını içerir. Bu sonuç askeri ve yıkım gibi uygulamalarda kullanıldığında PETN'in patlayıcı gücünü yansıtan yaklaşık -1831 kJ/mol gibi yüksek bir patlama ısısı verir. Kimyasal formülü C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>N<sub>4</sub>O<sub>12</sub> olan PETN için oluşum ısısı -538 kJ/mol'dür.

Oluşum ısısı performans tahmini, güvenlik ve kararlılık ve çevresel hususlar açısından oldukça önemli veriler sağlamaktadır.

*-Performans Tahmini:* Yüksek oluşum ısısına sahip malzemeler birleştiğinde tipik olarak daha güçlü patlayıcılar ortaya çıkar. Örneğin, HMX (octogen) diğer patlayıcılardan daha yüksek bir oluşum ısısına sahiptir ve bu da güçlü patlama özelliklerine katkıda bulunur.

*-Güvenlik ve Kararlılık:* Çok yüksek pozitif oluşum ısısına sahip malzemeler daha az kararlı olabilir, bu da depolama ve taşıma zorluklarına yol açabilir.

*-Çevresel Hususlar:* Bazı modern enerjik malzemeler, oluşum ısıları manipüle edilerek daha az toksik ürünlere ayrışacak şekilde tasarlanmakta ve böylece çevresel etkileri azaltılmaktadır.

Oluşum ısısı, kuantum mekaniksel yöntemler kullanılarak hesaplanabilir ve daha sonra süblimleşme veya buharlaşma enerjileri dahil edilerek yoğunlaştırılmış faz (katı veya sıvı) için düzeltilir:

$$\Delta H_f(\text{Katı}) = \Delta H_f(\text{Gaz}) - \Delta H_{\text{süblimasyon}}$$

Bu yaklaşım, yeni veya deneysel bileşiklerin özelliklerini tahmin etmek için faydalıdır. Aşağıdaki tabloda bazı enerjik materyallerin oluşum ısıları verilmektedir.

**Tablo 1.** Bazı enerjik malzemelerin oluşum ısıları

Bileşik	Oluşum Isısı (kJ/kg)	Oluşum Isısı (kJ/mol)
RDX	+279	+62.0
HMX	+253	+75.0
TNT	-115	-224
PETN	-538	-1703
Nitrogliserin	-380	-1704

**Kaynak:** (Akhavan, 2004; Kubota, 2015)

Oluşum ısısı, enerjik malzemelerin enerji salınım özelliklerini anlamak için temeldir. Reaktanlarda  $\Delta H_f$  en üst düzeye çıkarılarak ve ürünlerde en aza indirilerek, kontrollü patlayıcı gücü, kararlılığı ve çevresel etkisi olan malzemeler tasarlanabilir ve çeşitli uygulamalarda kullanımları artırılabilir.

### 2.1.2. Patlama Isısı

Patlama ısısı, enerjik bir madde ayrıştığında açığa çıkan toplam enerjiyi tanımlar ve genellikle gram başına kilojoule (kJ/g) veya gram başına kilokalori (kcal/g) olarak ölçülür. Patlama ısısı moleküler yapıdan ve bağlar içinde depolanan enerjiden etkilenir. Bu parametrenin ölçülmesi, bir patlayıcının potansiyel yıkıcı gücü ve askeri ve sivil kullanım gibi belirli uygulamalar için uygunluğu hakkında bilgi sağlar. TNT, RDX ve HMX gibi patlayıcılar için bu parametre performanslarının kritik bir ölçüsüdür. TNT için patlama ısısı yaklaşık 4,1 MJ/kg veya 0,98 kcal/g'dır. RDX ve HMX'e kıyasla orta düzeyde enerji salınımına sahiptir ve genellikle patlayıcı enerjilerinin karşılaştırılması için bir referans olarak kullanılır. RDX patlama ısısı yaklaşık 5,8 MJ/kg veya 1,38 kcal/g'dır. TNT'den daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Askeri uygulamalarda ve yüksek performanslı patlayıcılarda kullanılır. HMX patlama ısısı yaklaşık 6,3 MJ/kg veya 1,50 kcal/g'dır. Nükleer olmayan en güçlü patlayıcılardan biridir ve çok yüksek patlama hızı ve ısı çıkışına sahiptir.

**Tablo 2.** Bazı enerjik malzemelerin patlama ısıları

Patlayıcı	Patlama Isısı (MJ/kg)	Patlama Isısı (kcal/g)
TNT	4.1	0.98
RDX	5.8	1.38
HMX	6.3	1.50

Kaynak: (Akhavan, 2004; Kubota, 2015)

Burada önemli kavramlardan bir tanesi de adyabatik alev sıcaklığıdır. Bu terim, patlayıcı bir reaksiyonun gaz halindeki ürünlerinin çevreye hiçbir ısı kaybı olmadığı takdirde ulaşabileceği maksimum sıcaklığı ifade etmektedir. Enerjik bir maddenin reaksiyonunun yoğunluğunu değerlendirmede kritik bir ölçüdür ve farklı bileşiklerin güç çıkışını karşılaştırmaya yardımcı olur. Daha yüksek adyabatik alev sıcaklıkları, roket iticileri gibi yüksek itme veya patlama enerjisi gerektiren uygulamalar için ideal olan daha güçlü reaksiyonları gösterir.

### 2.1.3. Entalpi ve Entropi

Entalpi ( $\Delta H$ ), sabit basınçta bir sistem içindeki ısı içeriğinin ölçüsüdür ve bir reaksiyon sırasında gerekli olan veya açığa çıkan enerjiyi gösterir. Yüksek ayrışma entalpisine sahip enerjik malzemeler yoğun enerji çıkışları üretebilir, bu da onları patlayıcılar ve itici gazlar için ideal hale getirir.

Bir sistemdeki düzensizliği veya rastgeleliği ölçen entropi ( $\Delta S$ ), bir patlamanın kendiliğindenliğini anlamada kritik öneme sahiptir. Pozitif entropi değişikliklerine sahip reaksiyonlar tipik olarak patlayıcılarda tercih edilir, çünkü yoğunlaşmış bir katı veya sıvı fazdan hızlı gaz oluşumu sistemin düzensizliğini önemli ölçüde artırarak patlayıcı etkiye katkıda bulunur.

Tablo 3'te bazı yaygın patlayıcılar için yaklaşık entalpi ve entropi değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.** Bazı enerjik malzemelerin entalpi ve entropi değerleri

Patlayıcı	Oluşum Entalpisi ( $\Delta H_f$ , kJ/mol)	Entropi ( $\Delta S$ , J/(mol·K))
TNT	~ -65	~ 310
RDX	~ 75	~ 300
HMX	~ 110	~ 330

Kaynak (Akhavan, 2004; Kubota, 2015; Meyer ve diğerleri, 2002)

Tablo incelendiğinde TNT için negatif entalpi, oluşum sırasında enerjinin açığa çıktığını gösterir. Orta derecede entropi, büyük miktarlarda gaz ürün açığa çıktığı için patlama sırasında düzensizlikteki artışı yansıtmaktadır. RDX gerilmiş moleküler yapı nedeniyle nispeten yüksek pozitif oluşum entalpisine sahiptir. Hızlı gaz üretimi nedeniyle patlama sırasında önemli entropi artışı vardır. HMX, karmaşık halka yapısı nedeniyle RDX'ten daha yüksek bir entalpi sergiler. Gaz halindeki patlama ürünlerine yoğun parçalanma nedeniyle yüksek entropiye sahiptir.

#### 2.1.4. Serbest Enerji

Gibbs serbest enerjisi ( $\Delta G$ ), enerjik malzemeler ve patlayıcılar da dahil olmak üzere reaksiyonların kendiliğindenliğini tahmin etmek için kullanılan termodinamik bir niceliktir. Patlayıcılar bağlamında  $\Delta G$ , patlama reaksiyonlarının fizibilitesini ve enerji salınımını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Gibbs serbest enerjisi ( $\Delta G$ ) aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

burada:  $\Delta H$  entalpideki değişimdir. T, Kelvin cinsinden sıcaklık,  $\Delta S$  ise entropideki değişimdir. Patlayıcılar için, negatif  $\Delta G$ , patlama reaksiyonunun verilen koşullar altında kendiliğinden olduğunu ve enerjiyi öncelikle ısı ve şok dalgaları olarak serbest bıraktığını gösterir. Gibbs serbest enerjisi sadece teorik bir ifade değil, aynı zamanda yeni patlayıcı malzemelerin sentezi ve karakterizasyonunda pratik etkileri olan bir kavramdır.



### 2.1.5. Oksijen Dengesi

Oksijen dengesi, tüm elementlerin en kararlı oksitlerine (örneğin CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) tam oksidasyonu için gerekli olana göre, enerjik bir malzemenin kimyasal yapısı içinde mevcut olan oksijen miktarını ifade eder. Oksijen dengesi, ayrışma reaksiyonunun tam veya kısmi oksidasyon ürünleri üretip üretmeyeceğini belirlemede çok önemli bir faktördür ve genel enerji verimini etkiler. Dengeli veya hafif pozitif oksijen dengesine sahip enerjik bir malzeme tam yanma sağlama eğilimindedir ve bu da maksimum enerji salınımına yol açar. Bunun aksine, negatif oksijen dengesi kısmen oksitlenmiş ürünlerin (örneğin CO<sub>2</sub> yerine CO) oluşmasına neden olabilir, bu da enerji çıkışını azaltır, ancak düşük oksijenli ortamlar (örneğin deniz altı veya uzay) gibi belirli kontrollü uygulamalarda yine de yararlı olabilir.

Oksijen dengesi (OB) patlayıcılar, itici gazlar ve piroteknikler gibi enerjik malzemelerin kimyasında kritik bir parametredir. Bir bileşiğin ilave oksijene ihtiyaç duymadan veya yanma sonrasında fazla oksijen üretmeden kendini oksitleme derecesini ölçer. Bu ölçü, enerji çıkışını, yanma ürünlerini ve enerjik malzemelerin verimliliğini doğrudan etkiler.

Oksijen dengesi, bir bileşikte bulunan oksijen atomları ile tüm elementlerini (karbonu CO<sub>2</sub>'ye, hidrojeni H<sub>2</sub>O'ya ve metalleri oksitlerine) tamamen oksitlemek için gereken miktar arasındaki dengeyi gösterir. Dengeli bir oksijen kaynağına sahip bir malzeme, yakıtının tamamını verimli bir şekilde gaz ürünlere dönüştürerek enerji salınımını optimize edecek ve duman veya kalıntıyı en aza indirecektir.

Oksijen dengesi genellikle yüzde olarak ifade edilir ve aşağıdaki formül kullanılarak C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>N<sub>z</sub>O<sub>w</sub> moleküler formülüne sahip bir bileşik için hesaplanabilir:

$$OB(\%) = \frac{1600x(w - \frac{x + \frac{y}{4}}{2})}{\text{Bileşiğin Molekül Ağırlığı}}$$

burada: x,y,z ve w sırasıyla karbon, hidrojen, nitrojen ve oksijen atomlarının sayısını temsil eden moleküler formüldeki alt simgelerdir. 1600 katsayısı dengeyi bir yüzdeye ayarlar.

Oksijen dengesi kendi içinde üç farklı türe sahiptir.

*a-) Pozitif Oksijen Dengesi:*

Molekül içinde tüm elementleri tamamen oksitlemeye yetecek miktardan fazla oksijen olduğunda ortaya çıkar. Bu tür malzemeler, diğer malzemelerin yanmasını artırabilecek ilave oksijen açığa çıkarır (genellikle piroteknikte istenilen bir durumdur).

*b-) Nötr (Sıfır) Oksijen Dengesi:*

Bileşik, tüm yakıt bileşenlerini tamamen oksitlemek için yeterli oksijene sahip olduğunda elde edilir. Bu durum yalnızca gaz ürünler ürettiğinden, minimum kalıntı ile verimliliği en üst düzeye çıkarmak için tipik olarak idealdir.

*c-) Negatif Oksijen Dengesi:*

Bileşikte tüm yakıt unsurlarını tamamen oksitlemek için yeterli oksijen olmadığını gösterir. Genellikle eksik yanma ile sonuçlanır, karbon monoksit, hidrojen gazı veya kurum üreterek patlayıcı maddenin verimliliğini azaltır.

Enerjetik malzemelerde oksijen dengesi çeşitli parametreler açısından oldukça önemlidir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

*-Performans Optimizasyonu:*

Oksijen dengesi, enerji çıkışını ve gaz üretimini etkileyerek bir patlayıcı veya itici gazın gücünü ve verimliliğini doğrudan etkiler. Dengeli oksijen, yakıtı boşa harcamadan veya fazla kalıntı üretmeden enerji salınımını iyileştirir.

*-Çevresel Etki:*

Negatif bir oksijen dengesi eksik yanmaya yol açarak karbon monoksit ve kurum gibi kirleticiler üretir. Uygun oksijen dengesine sahip malzemeler, daha az zararlı yan ürün ürettikleri için daha çevre dostudur.

*-Kullanım Yeri Uygunluğu:*

Farklı uygulamalar farklı oksijen dengeleri gerektirir. Örneğin patlayıcılarda maksimum enerji çıkışı için genellikle hafif pozitif veya dengeli bir oksijen dengesi tercih edilir. İtici gazlarda nötr bir oksijen dengesi idealdir, çünkü roketler veya ateşli silahlar için gerekli olan duman ve kalıntılar azaltılmış olur. Pirotekniklerde ise pozitif bir oksijen dengesi, tüm bileşenlerin tamamen yanmasını sağladığından havai fişeklerde genellikle canlı renkler üretilerek avantaj sağlar.

### -Güvenlik Hususları:

Yüksek pozitif oksijen dengeli enerjik malzemeler çok fazla oksijen salarsa tehlikeli olabilir, bu da şok veya sürtünmeye karşı daha yüksek hassasiyete yol açabilir. Negatif oksijen dengeli malzemeler fazla yanmamış yakıt üretebilir ve bu da beklenmedik tehlikeler yaratabilir.

Yaygın enerjik malzemelerdeki oksijen dengeleri birbirlerinden farklılıklar içerebilir. Örneğin TNT negatif oksijen dengesine sahiptir ve dumanlı bir patlamaya neden olur. RDX sifıra yakın bir oksijen dengesine sahiptir, minimum kalıntı ile verimli yanmaya izin verir. Amonyum nitrat pozitif oksijen dengesine sahiptir, genellikle yakıtlara oksijen sağlamak için çeşitli formülasyonlarda oksitleyici olarak kullanılır.

Oksijen dengesi, enerjik malzemelerin performansını, güvenliğini ve çevresel etkisini etkileyen temel bir özelliktir. Araştırmacılar formülasyonların oksijen dengesini ayarlayarak enerjik malzemeleri belirli kullanımlar için uyarlayabilir, pratik uygulamalarda verimliliklerini, güvenliklerini ve genel etkinliklerini artırabilirler.

#### 2.1.6. Patlayıcı Güç ve Güç Endeksi

Patlayıcı bir reaksiyonda ısı ve gazlar açığa çıkar. Gaz hacmi V ve patlama ısısı Q bağımsız olarak hesaplanabilir ancak bu değerler aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi patlayıcı güç değerini vermek için birleştirilebilir.

$$\text{Patlayıcı Güç} = Q \times V$$

Patlama gücü değeri daha sonra standart bir patlayıcının (pikrik asit) patlama gücü ile karşılaştırılır ve aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi güç endeksi elde edilir; burada Q (pikrik asit) ve V (pikrik asit) verileri sırasıyla 3250 kJ kg<sup>-1</sup> ve 0,831 dm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>'dir.

$$\text{Güç İndeksi} = \frac{Q \times V}{Q (\text{pikrik asit}) \times V (\text{pikrik asit})} \times 100$$

Beklendiği gibi, ikincil patlayıcıların güç ve güç endeksi değerleri birincil patlayıcıların değerlerinden çok daha yüksektir.

#### 2.1.7. Patlama Kuvveti ve Basıncı

Kimyasal bir patlama gerçekleştiğinde kimyasal enerji açığa çıkar. Bu enerji kinetik enerji ve ısı şeklinde çok kısa bir sürede, yani mikrosaniyeler

içinde oluşur. Patlayan bir enerjik malzemede, başlama noktasına yakın bir yerde süpersonik bir dalga oluşur ve arkasındaki patlayıcı maddenin ekzotermik bozunması ile devam ederek patlayıcı madde boyunca ilerler. Patlayıcı maddenin çevresine ulaştığında patlama dalgası çevredeki ortama geçer ve şiddetli bir mekanik darbeye eşdeğer ani, yoğun bir basınç uygular. Eğer ortam kaya veya taş gibi katı bir madde ise, şiddetli mekanik darbe kayada çok sayıda çatlak oluşmasına neden olacaktır. Bu etki 'brisance' olarak bilinir ve şok dalgası cephesindeki patlama basıncıyla doğrudan ilişkilidir. Şok dalgası patlayıcı bileşimden uzaklaştıktan sonra gaz halindeki ürünler genişlemeye ve çevredeki ortama etki etmeye başlar. Ortam toprak ise bir krater oluşacak, suda bir gaz kabarcığı oluşacak ve havada bir patlama dalgası gelişecektir. Gaz genişlemesinin yoğunluğu patlayıcının gücüne ( $Q \times V$ ) bağlı olacaktır. Patlama basıncı  $P_e$  ise belirli bir ağırlıktaki patlayıcı, sabit hacimli kapalı bir kaptaki yakıldığında elde edilebilecek maksimum statik basınçtır. Elde edilen basınç o kadar yüksektir ki, İdeal Gaz Kanunları yeterince doğru sonuçlar vermez ve bir eş hacim  $\alpha$  kullanılarak değiştirilir.

$$Pe(V_i - \alpha) = nRT_e$$

burada  $V_i$  kapalı test kabının hacmi,  $n$  gram patlayıcı başına üretilen gazın mol sayısı,  $T$  Kelvin cinsinden patlama sıcaklığı ve  $R$  molar gaz sabitidir.

### 2.1.8. Patlama Ürünlerinin Hacmi

Bir patlama sırasında üretilen gaz hacmi, patlayıcı tarafından yapılan iş miktarı hakkında bilgi sağlayacaktır. Üretilen gaz hacmini ölçmek için standart koşullar oluşturulmalıdır çünkü gaz hacmi ölçümün yapıldığı sıcaklığa göre değişecektir. Bu standart koşullar aynı zamanda bir patlayıcı ile diğeri arasında karşılaştırma yapılmasını sağlar. Standart koşullar sıcaklığı  $0^\circ\text{C}$  veya  $273\text{ K}$  ve basıncı  $1\text{ atm}$  olarak belirler. Bu koşullar 'standart, sıcaklık ve basınç' veya 'stp' olarak bilinir. Bu standart koşullar altında, bir mol gaz  $22,4\text{ dm}^3$  yer kaplar ve bu da molar gaz hacmi olarak bilinir. Patlama sırasında bir patlayıcıdan üretilen gazın hacmi, serbest kalan gaz ürünlerinin miktarı hakkında bilgi edinilebilen ayrışma denkleminde hesaplanabilir.

## 2.2. Enerjik Malzemelerde Termodinamik Hesaplamalar

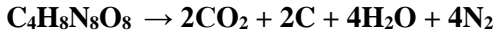
### 2.2.1. Bozunma Reaksiyonları

Bozunma reaksiyonlarının termodinamik analizi, oluşum ısısının hesaplanmasını, optimum oksijen dengesine ulaşmak için reaksiyonun

dengelenmesini ve patlama ısısının belirlenmesini içerir. Kistiakowsky-Wilson veya Springall-Roberts kuralları gibi çeşitli kurallar, enerjik maddenin moleküler yapısına dayalı olarak bu termokimyasal özellikleri tahmin etmek için kullanılır. Örneğin HMX'in ( $C_4H_8N_8O_8$ ) patlaması bozunma ürünlerinin oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Bunlar aşağıda gösterildiği gibi karbon monoksit, karbon dioksit, karbon, su vb. olabilmektedir.



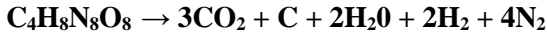
veya



veya



veya



Bozunma ürünleri sorununa açıklık getirmek amacıyla I. Dünya Savaşı sırasında Kistiakowsky ve Wilson tarafından bir dizi kural geliştirilmiştir. Bu kurallar günümüzde 'Kistiakowsky-Wilson' kuralları (K-W kuralları) olarak bilinmektedir. Bu kurallar sadece oksijen dengesi 40.0'dan büyük olan orta derecede oksijensiz patlayıcılar için kullanılmaktadır.

Kistiakowsky- Wilson kurallarına göre;

- 1-Karbon atomları karbon monoksite dönüştürülür
- 2-Herhangi bir oksijen kalırsa, hidrojen daha sonra suya oksitlenir
- 3-Hala oksijen kalırsa, karbon monoksit karbon dioksite oksitlenir
- 4-Tüm azot, azot gazı N'ye dönüştürülür,

Kistiakowsky- Wilson kuralları kullanılarak HMX'in ayrışma ürünleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

1-Karbon atomları karbon monoksite dönüştürülür:  $4C \rightarrow 4CO$

2-Herhangi bir oksijen kalırsa, hidrojen daha sonra suya oksitlenir:  $4O \rightarrow 4H_2O$

3-Hala oksijen kalırsa, karbon monoksit karbon dioksite oksitlenir: O yok

4-Tüm azot, azot gazı N'ye dönüştürülür:  $8N \rightarrow 4N_2$

### 2.2.2. Gaz Ürünlerin Hacmi ve Basıncı

Bir patlama sırasında üretilen gaz miktarı ve genişleme oranı, reaksiyon tarafından uygulanan basıncın hesaplanması için kritik öneme sahiptir. Molar hacimler ve adyabatik genişleme katsayıları da dahil olmak üzere termodinamik veriler, güvenli ve etkili uygulamaların mühendisliği için gerekli olan patlayıcı gücün ve şok dalgası yayılımının modellenmesine yardımcı olmaktadır.

### 2.2.3. Enerjik Malzemelerin Tasarımı için Termokimyasal Öngörüler

Termokimyasal ilkelerin anlaşılması, bilim insanlarının ve mühendislerin enerji çıkışı, kararlılığı ve güvenliği optimize edilmiş malzemeler tasarlamalarını sağlar. Araştırmacılar, moleküler yapıyı, özellikle de bileşiklerdeki nitrojen ve oksijen gibi elementleri manipüle ederek entalpi, entropi ve oksijen dengesini etkileyebilir, farklı kullanımlar için özel olarak tasarlanmış belirli reaksiyon hızları ve yoğunlukları elde edebilirler. ICT Termodinamik Kodu gibi hesaplamalı termokimyasal modeller ve veri tabanları, sentezden önce bu özelliklerin doğru tahmin edilmesine olanak tanıyarak yeni malzemelerin geliştirilmesinde zaman ve kaynak tasarrufu sağlar. Burada termokimyasal ilkeler, enerjik malzemelerin davranışını analiz etmek ve tahmin etmek için bir temel sağlayarak, özel performansla sahip bileşiklerin geliştirilmesine rehberlik eder. Bu kavramlar oluşum ısısını anlamaktan optimum enerji salınımı için oksijeni dengelemeye kadar çeşitli uygulamalarda güvenli, verimli ve etkili enerjik malzemelerin geliştirilmesinde merkezi öneme sahiptir.

Kuantum kimyasal yöntemleri termokimyasal verilerin tahmin edilmesine, ayrışma yollarının analiz edilmesine ve kinetik kararlılığın değerlendirilmesine yardımcı olur. Örneğin, 1-nitro-2-okso-3-amino-triazen ve tetraazatetrahedran, yüksek kinetik kararlılıkları ve yüksek tahrik performansları nedeniyle tanımlanmıştır (Brinck ve Rahm, 2014). Lazer ısıtma kalorimetrisi, çeşitli enerjik malzemelerin termal davranışını ve enerji salınımını değerlendirerek termal imzalarını ayırt edip ve raf ömrünün tahmin edilmesinde kullanılmıştır (Nazarian ve Presser, 2022). Termogravimetrik analizin kuantum kimyasal hesaplamalarla birleştirilmesi, çeşitli bileşikler için süblimasyon ve oluşum entalpilerinin hassas bir şekilde belirlenmesini sağlayarak malzeme tasarımına yardımcı olmuştur (Muravyev ve diğerleri, 2021).

### 3. TERMAL BOZUNMA VE REAKSİYON KİNETİĞİ

Termal bozunma ve reaksiyon kinetiğinin incelenmesi, enerjik malzemelerin kararlılığını, hassasiyetini ve performansını anlamak için temel yöntemlerin başında gelmektedir. Termal bozunma, ısı uygulaması nedeniyle bir bileşiğin parçalanması anlamına gelir ve enerji açığa çıkaran bir dizi kimyasal reaksiyona yol açar. Reaksiyon kinetiği ise bu reaksiyonların gerçekleşme hızını ve bunları etkileyen faktörleri araştırarak enerjik malzemelerin çeşitli koşullar altındaki kararlılığı ve davranışı hakkında içgörü sağlar.

#### 3.1. Termal Bozunma Kinetiği

Tüm patlayıcılar, patlamaların gerçekleştiği sıcaklıkların çok altındaki sıcaklıklarda termal ayrışmaya uğrarlar. Bu reaksiyonlar patlayıcının kararlılığını ve raf ömrünü belirlemede önemlidir. Reaksiyonlar ayrıca patlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı hakkında da faydalı bilgiler sağlar. Kinetik veriler normalde izotermal koşullar altında bir dizi kontrollü sıcaklıkta bir patlayıcı örneğinden salınan gaz oranının ölçülmesiyle belirlenir. Aşağıdaki denklem ayrışma hızı ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi göstermektedir; burada  $V$  açığa çıkan gaz hacmi,  $T$  sıcaklık,  $k$  reaksiyon hızı sabiti ve  $C$  belirli bir patlayıcı için bir sabittir.

$$V = k^T + C$$

Sıcaklıktaki her 10°C'lik artış için bozunma oranı yaklaşık iki katına çıkar, ancak patlayıcı erimiş haldeyse 50 katına kadar çıkabilir. Ayrışma oranları depolama koşullarına ve katalizör görevi görebilecek safsızlıkların varlığına da bağlıdır. Örneğin, nitrogliserin ve nitroselüloz otokataliz nedeniyle hızlandırılmış bir hızda bozunurken, TNT, pikrik asit ve tetrilin bozunma hızı, genellikle patlayıcının kendisinden daha az kararlı olan safsızlıkların uzaklaştırılmasıyla azaltılabilir. Birçok patlayıcıda nemin varlığı bozunma hızını artırır.

Patlayıcıların termal bozunma kinetiği, bu malzemelerin güvenliği, kararlılığı ve performansı hakkında bilgi veren hayati bir çalışma alanıdır. Patlayıcıların termal bozunma davranışını anlamak, bu bileşiklerin ısı altında parçalanma oranlarını analiz etmeyi içerir; bu da kimyasal yapı, çevresel koşullar ve katkı maddelerinin varlığı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir.

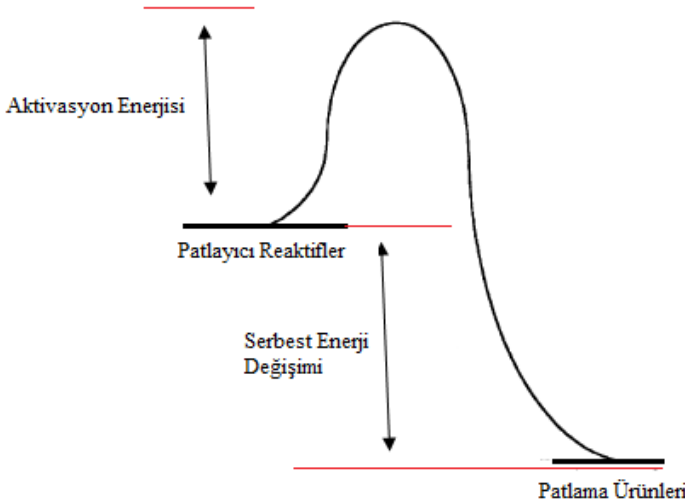
### 3.2. Enerjik Malzemelerin Reaksiyon Kinetiği

Kinetik, kimyasal reaksiyonların değişim hızının incelenmesidir. Bu reaksiyonlar çok hızlı olabilmektedirler. Patlama gibi anlık reaksiyonlar, şekerin suda çözünmesi gibi birkaç dakika gerektiren reaksiyonlar ve demirin paslanması gibi birkaç hafta gerektiren reaksiyonlar görüldüğü üzere süreleri bakımından farklıdır. Patlayıcı reaksiyonlarda hız çok yüksektir ve reaksiyonun sıcaklığına, basıncına ve reaktanların konsantrasyonuna bağlıdır.

#### 3.2.1. Aktivasyon Enerjisi

Aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ), enerjik bir malzemenin bozunmasını başlatmak için gereken minimum enerjidir. Düşük aktivasyon enerjisine sahip malzemeler genellikle daha hassastır ve daha düşük sıcaklıklarda veya hafif şok altında hemen bozunurlar. Hız yasaları, reaktanların konsantrasyonunun bozunma hızını nasıl etkilediğini açıklar ve genellikle Arrhenius denklemleri ile modellenir.

Bir patlayıcı reaksiyonu sırasında, ilk olarak patlayıcının sıcaklığını yükseltmek için başlatıcıdan enerji sağlanır böylece sıcak noktaların oluşmasıyla ateşleme gerçekleşir. Sıcak noktalar tarafından üretilen enerji aktivasyon enerjisinden daha az ise hiçbir reaksiyon gerçekleşmez ve sıcak noktalar şekil 2'de gösterildiği gibi yavaş yavaş söner.



Şekil 2. Kimyasal patlayıcılar için reaksiyon sürecinin şematik diyagramı



Öte yandan, sıcak noktalar tarafından üretilen enerji aktivasyon enerjisinden büyükse, reaksiyon patlayıcı ürünlerin oluşumu ve enerji salınımı ile ilerleyecektir. Bu nedenle aktivasyon enerjisi, bir başlangıç maddesini (örneğin ortam sıcaklığında patlayıcı bir bileşik) alıp reaktif, daha yüksek enerjili uyarılmış bir duruma dönüştürmek için gereken enerji miktarını temsil eder. Bu uyarılmış durumda, aktivasyon enerjisinden daha büyük olan önemli miktarda enerjinin serbest kalmasıyla ürünleri oluşturmak için bir reaksiyon meydana gelir. Aktivasyon enerjisi değerleri, bir patlayıcı bileşimin başlatılma kolaylığını ölçmek için kullanılabilir; aktivasyon enerjisi ne kadar büyükse patlayıcı bileşimi başlatmak o kadar zor olacaktır.

### 3.2.2. Reaksiyon Hızı

Reaksiyon hızı sıcaklık, basınç ve malzemenin fiziksel şekli (örn. partikül boyutu) gibi faktörlerden etkilenir. Örneğin, ince tozlar daha büyük parçacıklara kıyasla bozunmayı hızlandıran daha yüksek bir yüzey alanına sahiptir. Bozunma kinetiği, özellikle sıcaklık veya basınçtaki küçük değişikliklerin reaksiyon hızını önemli ölçüde artırabildiği enerjik malzemelerde doğrusal olmayabilir.

Reaksiyonun hızı, aktivasyon enerjisinin büyüklüğü ve reaksiyonun gerçekleştiği sıcaklık tarafından belirlenir. Sistemin sıcaklığı yükseldikçe, üstel olarak daha fazla sayıda molekül gerekli aktivasyon enerjisine sahip olacaktır. Bu nedenle reaksiyon hızı, şekil 3'te gösterildiği gibi, sıcaklık arttıkça üstel bir şekilde artacaktır. Reaksiyon hızı, Arrhenius denklemi olarak bilinen hız-sıcaklık ilişkisi kullanılarak aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanabilir.

$$k = Ae^{-E/RT}$$

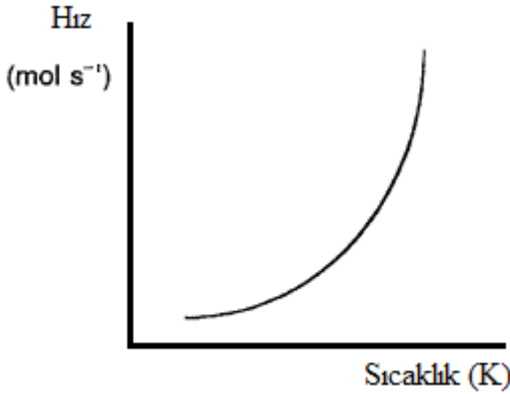
burada k reaksiyon hızı için bir sabit, A belirli bir malzeme için bir sabit, E kJ mol<sup>-1</sup> cinsinden aktivasyon enerjisi, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve R Evrensel Gaz sabitidir, yani 8.314 Jmol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. A sabiti frekans faktörü veya ön-eksponansiyel faktör olarak bilinir ve moleküller arasında saniyede birim hacim başına düşen çarpışma sayısından belirlenebilir. Bu nedenle, E = 0 (yani sıfır aktivasyon enerjisi) ise e<sup>-E/RT</sup> = 1'dir ve çarpışan tüm moleküller reaksiyona girer; tersine, E/RT >> 1 ise E >> RT (yani yüksek aktivasyon enerjisi), çarpışan moleküllerin çoğu reaksiyona girmez.

Birincil patlayıcılar (civa fulminat, gümüş azit, kurşun azit), ikincil patlayıcılara (nitrogliserin, TNT, RDX, PETN, HMX, tetril, pikrik asit) kıyasla aktivasyon enerjisi ve çarpışma faktörü için düşük değerlere sahiptir. Bu

nedenle, birincil patlayıcıları başlatmak daha az enerji gerektirir ve onları darbe, sürtünme vb. gibi harici bir uyarıcıya karşı daha hassas hale getirir. İkincil patlayıcılar ise aktivasyon enerjisi ve çarpışma faktörü için daha yüksek değerlere sahiptir ve bu nedenle başlatılması daha zordur ve harici uyarıcıya karşı daha az hassastır.

### 3.2.3. Sıcaklık Bağımlılığı

Enerjik malzemeler aşağıda şekil 3'te gösterildiği gibi genellikle reaksiyon hızının sıcaklıkla katlanarak arttığı Arrhenius tipi davranış sergiler. Sıcaklığa karşı bu hassasiyet, taşıma ve depolama koşullarının yanı sıra kazara patlama olasılığının anlaşılmasında çok önemlidir. Örneğin, yüksek sıcaklık hassasiyetine sahip bileşikler, yanlışlıkla ısıtılacakları ortamlar için uygun olmayabilir.



Şekil 3. Sıcaklığın reaksiyon hızı üzerindeki etkisi

### 3.3. Termal Bozunma Mekanizmaları ve Modelleri

Patlayıcılar ve itici gazlar gibi enerjik malzemeler, performansları ve güvenlikleri açısından kritik öneme sahip bozunma reaksiyonlarından geçerler. Bu reaksiyonların anlaşılması, kimyasal yolların, reaksiyon kinetiğinin, sıcaklık ve basınç gibi dış faktörlerin etkisinin incelenmesini içerir (Kubota, 2015; Shaw ve diğerleri, 2005).

Enerjik malzemelerdeki termal bozunma, kimyasal bağları kırmak için gereken enerjiyi sağlayan ısı ile tetiklenir. Bu süreç tipik olarak, malzeme

içindeki kimyasal bağların kırılmaya başladığı başlatma aşamasından başlayarak, ara ve nihai ürünler üreten bir reaksiyonlar zincirini içeren yayılma aşamasına kadar bir dizi adımı içerir. Ayrışmanın doğası, malzemenin moleküler yapısına ve bağ güçlerine bağlıdır. Örneğin, RDX ve HMX'in termal bozunması, gaz halinde nitrojen ve diğer parçaları üreten ilk halka bölünmesini içeren karmaşık bir mekanizmayı takip eder. Bu süreç ekzotermiktir ve belirli koşullar altında kendi kendine devam edebilir. Nitroselüloz ve nitrogliserin ise nitrat ester bağı bölünmesi yoluyla ayrışarak  $\text{NO}_2$  ve CO üretir, bu da daha fazla parçalanmayla reaksiyonu hızlandırarak ek ısı açığa çıkarabilir.

Bozunma bir dizi aşama ile meydana gelmektedir. Bu aşamalar aşağıda sıralanmıştır.

*a-) Başlatma:* Bağların ilk kırılması genellikle endotermiktir ve başlangıçta bir ısı girdisi gerektirir. Daha hassas patlayıcılar daha düşük sıcaklıklarda ayrışmaya başlayacağından, bu aşama malzemenin kararlılığını tanımlamada kritik öneme sahiptir.

*b-) Yayılma:* Reaksiyon bir kez başlatıldığında, bağ kırılmasından kaynaklanan enerji daha fazla bozunmayı hızlandırır ve genellikle zincirleme reaksiyona yol açan yayılma aşamasına geçilir.

*c-) Sonlandırma:* Kontrollü ortamlarda, reaksiyon söndürülerek bozunma durdurulabilir. Bununla birlikte, çoğu enerjik malzemede, bozunma bir kez başlatıldığında maksimum enerjisi serbest bırakmak için tamamen ilerler.

### 3.3.1. Bozunma Mekanizmaları

Enerjik malzemelerin bozunması, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalarla gerçekleşebilir:

*a-) Basit Bağ Fisyonu:* Radikallerin veya daha küçük moleküllerin oluşumuna yol açan tek bir kimyasal bağı kırılmasını içerir. Örneğin, nitramin bileşikleri bağ ayrışması yoluyla bozularak azot oksitlerin ve diğer gazların açığa çıkmasına neden olur (Melius, 1990).

*b-) Çok Merkezli Eliminasyon:* Bu mekanizma, su veya nitrojen gibi küçük moleküllerin ortadan kaldırılmasına yol açan çoklu bağların eşzamanlı olarak kırılmasını ve oluşturulmasını gerektirir. Bu tür yollar, karmaşık enerjik bileşiklerin bozunmasında yaygındır (Melius, 1990).

*c-) Otokatalitik Ayrışma:* Bu süreçte, bozunma ürünlerinin kendileri katalizör görevi görerek reaksiyonu hızlandırır. Örneğin, 5-amino-3,4-dinitropirazolün

(5-ADP) bozunması, reaksiyon ara ürünlerinin ayrışma hızını arttırdığı otokatalitik davranış sergiler (Muravyev ve diğerleri, 2022).

### 3.3.2. Bozunmayı Etkileyen Faktörler

Enerjik malzemelerin bozunma reaksiyonlarını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bunlar;

*a-) Sıcaklık ve Basınç:* Yüksek sıcaklıklar ve basınçlar bozunmayı hızlandırabilir. Reaktif moleküler dinamik simülasyonları kullanılarak yapılan çalışmalar, şok kaynaklı ayrışma oranlarının farklı şok modları ve basınçlarla değiştiğini göstermiştir (Jiang ve diğerleri, 2024).

*b-) Moleküler Yapı:* Enerjik malzemelerin kararlılığı, bağ bozunma enerjileri ve stabilize edici etkileşimlerin varlığı da dahil olmak üzere moleküler yapılarından etkilenir. Örneğin, enerjik malzemelerin termal bozunma sıcaklığı, bant aralığı ve Young modülü gibi parametrelerle ilişkilidir (Zhang ve diğerleri, 2024).

*c-) Molekül İçi Gerilme:* Moleküller içindeki gerilme, enerjiyi yerelleştirerek bozunmayı kolaylaştıran ‘sıcak noktalar’ oluşturabilir. TATB (triaminotrinitrobenzen) gibi malzemelerin mikroyapısı ile şok dalgası etkileşimleri bu tür bir gerilmeye neden olarak kimyasal reaksiyonların hızlanmasına yol açabilir.

#### 3.3.3. Reaksiyon Düzeni ve Kinetik Modeller

Enerjik malzemelerdeki bozunma reaksiyonları, moleküler yapılarına bağlı olarak çeşitli kinetik düzenleri takip ederler. Yaygın modeller arasında sıfır dereceli reaksiyonlar (hızın konsantrasyondan bağımsız olduğu), birinci dereceli reaksiyonlar (hız konsantrasyona doğrusal olarak bağlıdır) ve ara ürünlerin reaksiyonu hızlandırdığı daha karmaşık otokatalitik reaksiyonlar yer alır. Kissinger ve Ozawa yöntemleri gibi modeller genellikle DSC verilerinden reaksiyon düzenini ve aktivasyon enerjisini analiz etmek için kullanılır.

#### 3.3.4. Otokataliz ve Zincir Reaksiyonları

Birçok enerjik malzeme, nitrat bazlı malzemelerdeki NO<sub>2</sub> gibi ilk bozunma ürünlerinin reaksiyonu daha da katalize ettiği otokatalitik davranış sergiler. Bu durum bozunmanın kontrolsüz bir şekilde hızlandığı ve yönetilmediği takdirde önemli bir güvenlik riski oluşturan kaçak bir reaksiyona yol açabilir (Akhavan, 2004; Kubota, 2015)

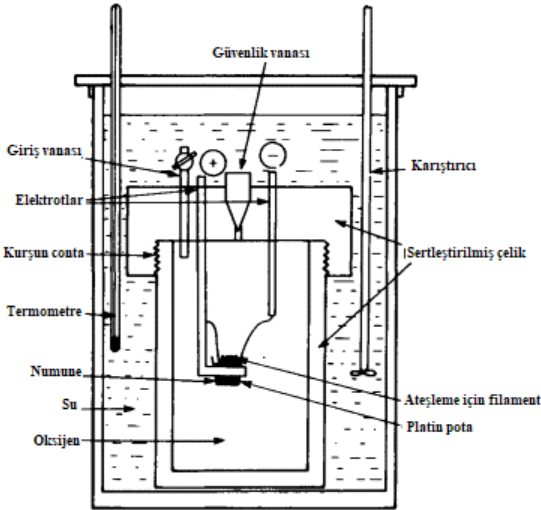
## 4. DENEYSEL KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Deneysel karakterizasyon teknikleri, enerjik malzemelerin özelliklerini, davranışlarını ve performanslarını anlamak için gereklidir. Bu teknikler, bu malzemelerin termodinamik, ayrışma, yanma ve patlama özelliklerine ilişkin içgörüler sağlayarak araştırmacıların daha güvenli, daha etkili bileşikler ve uygulamalar tasarlamasına olanak tanır. Temel deneysel yöntemler arasında kalorimetri, spektroskopi, kromatografi ve gelişmiş görüntüleme yer alır ve bunların her biri enerjik malzeme davranışının farklı yönleri hakkında değerli veriler sağlar.

### 4. 1. Enerji Salınımını Ölçmek için Kalorimetri

#### 4.1.1. Bomba Kalorimetrisi

Bomba kalorimetrisi, patlayıcıların enerji içeriğini ölçmek için kritik bir tekniktir ve hem güvenlik değerlendirmeleri hem de performans değerlendirmeleri için temel veriler sağlar. Yöntem, bir numunenin bomba kalorimetresi içinde kontrollü olarak yakılmasını içerir ve bu da patlama sırasında açığa çıkan ısıyı hassas bir şekilde ölçülmesini sağlar. Bu teknik, katı ve sıvı patlayıcıların yanı sıra diğer yanıcı maddeler de dahil olmak üzere çeşitli patlayıcı maddelerin iç enerjisini belirlemek için özellikle yararlıdır (Knurr ve Hauri, 2020). Şekil 4'te klasik bir bomba kalorimetrisi gösterilmektedir.



Şekil 4. Bir bomba kalorimetrisi (Bird ve Chives, 1993)

Patlayıcıların incelenmesinde bomba kalorimetrisi bazı çalışmalarda kullanılmıştır. Alüminize patlayıcıların kalorimetrik ölçümleri, bor ve magnezyum hidrit gibi belirli bileşiklerin eklenmesinin patlama ısısını hafifçe artırabileceğini gösterilmiştir (W. Cao ve diğerleri, 2019). Bu bulgu, gelişmiş performans için patlayıcı formülasyonlarının optimize edilmesinde kalorimetrik verilerin önemini vurgulamaktadır. Patlamanın kalorimetrik enerjisi genellikle patlama enerjisinin bir ölçüsü olarak kullanılır ve bu da onu farklı patlayıcı malzemelerin etkinliğinin değerlendirilmesinde hayati bir parametre haline getirir (Moxnes ve diğerleri, 2013). Kalorimetrik tekniklerin diğer analitik yöntemlerle entegrasyonu patlayıcı maddelerin anlaşılmasını geliştirmektedir. Örneğin, kalorimetrik verilerin kinetik parametrelerle birleştirilmesi, patlayıcıların performansının ve güvenliğinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlar (Singh ve diğerleri, 2019). Minyatür kalorimetrelerin geliştirilmesi, iç güvenlik uygulamaları da dahil olmak üzere çeşitli ortamlarda patlayıcıların hızlı bir şekilde tanımlanmasını ve tespit edilmesini sağlayarak bu alanı daha da ilerletmiştir (Y.-S. Liu ve diğerleri, 2007).

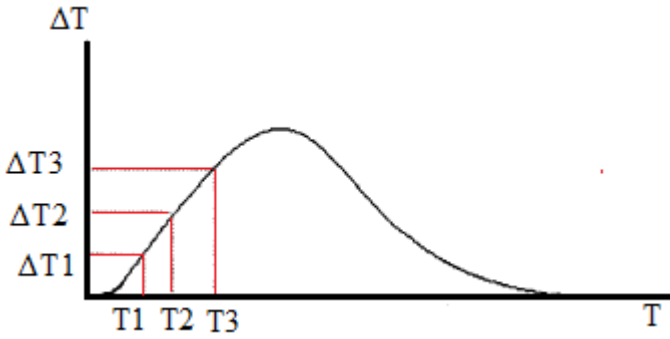
Literatür araştırmalarından da görüldüğü üzere bomba kalorimetrisi ve ilgili termal analiz teknikleri patlayıcıların incelenmesinde vazgeçilmez araçlardır. Bu yöntemler patlayıcı maddelerin enerji içeriği, kararlılığı ve performansı hakkında kritik bilgiler sağlayarak daha güvenli üretim, kullanım ve uygulama uygulamalarına katkıda bulunurlar.

#### **4.1.2. Diferansiyel Termal Analiz (DTA)**

DTA ayrışmanın kinetik parametrelerini incelemek için yaygın olarak DSC ile kullanılabilir. Bu yöntemler, bozunma ile ilişkili ısı akışını ve sıcaklık değişimlerini değerlendirerek, aktivasyon enerjisi ve reaksiyon sırası ile birlikte reaksiyonun ekzotermik ve endotermik aşamaları hakkında bilgi sağlar.

Diferansiyel termal analiz (DTA), bir test numunesinin ve inert bir referans numunesinin aynı koşullar altında ısıtılmasını (veya soğutulmasını) ve aralarında gelişen herhangi bir sıcaklık farkının kaydedilmesini içerir. Test numunesinde meydana gelen ve ısı oluşumunu içeren herhangi bir fiziksel veya kimyasal değişiklik, sıcaklığının geçici olarak referans numunesinin sıcaklığının üzerine çıkmasına neden olacak ve böylece bir DTA grafiğinde ekzotermik bir tepe noktası oluşturacaktır. Tersine, ısı emiliminin eşlik ettiği bir süreç, test numunesinin sıcaklığının referans malzemenin sıcaklığının gerisinde

kalmasına neden olarak endotermik bir zirveye yol açacaktır. Bir patlayıcının saflık derecesi DTA grafiklerinden belirlenebilir. Patlayıcının kirlenmesi erime noktasında bir düşüşe neden olacaktır. Bir faz değişimi veya reaksiyon endotermik veya ekzotermik bir pike yol açacaktır ve pikin altındaki alan evrilen veya alınan ısı miktarıyla ilgili olacaktır. Şekil 5 patlayıcı bir maddenin bozunması için DTA grafiğini göstermektedir. Bozunma, T sıcaklığı patlayıcı maddenin tutuşma sıcaklığına ulaştığında başlar ve ekzotermik bir pikle sonuçlanır. Patlayıcı madde bozundukça, DTA grafiğinde  $\Delta T$  (y eksen) olarak ölçülen ısı açığa çıkar.  $\Delta T$ , patlayıcı maddenin bozunma hızıyla orantılıdır; hız arttıkça daha fazla ısı yayılır ve  $\Delta T$  artar. Bir patlayıcının bozunmasının birinci dereceden bir süreç olduğu varsayılırsa, reaksiyonun hızı  $\Delta T$  sıcaklığındaki artışla doğru orantılıdır.



Şekil 5. Patlayıcı bir maddenin ayrışması için DTA termogramı

Aktivasyon enerjisi E, aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi Arrhenius denklemi kullanılarak DTA grafiğinden hesaplanabilir.

$$\text{Reaksiyon Hızı} = \Delta T = Ae^{-E/RT}$$

$$\ln \Delta T = \ln(Ae^{-E/RT}) = \ln A + \ln e^{-E/RT}$$

$$\ln \Delta T = \ln A - E/RT$$

$\Delta T$  çeşitli T sıcaklıklarında ölçülür ve  $\Delta T$ 'ye karşı  $1/T$  grafiği çizilir. Eğimi  $-E/R$  olan düz bir çizgi elde edilir. DTA ayrıca erime, kaynama, kristal geçişleri,

dehidrasyon, bozunma, oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonları hakkında bilgi sağlayacaktır.

DTA, bir numune ve referans ısıtıldıkça aralarındaki sıcaklık farklarını ölçer. Numunedeki ekzotermik veya endotermik reaksiyonlar faz değişikliklerini, ayrışma olaylarını ve reaksiyon kinetiğini ortaya çıkarır. DTA ile malzemelerin termal stabilitesi ve reaksiyon eşikleri hakkında bilgiler vermektedir.

#### **4.1.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC)**

DSC, enerjik bir malzemenin kontrollü bir hızda ısıtılırken bozunmasıyla ilişkili ısı akışını ölçmek için kullanılır. Araştırmacılar ekzotermik ve endotermik pikleri analiz ederek bozunmanın başlangıç sıcaklığını, açığa çıkan enerjiyi ve termal kararlılığı belirleyebilirler. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) tekniği DTA'ya çok benzer. DTA termogramındaki pikler numune ve referans arasındaki sıcaklık farkını temsil ederken, DSC termogramındaki pikler numuneyi ve referansı aynı sıcaklıkta tutmak için sisteme verilen elektrik enerjisi miktarını temsil eder. DSC piklerinin altındaki alanlar reaksiyonun entalpi değişimiyle orantılı olacaktır. DSC genellikle dengelerin, ısı kapasitelerinin ve faz değişikliklerinin olmadığı patlayıcı reaksiyonların kinetiğinin incelenmesi için kullanılırken, TGA ile birleştirilmiş DTA esas olarak termal analiz için kullanılır.

Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) patlayıcı maddelerin termal özelliklerinin değerlendirilmesinde çok önemli bir tekniktir. Yapılan akademik çalışmalarda farklı patlayıcı bileşiklerin termal kararlılığını, bozunma özelliklerini ve uyumluluğunu değerlendirmek için DSC anaizleri kullanılmaktadır. Elde edilen veriler DSC'nin sadece patlayıcıların termal davranışları hakkında kritik veriler sağlamakla kalmayıp aynı zamanda daha güvenli ve daha verimli enerjik malzemelerin geliştirilmesine de yardımcı olduğunu göstermektedir.

DSC ekzotermik (ısı salan) ve endotermik (ısı alan) olayları kaydederek, bozunmanın başlangıç sıcaklığı, aktivasyon enerjisi ve malzemenin termal kararlılığı hakkında bilgi sağlar. DSC ile artan sıcaklıklara maruz kaldıklarında enerjik malzemelerin nasıl davrandıkları ortaya çıkarıldığından, bu yöntem güvenlik ve kullanım gereksinimlerini belirlemek için özellikle yararlıdır.



#### 4.1.4. İzotermal ve Adyabatik Kalorimetri

İzotermal ve adyabatik kalorimetri, enerjik malzemelerin çalışılmasında kritik tekniklerdir ve termal özellikleri, kararlılıkları ve enerjik davranışları hakkında bilgi sağlar. İzotermal kalorimetri numuneyi sabit bir sıcaklıkta tutar ve zaman içindeki ısı değişikliklerini izler, uzun vadeli stabilite ve bozulmayı incelemek için idealdir. Adyabatik kalorimetri, çevreyle ısı alışverişini önleyerek, kaza sonucu çıkan yangınlarda olduğu gibi ısı kaybının olmadığı koşullarda enerjik malzemelerin kaçak reaksiyonlarını simüle eder. Bu metodolojiler, araştırmacıların enerjik bileşiklerin termodinamiğini anlamak için gerekli olan fiziksel ve kimyasal süreçlerle ilişkili ısı akışını ölçmelerine olanak tanır.

Özellikle izotermal kalorimetri, miliwatt ölçeğinde ısı üretimini veya tüketimini ölçmedeki hassasiyeti ve doğruluğu ile tanınmaktadır. Bu teknik, patlayıcıların ve diğer enerjik malzemelerin incelenmesi de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda etkili bir şekilde uygulanmıştır. Örneğin, biyokütle peletlerinin kendi kendine ısınma potansiyelini değerlendirmek için kullanılmış ve katı malzemelerden ısı akışını değerlendirmede uygulanabilirliğini göstermiştir (Larsson ve diğerleri, 2017). Isı akışını doğru bir şekilde ölçme yeteneği, izotermal kalorimetriyi enerjik malzemelerin karakterizasyonu için değerli bir araç haline getirir, çünkü termal davranıştaki stabilite veya reaktivite sorunlarını gösterebilecek ince değişiklikleri tespit edilebilir.

Enerjik malzemeler bağlamında, standart molar ısı kapasitesi, entropi ve entalpi gibi termodinamik özellikler, farklı koşullar altındaki davranışlarını anlamak için çok önemlidir. Bu özellikler kalorimetrik ölçümlerden elde edilebilir ve RDX ve TNT gibi bileşiklerin enerjik ortamına dair kapsamlı bir bilgi sağlar (Myint ve diğerleri, 2016; Wu ve diğerleri, 2021). Bu malzemelerin oluşum ısı ve patlama performansı, yeni enerjik bileşiklerin tasarımı ve sentezi için gerekli olan kalorimetrik teknikler kullanılarak da değerlendirilebilir (Gao ve diğerleri, 2020).

Adyabatik kalorimetri, hızlı ısıtma koşulları altında enerjik malzemelerin termal kararlılığını ve ayrışma davranışını incelemek için de özellikle yararlıdır. Bu yöntem, enerjik malzemelerin çevreye ısı kaybı olmadan termal uyarılara nasıl tepki verdiğinin incelenmesine olanak tanır; bu da güvenlik ve performanslarının değerlendirilmesi için kritik öneme sahiptir. Yapılan araştırmalar diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) yoluyla gösterildiği gibi, çeşitli enerjik

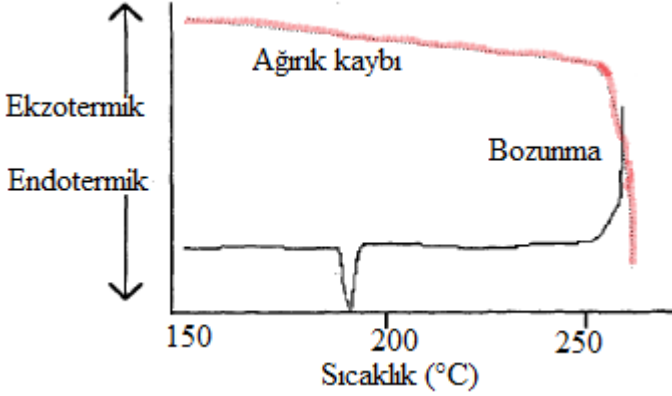
malzemelerin termal stabilitesinin moleküler yapılarından önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermiştir (Guo ve An, 2018; Y. Zhou ve diğerleri, 2020).

Hem izotermal hem de adyabatik kalorimetri, enerjik malzemelerin karakterizasyonunda çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknikler yalnızca temel termodinamik verileri sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bu bileşiklerin çeşitli koşullar altında kararlılık, reaktivite ve performanslarının anlaşılmasına da katkıda bulunur. Kalorimetrik yöntemlerde devam eden ilerlemeler ve bunların hesaplamalı yaklaşımlarla entegrasyonu, enerjik malzemelerin çeşitli alanlardaki çalışmaların ve uygulamaların önünü açmaktadır.

#### **4. 2. Kütle Kaybı ve Kararlılık için Termogravimetrik Analiz (TGA)**

TGA, bir numunenin ısıtıldıkça kütesini izler ve malzemenin ağırlık kaybına bağlı olarak bozunma aşamaları hakkında bilgi sağlar. Uçucu yan ürün salınımının sırasını ve artık malzemenin stabilitesini anlamaya yardımcı olur. Termogravimetrik analiz (TGA) patlayıcı reaksiyonların incelenmesi için uygun bir tekniktir. TGA'da numune bir fırının içindeki bir teraziye yerleştirilir ve istenen bir hızda ısıtılır ve numunenin ağırlığındaki kayıp kaydedilir. Ağırlıktaki bu tür değişiklikler nemin buharlaşmasından, gazların değişmelerinden ve kimyasal ayrışma reaksiyonlarından, yani oksidasyondan kaynaklanabilir.

TGA genellikle DTA ile birleştirilir ve DTA termogramı ile ağırlık kaybının bir grafiği kaydedilir. Bu grafikler gerçekleşen fiziksel ve kimyasal süreçler hakkında bilgi verir. Patlayıcı bir reaksiyonda, gaz halindeki maddelerin üretimi nedeniyle ateşlemeden sonra hızlı bir ağırlık kaybı olur ve aynı zamanda ısı üretilir. HMX'in tipik bir DTA ve TGA termogramı şekil 6'da gösterilmektedir. 192 °C'deki endoterm p-S kristal faz değişiminden, 276 °C'deki ekzoterm ise HMX'in şiddetli bozunmasından kaynaklanmaktadır. Patlayıcı maddelerin termal ön tutuşma ve tutuşma sıcaklıkları DTA ve TGA termogramlarından elde edilebilir.



**Şekil 6.** Diferansiyel termal analiz ve termogravimetrik analiz kullanılarak HMX' in termogramı

TGA, kontrollü bir hızda ısıtılan bir malzemenin kütledeki değişimi ölçerek termal kararlılık, ayrışma sıcaklığı ve gaz halindeki yan ürünlerin salınımı hakkında bilgi sağlar. Numune ayrıştıkça kütle kaybeder ve TGA bu değişimi gerçek zamanlı olarak kaydeder. TGA, güvenli depolama ve taşıma koşullarının değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olan ayrışma aşamalarının ve ara ürünlerin kararlılığının belirlenmesine yardımcı olur. Örneğin, TGA tek adımlı ve çok adımlı bozunma süreçleri arasında ayırım yapabilir ve aşırı ısındığında patlayarak ayrışabilecek malzemeleri belirleyebilir.

### 4. 3. Reaksiyon Analizi için Spektroskopik Teknikleri

#### 4.3.1. Fourier-Transform Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi

Fourier-transform kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, enerjik malzemelerin karakterizasyonunda çok önemli bir analitik tekniktir ve kimyasal bileşimleri ve yapısal özellikleri hakkında bilgi sağlar. Enerjik malzemelerin incelenmesinde FTIR uygulaması, termal analiz, uyumluluk değerlendirmeleri ve fonksiyonel grupların tanımlanmasını kapsayan çok yönlüdür.

FTIR spektroskopisinin başlıca avantajlarından biri, enerjik malzemelerin termal ayrışma mekanizmalarını aydınlatabilmesidir. Zhou'nun araştırması, enerjik malzemeler bağlamında önemli olan trimerize furoksan bileşiklerinin termal davranışlarını araştırmak için FTIR ve kütle

spektrometresi (MS) ile birleştirilmiş diferansiyel taramalı kalorimetrenin (DSC) kullanımını vurgulamaktadır (J. Zhou, 2024). Bu kombinasyon, bu malzemelerin güvenli kullanımı ve uygulanması için çok önemli olan ayrışma yollarının ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlar.

FTIR, enerjik malzemelerin uyumluluğunun değerlendirilmesinde X-ışını kırınımı (XRD) gibi diğer yöntemleri tamamlayan termal olmayan bir teknik olarak hizmet eder. Tarchoun ve arkadaşları, FTIR'ın karışık enerjik bileşenler arasındaki potansiyel etkileşimleri etkili bir şekilde tanımlayabildiğini ve böylece moleküler yapıda uyumsuzluktan kaynaklanabilecek değişiklikleri aydınlatabildiğini vurgulamaktadır (Tarchoun, 2023). Bu özellik, nitrokitosanın çeşitli enerjik moleküllerle uyumluluğunu değerlendiren çalışmalarda vurgulandığı gibi, enerjik malzemeler içeren formülasyonların stabilitesini ve güvenliğini sağlamak için gereklidir.

FTIR'ın çok yönlülüğü, patlayıcı kalıntılarının tanımlanmasına yardımcı olduğu adli bilimlerdeki uygulamalarında da gösterilmiştir. Örneğin, Tuhuş ve arkadaşları spektral parmak izlerini analiz ederek FTIR'ın TNT ve C3 gibi çeşitli patlayıcılar arasında nasıl ayırım yapabildiğini göstermektedir (Tuhuş ve diğerleri, 2022). Bu uygulama, patlayıcı maddelerin hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanmasının gerekli olduğu adli soruşturmalarda kritik öneme sahiptir. FTIR'ın bileşiklerin moleküler parmak izini sağlama kabiliyeti enerjik malzemelerin karakterizasyonunda bu yöntemi çok önemli kılmaktadır. Banaş ve arkadaşları, patlama sonrası kalıntıları analiz etmek için FTIR'ın nasıl kullanılabileceğini tartışarak, karakteristik absorpsiyon pikleri aracılığıyla belirli patlayıcı bileşiklerin tanımlanmasını sağlamışlardır (Banaş ve diğerleri, 2010). Bu özellik sadece adli analize yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda bu malzemelerin çeşitli koşullar altındaki kimyasal davranışlarına ilişkin anlayışımıza da katkı sağlar.

Yapılan çalışmalardan anlaşılacağı üzere FTIR spektroskopisi enerjik malzemelerin analizinde vazgeçilmez bir araçtır ve termal bozunmaları, uyumlulukları ve tanımlanmaları hakkında bilgiler sunar. Uygulaması, termal analiz, adli tıp bilimi ve malzeme karakterizasyonu dahil olmak üzere birçok alanı kapsamaktadır ve hem araştırma hem de pratik uygulamalarda oldukça önemli bir karakterizasyon yöntemidir.

### 4.3.2. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, başta patlayıcılar olmak üzere enerjik maddelerin tespiti ve tanımlanması için çok önemli bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknik, moleküllerin benzersiz titreşim imzalarından yararlanarak, kapsamlı numune hazırlığına gerek kalmadan çeşitli bileşiklerin hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Uzaktan tespit yapabilme (numuneleri uzaktan analiz edebilme) özelliği, patlayıcıların güvenli bir şekilde tanımlanmasının çok önemli olduğu güvenlik ve askeri bağlamlarda uygulanabilirliğini artırır.

Raman spektroskopisinin başlıca avantajlarından biri, özellikle adli uygulamalarda faydalı olan invazif olmayan doğasıdır. Yapılan çalışmayla numuneyi değiştirmeden yüzeylerdeki patlayıcılar tespit edilmiş için ve kalıntılar analiz etmek için uygun hale getirilmiştir (Tripathi ve diğerleri, 2011). Bu teknik tespit yeteneklerini geliştirmek için lazer kaynaklı parçalanma spektroskopisi (LIBS) gibi diğer yöntemlerle birleştirilebilir. Bu hibrit yaklaşım, hem Raman hem de LIBS spektrumlarının elde edilmesini sağlayarak RDX ve TNT gibi patlayıcıların tanımlanmasını geliştirmektedir (Güven ve diğerleri, 2017; Moros ve diğerleri, 2010).

Raman spektroskopisindeki son gelişmeler, derin ultraviyole (DUV) uyarma kaynaklarının kullanımı yoluyla hassasiyeti artırmaya odaklanmıştır. DUV rezonans Raman spektroskopisi, Raman saçılma çapraz kesitlerini önemli ölçüde artırarak patlayıcılar için gelişmiş tespit limitlerine imkan sağlar. Rezonans teknikleri kullanıldığında bazı patlayıcılar için 250.000 kata varan artışlar rapor edilmiştir (Ehlerding ve diğerleri, 2012). Bu durum özellikle eser miktardaki patlayıcıların uzaktan tespit edilebilmesinin son derece önemli olduğu uzak mesafe tespiti için oldukça önemlidir (Eto ve diğerleri, 2022; Yellampalle ve diğerleri, 2015).

Taşınabilir Raman sistemlerinin geliştirilmesi, çeşitli ortamlarda tehlikeli maddelerin gerçek zamanlı analizine olanak tanıyarak saha uygulamalarını da kolaylaştırmıştır. Bu sistemler, 400 metreyi aşan mesafelerde patlayıcıları tespit etme kabiliyetini göstererek güvenlik taraması ve çevresel izlemede kullanım potansiyellerini ortaya koymuştur (Misra ve diğerleri, 2018, 2019). Ayrıca, gelişmiş sinyal işleme tekniklerinin entegrasyonu sinyal-gürültü oranını iyileştirerek zorlu koşullarda bile patlayıcı madde izlerinin tespit edilmesini sağlamıştır (Abdallah ve diğerleri, 2021; Gulati ve diğerleri, 2019).

Raman spektroskopisi enerjik maddelerin tespiti ve tanımlanması için güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Uzaktan hızlı, tahribatsız analiz sağlama yeteneği, uyarma teknikleri ve sinyal işlemedeki ilerlemelerle birleştiğinde, patlayıcı tespiti alanında öncül bir yöntem olarak konumlanmaktadır.

### 4.3.3. Kütle Spektrometresi (MS)

Kütle spektrometrisi, iyonları kütle-yük oranlarına göre tespit eder ve miktarlarını belirler, böylece bozunma ürünlerinin ve reaksiyon ara ürünlerinin tanımlanmasını sağlar. MS'i gaz kromatografisi (GC-MS) gibi tekniklerle birleştirerek, araştırmacılar enerjik malzemelerin ayrışması sırasında üretilen uçucu bileşikleri analiz edebilir, reaktiviteleri ve kararlılıkları hakkında bilgi sunabilir.

Kütle spektrometrisi (MS), patlayıcılar da dahil olmak üzere enerjik maddelerin tespiti ve karakterizasyonu için kritik bir analitik teknik olarak ortaya çıkmıştır. MS'in çok yönlülüğü, özellikle çeşitli iyonizasyon teknikleriyle birleştirildiğinde, bu bileşiklerin çeşitli matrislerde hassas ve seçici bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Ortam iyonizasyon teknikleri, numune hazırlama yöntemleri ve patlayıcı kalıntılarının tespiti ile enerjik maddelerin analizi MS yöntemleri ile birleştirilebilmektedir.

MS alanındaki kayda değer gelişmelerden biri de Gerçek Zamanlı Doğrudan Analiz (DART) ve Desorpsiyon Elektro-Akış Odaklı İyonizasyon (DEFFI) gibi ortam iyonizasyon tekniklerinin geliştirilmesidir. Bu yöntemler, yerinde incelemeler için çok önemli olan kapsamlı numune hazırlığı olmadan patlayıcıların doğrudan yüzeylerden hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Örneğin, DART, nitrogliserin ve pikrik asit de dahil olmak üzere çeşitli patlayıcıların tespitinde başarıyla kullanılmış ve katı substratlardan kalıntıları verimli bir şekilde analiz etme kabiliyetini göstermiştir (Costa ve diğerleri, 2019; Nilles ve diğerleri, 2010). Benzer şekilde, DEFFI hem organik hem de inorganik patlayıcı imzalarını tespit etmede umut vaat ettiğini göstermiş, adli analiz için bir araç sağlamış ve potansiyel olarak cezai soruşturmalara yardımcı olmuştur (Forbes ve diğerleri, 2013; Forbes ve Sisco, 2014).

Bu tekniklere ek olarak, sıvı kromatografisinin kütle spektrometrisi (LC-MS) ile entegrasyonunun toprak ve su gibi karmaşık matrislerdeki patlayıcıların analizi için avantajlı olduğu kanıtlanmıştır. LC-MS, hassas patlayıcı bileşiklerin ayrışmasına yol açabilecek geleneksel gaz kromatografisi yöntemlerine kıyasla tespit limitlerini önemli ölçüde artırarak eser patlayıcıların ayrıştırılmasına ve miktarının belirlenmesine olanak tanımaktadır

(Bünning ve diğerleri, 2021; Sun ve diğerleri, 2011). Çalışmalar, LC-MS kullanarak kirlenmiş toprak örneklerinde nitroaromatik patlayıcıların başarılı bir şekilde tespit edildiğini ve çok düşük konsantrasyon tespit limitlerine ulaşıldığını bildirmiştir (Kober ve diğerleri, 2019). Ayrıca, nitroaromatik patlayıcıların analizi için matris destekli lazer desorpsiyon/iyonizasyon uçuş süresi (MALDI-TOF) kütle spektrometrisi uygulaması araştırılmış ve etkili iyonizasyon ve tespit için matris seçiminin önemi vurgulanmıştır (Kober ve diğerleri, 2019). Matris seçimi, iyonizasyon verimliliğini ve sonuç olarak analizinin hassasiyetini önemli ölçüde etkileyebilir; bu da düşük konsantrasyonlarda patlayıcı kalıntılarıyla uğraşırken kritik öneme sahiptir.

Kağıt Püskürtme Kütle Spektrometresi (PS-MS) gibi yeni iyonizasyon tekniklerinin kullanımı, eser patlayıcıların tespitinde MS'in yeteneklerini genişletmiştir. PS-MS, örnekler üzerinde toplanan analitlerin doğrudan analizine olanak tanıyarak patlayıcı tespitinin hassasiyetini ve güvenilirliğini artırmaktadır (Costa ve diğerleri, 2019). Bu teknik, patlayıcı kalıntılarının hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanmasının çok önemli olduğu adli uygulamalarda özellikle yararlı olmuştur.

Görüldüğü üzere özellikle ortam iyonizasyon tekniklerinin geliştirilmesi ve kromatografik yöntemlerin entegrasyonu yoluyla kütle spektrometresindeki ilerlemeler, enerjik maddelerin tespit ve analizini önemli ölçüde geliştirmiştir. Bu yenilikler sadece patlayıcı tespitinin hassasiyetini ve seçiciliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda adli tıp ve güvenlik uygulamalarında gerekli olan yerinde hızlı analizi de kolaylaştırmaktadır.

#### **4. 4. Reaksiyon Ürünlerinin Ayrıştırılması ve Analizi için Kromatografi**

##### **4.4.1. Gaz Kromatografisi (GC)**

Gaz kromatografisi (GC), kimyasal reaksiyonlar yoluyla hızla enerji açığa çıkarabilen maddeler olan enerjik malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan önemli bir analitik tekniktir. GC'nin bu alandaki uygulaması, genellikle termal olarak kararsız ve bozunmaya karşı hassas olan bu malzemelerin kesin olarak tanımlanması ve miktarının belirlenmesi ihtiyacı nedeniyle özellikle önemlidir.

Enerjik maddelerin gaz kromatografik analizindeki temel zorluklardan biri termal kararsızlıklarıdır. Trinitrotoluen (TNT) ve heksametilentetramin (RDX) gibi birçok enerjik bileşik, GC işlemlerinde tipik olarak kullanılan

yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında bozunabilirler. Bu termal bozulma hatalı sonuçlara ve ilgili analitin kaybına yol açabilir (Corbally ve Freye, 2023). Bu sorunu gidermek için araştırmacılar, termal olarak kararsız bileşiklerin tespitini geliştirmek için GC ile yüksek çözünürlüklü uçuş süresi kütle spektrometresi kullanmak gibi termal bozulmayı en aza indiren metodolojiler geliştirmişlerdir (Corbally ve Freye, 2023). Ayrıca, karmaşık karışımlarda nitroaromatiklerin ve nitraminlerin tespit edilmesine yönelik sensörlerin seçiciliğini ve hassasiyetini artırmak için moleküler baskı tekniklerinin kullanımı araştırılmıştır (Sağlam ve diğerleri, 2018).

Enerjik maddelerin karmaşıklığı, gelişmiş kromatografik teknikleri de gerekli kılmaktadır. Kapsamlı iki boyutlu gaz kromatografisi (GCxGC), enerjik malzemelerin karmaşık karışımlarını ayırmak ve analiz etmek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknik, bu malzemelerin bileşimini ve kararlılığını anlamak için çok önemli olan bireysel bileşenlerin çözünürlüğünü ve tanımlanmasını geliştirmiştir (Wang, 2020). Ayrıca, GC'nin kütle spektrometresi (GC-MS) ile entegrasyonu, enerjik malzemelerin ayrıntılı karakterizasyonuna olanak tanıyarak moleküler yapıları ve bozunma yolları hakkında bilgi sağlamaktadır (Lubrano ve diğerleri, 2015).

Termal kararlılık ve ayırma verimliliğine ek olarak, enerjik malzemelerin fizikokimyasal özellikleri de analizlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ters gaz kromatografisi (IGC), enerjik malzemelerin yüzey özelliklerini ve yapışma olaylarını karakterize etmek için kullanılmış ve diğer maddelerle etkileşimleri hakkında değerli bilgiler sağlamıştır (Ho ve Y. Heng, 2013). Bu teknik, enerjik malzemelerin çeşitli ortamlardaki davranışlarını anlamak için gerekli olan yüzey enerjisi parametrelerinin belirlenmesine olanak tanır (Arsalan ve diğerleri, 2015). IGC'den elde edilen bilgiler, daha kararlı ve etkili enerjik formülasyonların geliştirilmesi için bilgi sağlayabilir.

Birçok enerjik malzemenin polimorfik yapısı karakterizasyon analizlerini zorlaştırmaktadır. Moleküler konformasyon ve istiflemadaki varyasyonlar, performanslarını ve kararlılıklarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (Bu ve diğerleri, 2020). Buradaki polimorfik geçişlerin anlaşılması, gelişmiş özelliklere sahip yeni enerjik malzemelerin geliştirilmesi için hayati önem taşımaktadır ve gaz kromatografisi, termal ve kimyasal davranışların dikkatli bir şekilde analiz edilmesi yoluyla bu geçişlerin aydınlatılmasına yardımcı olabilmektedir (Bu ve diğerleri, 2020).



Gaz kromatografisi enerjik maddelerin incelenmesinde kritik bir analitik araç olarak hizmet etmekte ve termal stabilite, ayırma verimliliği ve fizikokimyasal karakterizasyon ile ilgili konuları ele almaktadır. Gelişmiş kromatografik teknikler ile kütle spektrometrisi ve ters gaz kromatografisi gibi tamamlayıcı yöntemlerin entegrasyonu, bu karmaşık maddeleri etkili bir şekilde analiz etme becerisini geliştirmektedir.

#### 4.4.2. Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC)

Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC), elektro-analiz gibi geleneksel yöntemlere kıyasla gelişmiş hassasiyet ve güvenilirlik sağlayan, enerjik malzemeler alanında kritik bir analitik tekniktir. HPLC'nin enerjik bileşiklerin analizinde, özellikle kalite kontrol ve çevresel izlemede uygulanması son çalışmalarda vurgulanmıştır. Örneğin Chen ve arkadaşları, DAAF'ı (3,3'-Diamino-4,4'-azoxyfurazan) tespit etmek için özel olarak bir HPLC yönteminin geliştirildiğini ve doğrulandığını göstererek, tekniğin enerjik malzeme analizi için üstün hassasiyetini ve güvenilirliğini vurgulamıştır (Chen ve diğerleri, 2020). Bu çalışma itici gazlar ve patlayıcılar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda sentezlenen ve kullanılan enerjik malzemelerin artan karmaşıklığı ve çeşitliliği göz önüne alındığında özellikle önemlidir. HPLC'nin çok yönlülüğü sadece tespitin ötesine geçmekte; ve enerjik malzemelerin karakterizasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, izomerik bileşiklerin ayrılması ve safsızlıkların belirlenmesi, enerjik formülasyonların güvenliğini ve etkinliğini sağlamak için çok önemlidir. Shioji ve arkadaşları, fotodiyot dizi tespiti ve kütle spektrometresi ile HPLC'nin enerjik malzemelerdeki organik safsızlıkları belirlemede etkili olduğunu ve böylece kalite kontrol süreçlerini geliştirdiğini belirtmiştir (Shioji ve diğerleri, 2021). Bu kabiliyet, katı güvenlik ve performans standartlarını karşılaması gereken yeni enerjik malzemelerin geliştirilmesi için gereklidir.

Kalite kontrol ve karakterizasyonun yanı sıra HPLC, yüksek enerji yoğunluklu malzemelerin (HEDM'ler) araştırılması ve geliştirilmesinde de etkilidir. Yüksek oluşum ısıları ve enerjik performanslarıyla bilinen azot bakımından zengin bileşiklerin sentezi, mevcut araştırmaların odak noktasıdır. Örneğin, Yin ve arkadaşları, HPLC'nin bu bileşiklerin sentezini ve saflığını izlemek için kullanılabilmesi için yeni enerjik malzemelerin tasarımında azot bakımından zengin heterosikliklerin önemini vurgulamıştır (Yin ve diğerleri, 2016). HPLC'nin geliştirme sürecine entegrasyonu, ortaya çıkan malzemelerin sadece arzu edilen enerjik özellikleri sergilemesini değil, aynı zamanda pratik uygulamalar için kritik olan bir güvenlik seviyesini de korumasını sağlar.

HPLC enerjik malzemeler alanında vazgeçilmez bir araç olarak hizmet etmekte ve yeni bileşiklerin tespit edilmesini, karakterizasyonunu ve geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Hassas ve güvenilir analizler sağlama yeteneği, savunma, havacılık ve sanayi sektörlerindeki çeşitli uygulamalar için gerekli olan daha güvenli ve daha etkili enerjik malzemeler yaratmayı amaçlayan devam eden araştırmaları desteklemektedir.

## **4. 5. Yapısal Analiz için İleri Görüntüleme ve Teşhis**

### **4.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)**

SEM, enerjik malzemelerin yüzey morfolojisinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini sağlayarak parçacık boyutu, şekli ve yüzey dokusu hakkındaki ayrıntıları ortaya çıkarır. Yüksek yüzey alanlarına sahip daha küçük parçacıklar daha kolay reaksiyona girme eğiliminde olduğundan, bu özellikler yanma hızını ve hassasiyeti etkiler. SEM, ayrışma veya patlamadan önce ve sonra malzemelerin fiziksel özelliklerini incelemek için oldukça önemli bilgiler sağlamaktadır. SEM kokristallerin araştırılmasında ve enerjik malzemelerdeki fiziksel karışımlardan ayırt edilmesinde etkilidir. Wiscons ve Matzger tarafından yapılan çalışma, SEM'in Raman spektroskopisi ve terahertz zaman alanı spektroskopisi gibi diğer tekniklerle birlikte enerjik-enerjik kokristalleri, özellikle de HMX ve TATB kokristalini karakterize etmek için kullanıldığını vurgulamaktadır (Wiscons ve Matzger, 2017). Bu çok yönlü yaklaşım, SEM'in malzeme özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olan tamamlayıcı veriler sağlamadaki öneminin altını çizmektedir.

SEM uygulaması, RDX kristallerinin incelenmesinde gösterildiği gibi, kristal yapıdaki kusurların karakterizasyonuna kadar uzanmaktadır. SEM'den kusur yapılarına ilişkin elde edilen bilgiler, enerjik kompozit malzemelerin modellerini iyileştirebilir ve böylece performanslarıyla ilgili öngörü yeteneklerini geliştirebilir (Bouma ve diğerleri, 2013). Bu husus, kusurların varlığının hassasiyeti ve kararlılığı önemli ölçüde değiştirebildiği yüksek enerji yoğunluklu malzemeler bağlamında özellikle önemlidir.

SEM, morfoloji, kristalografi ve kusur yapıları hakkında kritik bilgiler sağlayarak enerjik malzemelerin karakterizasyonunda vazgeçilmez bir araç olarak hizmet eder. Diğer analitik tekniklerle entegrasyonu, mikroyapısal özellikler ile bu malzemelerin performansı arasındaki ilişkilerin anlaşılmasını geliştirir ve böylece daha güvenli ve daha etkili enerjik bileşiklerin geliştirilmesine katkıda bulunur.

#### 4.5.2. X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), enerjik malzemelerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan kritik bir analitik tekniktir. Bu malzemelerin kristal yapısı, faz bileşimi ve mikroyapısal özellikleri hakkında, itici gazlar ve patlayıcılar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalardaki performanslarını anlamak için hayati önem taşıyan temel bilgiler sağlar. Teknik, kristal bir malzemenin atomik düzlemleri tarafından saçılan X-ışınlarının yapıcı girişim prensibine göre çalışarak kristallik, ortalama tane boyutu ve kristal kafes içindeki kusurların varlığı gibi parametrelerin belirlenmesine olanak tanır (Bunaciu ve diğerleri, 2015; Surdu ve György, 2023).

Enerjik malzemeler bağlamında XRD, çeşitli bileşimleri ve bunların farklı koşullar altındaki yapısal dönüşümlerini analiz etmek için kullanılmıştır. Örneğin, bor bazlı nano-B/NiO termit çalışması, bor partiküllerinin morfolojisini ve kaplamasını doğrulamak için XRD'yi kullanmış ve bunların iyi dağıldığını ve nanokompozit NiO tarafından tamamen kaplandığını ortaya koymuştur (T. Liu ve diğerleri, 2015). Benzer şekilde, Mg bazlı yakıt bakımından zengin itici gazlardan elde edilen katı yanma ürünlerinin karakterizasyonu, yanma sırasında oluşan kristalin fazları tanımlamak için XRD'yi içermektedir; bu da itici gaz formülasyonlarını optimize etmek için çok önemlidir (Huang ve diğerleri, 2012). Ayrıca, patlayıcı maddelerin tespiti, hızlı veri toplama ve gelişmiş tespit yetenekleri sağlayan pikseli enerji çözünürlüklü X-ışını dedektörleri gibi yenilikçi XRD teknikleriyle geliştirilmiştir (O'Flynn ve diğerleri, 2013).

Görüldüğü gibi X-ışını kırınımı, enerjik malzemelerin karakterizasyonunda temel bir araç olarak hizmet etmekte, tasarım ve uygulamalarını bilgilendiren kritik veriler sağlamaktadır. Tekniğin yapısal ayrıntıları ortaya çıkarma yeteneği, yeni itici gaz formülasyonlarının geliştirilmesinden patlayıcı tespit yöntemlerinin iyileştirilmesine kadar bu alandaki ilerlemelerin temelini oluşturmaktadır.

### 5. ENERJİK MALZEME PERFORMANS TESTLERİ

Enerjik malzeme karakterizasyonunda performans testleri patlayıcılar, itici gazlar ve piroteknikler gibi malzemelerin güvenliğini, kararlılığını ve etkinliğini değerlendirmek için çok önemlidir. Aşağıda bu amaçla kullanılan performans testleri açıklanacaktır.

## 5.1. Hassasiyet Testleri

Patlayıcılar için hassasiyet testleri, bir patlayıcı maddenin darbe, sürtünme, ısı veya elektrik boşalması gibi belirli uyaranlar altında patlama olasılığını değerlendirmek için kullanılan kritik prosedürlerdir. Bu testler patlayıcıların çeşitli koşullar altında güvenlik, kararlılık ve performanslarının karakterize edilmesine yardımcı olur. Bu tür değerlendirmeler, patlayıcıların hassasiyet sınıflandırması, taşınması, depolanması ve nakliyesi ve güvenlik düzenlemelerine uygunluğun sağlanması için gereklidir.

### 5.1.1. Darbe Hassasiyeti Testi

Darbe hassasiyeti testleri, patlayıcı maddelerin güvenlik ve kullanım özelliklerinin değerlendirilmesinde çok önemlidir. Bu testler, patlayıcı bir maddenin mekanik darbe altında patlaması veya reaksiyona girmesi olasılığını ölçer ve bu da güvenli depolama ve nakliyenin sağlanması için gereklidir. Darbe hassasiyetini değerlendirmek için çeşitli metodolojiler mevcuttur ve düşme ağırlığı darbe testi en yaygın olanlardan biridir. Düşme ağırlığı darbe testi, %50 patlama olasılığı elde etmek için belirli bir ağırlığın bir numunenin üzerine düşürülmesi gereken yüksekliği belirler ve h%50 değeri olarak adlandırılır. Bu yöntem, patlayıcı hassasiyeti hakkında ampirik veriler sağlamadaki basitliği ve etkinliği nedeniyle yaygın olarak benimsenmiştir. Örneğin, pentaeritrol tetranitrat'ın (PETN) darbe hassasiyeti bu teknik kullanılarak sistematik olarak analiz edilmiş ve numune hazırlama ve çevresel koşullara bağlı olarak hassasiyette önemli farklılıklar ortaya çıkarılmıştır (Cawwell ve Manner, 2019; Marrs ve diğerleri, 2021). Çalışmalar patlayıcının katı veya erimiş formda olması gibi fiziksel durumunun hassasiyetini önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermiştir. Örneğin, eritritol tetranitrat'ın (ETN) toz haline kıyasla erimiş halde daha hassas olduğu tespit edilmiş ve erimiş ETN için darbe hassasiyeti değerleri 0,24 J civarında bildirilmiştir (Lease ve diğerleri, 2019, 2020).

Düşme ağırlığı yöntemine ek olarak, piroteknik bileşimler de dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin darbe hassasiyetini değerlendirmek için BAM (Bundesanstalt für Materialprüfung) yöntemi gibi diğer teknikler de kullanılmıştır. Bu yöntem, sonuçlarda tutarlılık ve güvenilirlik sağlamak için standartlaştırılmış prosedürlere bağlıdır (Manikandan ve Rajesh, 2019). Malzemelerin darbe hassasiyeti, kompozit enerjik malzemelerin hassasiyeti ile ilişkili olduğu gösterilen elastik modül ve yapışma işi gibi mekanik özelliklerinden de etkilenebilmektedir (Wickham ve diğerleri, 2020). Ayrıca,

moleküler yapı ve darbe hassasiyeti arasındaki ilişki kuantum mekaniksel yöntemlerle araştırılmış ve belirli yapısal özelliklerin hassasiyet sonuçlarını tahmin edebileceği öne sürülmüştür (Edwards ve diğerleri, 2004; Zhao ve diğerleri, 2006). Enerjik moleküllerdeki yük dağılımı ile bunların darbeye karşı hassasiyetleri arasındaki korelasyon araştırılmış ve mekanik stres altında patlayıcı davranışını yöneten altta yatan mekanizmalar hakkında bilgi sağlanmıştır (Rice ve Hare, 2002).

Darbe hassasiyeti testleri, patlayıcı madde araştırmaları alanında hayati bir araç olarak hizmet etmekte ve güvenlik protokolleri ile taşıma prosedürlerini bilgilendiren temel veriler sağlamaktadır. Test metodolojilerinin sürekli olarak iyileştirilmesi ve ileri analitik tekniklerin entegrasyonu, patlayıcı hassasiyeti anlayışımızı geliştirmeye devam etmekte ve sonuçta bu malzemelerin kullanımında daha güvenli uygulamalara katkıda bulunmaktadır.

### 5.1.2. Sürtünme Hassasiyeti Testi

Sürtünme hassasiyeti testleri, özellikle patlayıcılar ve itici gazlar bağlamında, enerjik malzemelerin güvenliği ve kullanımının değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Bu testler, malzemelerin belirli koşullar altında tutuşmaya veya patlamaya yol açabilecek sürtünme kuvvetlerine tepkisini ölçer.

Çeşitli çalışmalar, farklı formülasyon ve malzemelerdeki sürtünme hassasiyetini anlamının önemini vurgulamıştır. Rotariu ve arkadaşları tarafından yapılan önemli bir çalışma, yeni bir kompozit patlayıcı olan HMX-AAc/EtAc'nin sürtünme hassasiyetinin BAM Sürtünme Test Cihazı kullanılarak test edildiğini ve 360 N maksimum yüklerde bile tutuşma olmadığını göstererek sürtünmeye karşı düşük bir hassasiyet olduğunu ortaya koymuştur (Rotariu ve diğerleri, 2023). Bu bulgu, daha güvenli patlayıcı formülasyonlarının geliştirilmesi için çok önemlidir. Benzer şekilde, Hoque ve arkadaşları aktif bağlayıcı bazlı formülasyonların pasif bağlayıcı formülasyonlarına kıyasla daha yüksek sürtünme hassasiyeti sergilediğini ve farklı bileşimler için spesifik hassasiyet değerlerinin rapor edildiğini tespit ederek formülasyonun sürtünme hassasiyeti üzerindeki etkisini vurgulamıştır (Hoque ve diğerleri, 2020).

Sürtünme hassasiyetinin arkasındaki mekanizmalar, Warner ve arkadaşlarının sürtünme kuvvetlerine maruz kalmanın enerjik malzemelerde nasıl sıcak noktalar oluşturabileceğini ve potansiyel olarak reaksiyonlara yol açabileceğini tartışan çalışmalarında daha da açıklığa kavuşturulmuştur. Bu

durum, bu malzemeler için güvenli kullanım uygulamalarının bir parçası olarak sürtünme hassasiyeti testlerinin gerekliliğinin altını çizmektedir (Warner ve diğerleri, 2014).

### 5.1.3. Elektrostatik Deşarj (ESD) Hassasiyet Testi

Elektrostatik Deşarj (ESD) hassasiyet testi, özellikle elektronik, piroteknik ve malzeme bilimi gibi alanlarda çeşitli malzeme ve cihazların güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamanın kritik bir yönüdür. Elektrostatik deşarj yıkıcı arızalara yol açabilir, bu da malzemelerin bu tür deşarjlara karşı hassasiyetinin ölçülmesini gerekli kılar.

ESD hassasiyetini değerlendirmek için kullanılan başlıca yöntemlerden biri, IEC 61000-4-2 standardında belirtildiği gibi standartlaştırılmış test protokollerinin kullanılmasını içerir. Bu standart, cihazların ESD olaylarına duyarlılığını değerlendirmek için deşarj voltajları ve mesafeleri dahil olmak üzere test koşullarını belirtmektedir (Y. Cao ve diğerleri, 2010). Siegert ve arkadaşları nanotermit kompozitlerin hassasiyetini ölçmek için 4 ila 10 kV arasında değişen deşarj voltajlarına sahip bir ESD test cihazı kullanmış ve ateşleme için gereken minimum gerilimi belirlemek için net bir metodoloji sağlamıştır (Siegert ve diğerleri, 2010).

Enerjik malzemeler bağlamında, ESD'ye karşı hassasiyet malzemelerin bileşimine ve yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Örneğin Gibot ve Goetz, polianilin gibi iletken polimerlerin alüminyum/silikon dioksit termit kompozitlerine dahil edilmesinin ESD hassasiyet eşiklerini etkili bir şekilde yükseltebileceğini ve böylece kullanım sırasında erken tutuşmayı önleyebileceğini göstermiştir (Gibot ve Goetz, 2020). Bu bulgu, ESD risklerini azaltmada malzeme tasarımının önemini vurgulamaktadır.

Çeşitli formülasyonların ESD'ye duyarlılığı kapsamlı bir şekilde akademik çalışmalarla incelenmiştir. Moretti ve arkadaşları, yeni bir çevre dostu duman formülasyonunun ESD hassasiyetini geleneksel piroteknik malzemelerle karşılaştırmış ve tutuşma eşiklerinde önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur (Moretti ve diğerleri, 2013). Bu karşılaştırma piroteknik ve ilgili uygulamalarda daha güvenli alternatifler geliştirmek için hayati önem taşımaktadır. Weir ve arkadaşlarının kompozit enerjik malzemelerin elektrik iletkenliğine ilişkin bulguları, malzeme özelliklerinin ESD hassasiyetini nasıl etkileyebileceğine dair içgörü sağlamaktadır ve bu da daha güvenli enerjik sistemlerin geliştirilmesi için çok önemlidir (Weir ve diğerleri, 2013).

ESD hassasiyet testi, malzeme özelliklerinin, çevresel koşulların ve standartlaştırılmış test metodolojilerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektiren çok yönlü bir alandır. Çeşitli çalışmalardan elde edilen bulguların entegrasyonu, elektrostatik deşarja eğilimli uygulamalarda malzemelerin güvenliğini ve güvenilirliğini artırmak için sürekli araştırma ve geliştirmenin önemini vurgulamaktadır

## 5.2. Yaşlandırma Testi

Patlayıcıların yaşlanması, özellikle güvenlik, çevresel etki ve performans özellikleri üzerindeki etkileri nedeniyle kritik bir araştırma alanıdır. Patlayıcılar için yaşlandırma testleri, çeşitli çevresel koşullar altında enerjik malzemelerin uzun vadeli kararlılığını, güvenliğini ve performansını değerlendirmek için gereklidir. Bu testler patlayıcıların hizmet ömrünü tahmin etmeye ve zaman içinde güvenilirliklerini sağlamaya yardımcı olur.

Çeşitli çalışmalar yaşlanmanın patlayıcıların toksisite, mekanik bütünlük ve reaksiyon özellikleri de dahil olmak üzere özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmıştır. Önemli bir bulgu, patlayıcıların ayrışması ve yaşlanmasının toksisitenin artmasına yol açabileceğidir. Kuperman ve arkadaşları 2,4,6-trinitrotoluenin (TNT) toprakta yaşlanmasının çömlek kurdu (*Enchytraeus crypticus*) üzerindeki toksisitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Kuperman ve diğerleri, 2005). Bu bulgu, topraktaki yaşlandırılmış TNT'nin farklı trofik seviyelerdeki organizmalarda subletal toksisite ve alım sergilediğini bildiren ve yaşlandırılmış patlayıcıların oluşturduğu çevresel riskleri vurgulayan Best ve arkadaşları tarafından da desteklenmektedir (H. Best ve diğerleri, 2008). Bahsedilen çalışmalar, çevresel etki zaman içinde artabileceğinden, patlayıcılar için risk değerlendirmelerinde yaşlanmanın dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Çevresel toksisiteye ek olarak, patlayıcıların mekanik özellikleri de yaşlanmayla birlikte değişir. Ma'nın 2,4-dinitroanisol (DNAN) bazlı eriyik döküm patlayıcılar üzerine yaptığı araştırma, yaşlanmanın düşük hızlı darbe koşulları altında hasar özelliklerini ve reaksiyon özelliklerini etkilediğini göstermiştir (Ma, 2023). Çalışmada, yaşlanmış patlayıcıların parçalanma ve tutuşma hızını değerlendirmek için kurum içi bir darbe cihazı kullanılmış ve yaşlanmanın patlayıcı performansını nasıl etkilediğine dair kritik bilgiler ortaya çıkarılmıştır. Yaşlanma sürecinin anlaşılması daha iyi taşıma ve depolama uygulamalarına ışık tutabileceğinden, bu durum özellikle güvenlik protokolleri için önemlidir.

Patlayıcıların yaşlanması çevresel toksisite, mekanik bütünlük ve performans özelliklerini kapsayan çok yönlü bir konudur. Çeşitli çalışmalardan elde edilen bulgular, yaşlanmanın patlayıcılar üzerindeki etkilerini anlamak için devam eden araştırmaların gerekliliğinin altını çizmektedir; bu da güvenlik uygulamaları ve çevresel yönetim stratejileri hakkında bilgi verebilir.

### 5. 3. Performans Testleri

Patlayıcıların performans testleri, etkinliklerini, güvenliklerini ve çeşitli uygulamalar için uygunluklarını değerlendirmek için gereklidir. Bu testler patlama hızı, basınç ve enerji çıkışı gibi parametreleri değerlendirerek hem askeri hem de sivil kullanımlar için kritik veriler sağlar. Enerjik malzemeler için temel performans testlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

*-Patlama Hızı Ölçümü:* Patlama dalgasının patlayıcı madde boyunca ilerleme hızını belirleyerek patlayıcının sertliğini veya parçalanma kapasitesini gösterir. Patlama cephesinin bilinen bir mesafeyi kat etmesi için geçen süreyi ölçmek için çizgi kameralar veya elektronik zamanlama cihazları gibi yüksek hızlı teşhis cihazları kullanır.

*-Patlama Basıncı Değerlendirmesi:* Patlama sırasında oluşan tepe basıncını değerlendirerek patlayıcının metal kesme veya yıkım gibi işleri gerçekleştirme kabiliyetini etkiler. Patlama olayları sırasında basınç-zaman profillerini yakalamak için belirli yerlere yerleştirilmiş basınç transdüserleri kullanır.

*-Silindir Genleşme Testi:* Patlayıcı ile doldurulmuş metal bir silindirin genleşmesini gözlemleyerek bir patlayıcının enerji çıkışını ve iş kapasitesini değerlendirir. Silindirik bir metal kabuk patlayıcı ile yüklenir ve patlatılır; performans özelliklerini çıkarmak için genişleme derecesi ve parçalanma modelleri analiz edilir.

*-Kritik Çap Belirleme:* Patlayıcının çeşitli konfigürasyonlardaki davranışını anlamak için çok önemli olan, sabit bir patlama dalgasının yayılabileceği en küçük çapı tanımlar. Kararlı patlamayı destekleyen minimum boyutu belirlemek için çeşitli çaplardaki patlayıcıların test edilmesini içerir.

Yukarıda sayılan performans testleri aşağıda sıralanan çeşitli standartlardaki metotlarla gerçekleştirilmektedir.

**MIL-STD-1751A:** Bir savunma bakanlığı standardı olarak, patlayıcıların kalifikasyonu için güvenlik ve performans testlerini ana hatlarıyla belirtir ve darbe hassasiyeti, sürtünme hassasiyeti ve termal stabilite değerlendirmeleri için prosedürleri detaylandırır.



**STANAG 4170:** Askeri kullanım için patlayıcı maddelerin kalifikasyonuna yönelik ilke ve metodolojileri belirleyen, üye ülkeler arasında birlikte çalışabilirliği ve güvenliği sağlayan bir NATO standardıdır.

**AOP-62:** Patlayıcıların zaman içindeki kararlılığını ve güvenilirliğini izlemek için performans testleri de dahil olmak üzere mühimmatların hizmet içi gözetimi hakkında genel rehberlik sağlamaktadır.

Bu standartlar patlayıcılar üzerinde performans testleri yapmak, çeşitli uygulamalarda etkinliklerini ve güvenliklerini sağlamak için ayrıntılı metodolojiler ve kılavuzlar sunmaktadır.

#### 5. 4. Mekanik Özellikler Testleri

Patlayıcıların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi, çeşitli uygulamalarda güvenlik, güvenilirlik ve performanslarının sağlanması için çok önemlidir. Bu özellikler patlayıcıların taşınması, depolanması ve konuşlandırılması sırasında mekanik gerilimlere nasıl tepki vereceğini etkiler. Bu özellikleri değerlendirmek için standartlaştırılmış testler ve metodolojiler geliştirilmiştir. Temel mekanik özellikler ve test yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

*-Tek Eksenli Çekme Testi:* Patlayıcı malzemelerin gerilme mukavemetini, uzamasını ve elastikiyet modülünü belirler. NATO'nun STANAG 4506'sı patlayıcı malzemeler üzerinde tek eksenli çekme testlerinin yapılmasına ilişkin prosedürleri özetlemektedir.

*-Gerilim Gevşeme Testi:* Sabit gerilme altında gerilmeye zamana bağlı azalmayı değerlendirerek viskoelastik davranış hakkında bilgi sağlar. NATO'nun STANAG 4507'si patlayıcılar üzerinde stres gevşeme testlerinin yapılmasına ilişkin metodolojiyi açıklamaktadır.

*-Termomekaniksel Analiz (TMA):* Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak patlayıcıların boyutsal değişimlerini ölçer, termal genleşme ve büzülmenin anlaşılmasına yardımcı olur. STANAG 4525 patlayıcı maddeler üzerinde TMA yürütmek için kılavuz ilkeler sağlamaktadır.

*-Dinamik Mekaniksel Analiz (DMA):* Depolama modülü, kayıp modülü ve sönümlenme özellikleri gibi özellikleri belirleyerek malzemenin dinamik yüklemeye tepkisini değerlendirir. Değişken frekanslar ve sıcaklıklar altındaki davranışlarını değerlendirmek için polimer bağlı patlayıcılar için yaygın olarak kullanılır.

## 5. 5. Çevresel Testler

Enerjik malzeme çevresel testleri, çeşitli koşullar altında onların güvenliklerini, güvenilirliklerini ve performanslarını sağlamak için gereklidir. Bu testler patlayıcıların sıcaklık, nem, titreşim ve mekanik şok gibi çevresel faktörlere nasıl tepki verdiğini değerlendirir. Buradaki test prosedürleri çeşitli standartlarla ve kılavuzlarla belirlenmiştir. Aşağıda bu standartlar sıralanmıştır.

**-MIL-STD-810:** Çevre Mühendisliği Değerlendirmeleri ve Laboratuvar Testleri

MIL-STD-810 ABD askeri standardı, çevresel stresler altında malzeme ve ekipmanların test edilmesi için kapsamlı yöntemleri açıklamaktadır. Düşük Basınç (Rakım), Yüksek Sıcaklık, Düşük Sıcaklık, Sıcaklık Şoku, Sıvılar Tarafından Kontaminasyon, Güneş Radyasyonu (Güneş Işığı), Titreşim, Akustik Gürültü gibi patlayıcılarla ilgili test yöntemlerini içerir.

**-NATO AOP-7:** Bu standart patlayıcı maddelerin nitelendirilmesi için standartlaştırılmış test prosedürlerini özetlemektedir. Çeşitli koşullar altında patlayıcıların kararlılığını ve performansını değerlendirmek için çevresel testleri içermektedir.

**-AECTP-300:** İklimsel Çevre Testleri

Müttefik Çevre Koşulları ve Test Prosedürlerinin bir parçası olan AECTP-300, iklimsel ortamların savunma malzemeleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sıcaklık, nem ve güneş radyasyonu dahil olmak üzere iklimsel testler için yönergeler sağlamaktadır.

**-AECTP-400:** Mekanik Çevresel Testler

Bu standart, mekanik gerilimlerin patlayıcıların güvenliğini ve işlevselliğini nasıl etkilediğini belirlemek için titreşim ve şok gibi mekanik testlere yönelik prosedürler sunmaktadır.

**-AOP-15:** AOP-15, mühimmatların beklenen hizmet koşulları altında güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamak için çevresel test protokolleri de dahil olmak üzere mühimmatların güvenlik ve hizmete uygunluğunun değerlendirilmesine ilişkin rehberlik sağlamaktadır.

**-DOE-STD-1212-2019:** Enerji Bakanlığı teknik standardı olarak, patlayıcıların güvenlikten ödün vermeden çeşitli çevresel streslere dayanabilmesini sağlamak için çevresel testler de dahil olmak üzere patlayıcılar için güvenlik gereksinimlerini özetlemektedir.

Bu standartlar ve yayınlar, patlayıcılar üzerinde çevresel testler yapmak için temel referanslar olarak hizmet etmekte ve çeşitli koşullar altında güvenlik ve performans kriterlerini karşılamalarını sağlamaktadır. Bu testler, enerjik malzemelerin güvenliğini ve güvenilirliğini sağlamak için kontrollü koşullar altında gerçekleştirilir ve bu maddelerin yüksek riskli doğası nedeniyle genellikle özel tesisler gerektirir.

Kitabımızın bu bölümünde yukarıda bahsedilmiş olan her bir karakterizasyon yöntemi, enerjik bir malzemenin özelliklerinin belirli yönlerine ilişkin benzersiz bilgiler sunmaktadır. Araştırmacılar bu teknikleri birleştirerek malzemenin kararlılığı, hassasiyeti, reaksiyon yolları ve enerji salınımı hakkında kapsamlı bilgiler ederler. Bu birleştirilmiş yaklaşımlar güvenlik, performans ve çevre standartlarını karşılayan malzemelerin geliştirilmesi ve optimize edilmesi için son derece önemli ve gereklidir.

Bahsedilen tüm karakterizasyon teknikleri, termokimyasal özelliklerinden fiziksel yapılarına ve reaktivitelerine kadar enerjik malzemeleri analiz etmek için hayati önem taşımaktadır. Bu yöntemler daha güvenli, daha etkili bileşiklerin geliştirilmesini destekleyerek, araştırmacılara enerjik malzemeleri belirli uygulamalar için özelleştirmelerine olanak tanımakta ve çalışma risklerinin en aza indirilmesini sağlamaktadırlar.

**KAYNAKÇA**

- Abdallah, A., Mahmoud, A. E., Mokhtar, M., Mousa, A., Elbasha, Y. H., & Hs, A. (2021). *Raman Spectroscopic and Advanced Signal Processing Analyses for Real Time Standoff Detection and Identification of Explosives*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-426964/v1>
- Agrawal, J. P., & Hodgson, R. D. (2006). *Organic Chemistry of Explosives*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470059364>
- Akhavan, J. (2004). *The Chemistry of Explosives* (Second). RSC Paperbac.
- Arsalan, N., Buiting, J., & Nguyen, Q. P. (2015). Surface Energy and Wetting Behavior of Reservoir Rocks. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.11.024>
- Banaś, K., Banaś, A., Moser, H. O., Bahou, M., Wen, L., Yang, P., Cholewa, M., & Lim, S. (2010). Multivariate Analysis Techniques in the Forensics Investigation of the Postblast Residues by Means of Fourier Transform-Infrared Spectroscopy. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/ac100115r>
- Bird, J. O., & Chives, P. J. (1993). *Newnes Engineering and Physical Science Pocket Book*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06543-7>
- Bouma, R. H. B., Duvalois, W., & Van Der Heidjen, A. E. D. M. (2013). Microscopic characterization of defect structure in RDX crystals. *Journal of Microscopy*, 252(3), 263–274. <https://doi.org/10.1111/jmi.12088>
- Brinck, T., & Rahm, M. (2014). Theoretical Design of Green Energetic Materials: Predicting Stability, Detection, Synthesis and Performance. In *Green Energetic Materials* (pp. 15–44). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118676448.ch02>
- Bu, R., Li, H., & Zhang, C. (2020). Polymorphic Transition in Traditional Energetic Materials: Influencing Factors and Effects on Structure, Property, and Performance. *Crystal Growth & Design*. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00233>
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Bünning, T. H., Strehse, J. S., Hollmann, A. C., Bötticher, T., & Maser, E. (2021). A Toolbox for the Determination of Nitroaromatic Explosives in

Marine Water, Sediment, and Biota Samples on Femtogram Levels by GC-MS/MS. *Toxics*. <https://doi.org/10.3390/toxics9030060>

Cao, W., Song, Q., Gao, D., Han, Y., Xu, S., Lu, X., & Guo, X. (2019). Detonation Characteristics of an Aluminized Explosive Added with Boron and Magnesium Hydride. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 44(11), 1393–1399. <https://doi.org/10.1002/prop.201900164>

Cao, Y., Johnsson, D., Arndt, B., & Stecher, M. (2010). A TLP-based Human Metal Model ESD-generator for Device Qualification According to IEC 61000-4-2. <https://doi.org/10.1109/apemc.2010.5475621>

Cawkwell, M., & Manner, V. W. (2019). Ranking the Drop-Weight Impact Sensitivity of Common Explosives Using Arrhenius Chemical Rates Computed From Quantum Molecular Dynamics Simulations. *The Journal of Physical Chemistry A*. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.9b10808>

Chen, J., Ding, H., Li, J., Chen, Y., Liu, Y., & Zhao, X. (2020). Development and Validation of HPLC Method for DAAF and its Applications in Quality Control and Environmental Monitoring. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 45(10), 1580–1589. <https://doi.org/10.1002/prop.202000018>

Conkling, J. A., & Mocella, C. J. (2019). *Chemistry of Pyrotechnics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429262135>

Corbally, M. A., & Freye, C. E. (2023). Development of a Gas Chromatography With High-Resolution Time-of-Flight Mass Spectrometry Methodology for BDNPA/F. *Acs Omega*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03382>

Costa, C., Es, E. M. van, Sears, P., Bunch, J., Palitsin, V., Mosegaard, K., & Bailey, M. J. (2019). Exploring Rapid, Sensitive and Reliable Detection of Trace Explosives Using Paper Spray Mass Spectrometry (PS-MS). *Propellants Explosives Pyrotechnics*. <https://doi.org/10.1002/prop.201800320>

Edwards, J., Eybl, C., & Johnson, B. J. (2004). Correlation Between Sensitivity and Approximated Heats of Detonation of Several Nitroamines Using Quantum Mechanical Methods. *International Journal of Quantum Chemistry*. <https://doi.org/10.1002/qua.20235>

Ehlerding, A., Johansson, I., Wallin, S., & Östmark, H. (2012). Resonance-Enhanced Raman Spectroscopy on Explosives Vapor at Standoff Distances. *International Journal of Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1155/2012/158715>

Eto, S., Ichikawa, Y., Ogita, M., Sugimoto, S., & Asahi, I. (2022). Standoff

Detection System Using Raman Spectroscopy in the Deep-Ultraviolet Wavelength Region for the Detection of Hazardous Gas. *Applied Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1177/00037028221094632>

Forbes, T. P., Brewer, T. M., & Gillen, G. (2013). Desorption Electro-Flow Focusing Ionization of Explosives and Narcotics for Ambient Pressure Mass Spectrometry. *The Analyst*. <https://doi.org/10.1039/c3an01164j>

Forbes, T. P., & Sisco, E. (2014). Mass Spectrometry Detection and Imaging of Inorganic and Organic Explosive Device Signatures Using Desorption Electro-Flow Focusing Ionization. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/ac501718j>

Gao, H., Zhang, Q., & Shreeve, J. M. (2020). Fused Heterocycle-Based Energetic Materials (2012–2019). *Journal of Materials Chemistry A*. <https://doi.org/10.1039/c9ta12704f>

Gibot, P., & Goetz, V. (2020). SnO<sub>2</sub>-polyaniline Composites for the Desensitization of Al/SnO<sub>2</sub> Thermite Composites. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.48947>

Gulati, K. K., Gulia, S., Gambhir, T., Kumar, N., Gambhir, V., & Reedy, M. N. (2019). Standoff Detection and Identification of Explosives and Hazardous Chemicals in Simulated Real Field Scenario Using Time Gated Raman Spectroscopy. *Defence Science Journal*. <https://doi.org/10.14429/dsj.69.13234>

Guo, D., & An, Q. (2018). Thermal Stability and Detonation Properties of Potassium 4,4'-Bis(dinitromethyl)-3,3'-Azofurazanate, an Environmentally Friendly Energetic Three-Dimensional Metal–Organic Framework. *Acs Applied Materials & Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19611>

Güven, B., Eryılmaz, M., Üzer, A., Boyacı, I. H., Tamer, U., & Apak, R. (2017). Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Combined With Gold Nanorods for the Simultaneous Quantification of Nitramine Energetic Materials. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/c7ra05844f>

H. Best, E. P., Tatem, H. E., Geter, K. N., Wells, M. L., & Lane, B. (2008). Effects, Uptake, and Fate of 2,4,6-trinitrotoluene Aged in Soil in Plants and Worms. *Environmental Toxicology and Chemistry*. <https://doi.org/10.1897/08-017.1>

Ho, R., & Y. Heng, J. Y. (2013). A Review of Inverse Gas Chromatography and Its Development as a Tool to Characterize Anisotropic Surface Properties

of Pharmaceutical Solids. *Kona Powder and Particle Journal*. <https://doi.org/10.14356/kona.2013016>

Hoque, E., Pant, C. S., & Das, S. K. (2020). Study on Friction Sensitivity of Passive and Active Binder Based Composite Solid Propellants and Correlation With Burning Rate. *Defence Science Journal*. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14802>

Huang, H., Zou, M., Guo, X., Yang, R., & Zhang, P. (2012). Analysis of the Solid Combustion Products of a Mg-Based Fuel-Rich Propellant used for Water Ramjet Engines. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 37(4), 407–412. <https://doi.org/10.1002/prop.201100127>

Jiang, J., Xia, Q.-Y., Xu, S.-Y., Zhao, F.-Q., & Ju, X.-H. (2024). Evaluating shock sensitivity and decomposition of energetic materials by ReaxFF molecular dynamics. *Journal of Materials Science*, 59(1), 114–129. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-09179-8>

Knurr, B. J., & Hauri, J. F. (2020). An Alternative to Recycling: Measurement of Combustion Enthalpies of Plastics via Bomb Calorimetry. *Journal of Chemical Education*, 97(5), 1465–1469. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00076>

Kober, S., Hollert, H., & Frohme, M. (2019). Quantification of Nitroaromatic Explosives in Contaminated Soil Using MALDI-TOF Mass Spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01976-y>

Kubota, N. (2015). *Propellants and Explosives*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527693481>

Kuperman, R. G., Checkai, R. T., Simini, M., Phillips, C. T., Kolakowski, J. E., & Kurnas, C. W. (2005). Weathering and Aging of 2,4,6-trinitrotoluene in Soil Increases Toxicity to Potworm *Enchytraeus Crypticus*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. <https://doi.org/10.1897/04-513r.1>

Larsson, I., Lönnermark, A., Blomqvist, P., Persson, H., & Bohlén, H. (2017). Development of a Screening Test Based on Isothermal Calorimetry for Determination of Self-heating Potential of Biomass Pellets. *Fire and Materials*. <https://doi.org/10.1002/fam.2427>

Lease, N., Kay, L. M., Brown, G. W., Chávez, D. E., Leonard, P. W., Robbins, D., & Manner, V. W. (2019). Modifying Nitrate Ester Sensitivity Properties

Using Explosive Isomers. *Crystal Growth & Design*.  
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01062>

Lease, N., Kay, L. M., Brown, G. W., Chávez, D. E., Robbins, D., C. Byrd, E. F., Imler, G. H., Parrish, D. A., & Manner, V. W. (2020). Synthesis of Erythritol Tetranitrate Derivatives: Functional Group Tuning of Explosive Sensitivity. *The Journal of Organic Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.9b03344>

Liu, T., Chen, X., Xu, H., Han, A., Ye, M., & Pan, G. (2015). Preparation and Properties of Boron-Based Nano-B/NiO Thermite. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 40(6), 873–879. <https://doi.org/10.1002/prep.201400308>

Liu, Y.-S., Ugaz, V. M., North, S. W., Rogers, W. J., & Mannan, M. S. (2007). Development of a miniature calorimeter for identification and detection of explosives and other energetic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 142(3), 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.050>

Lubrano, A. L., Field, C. R., Newsome, G. A., Rogers, D., Giordano, B. C., & Johnson, K. (2015). Minimizing Thermal Degradation in Gas Chromatographic Quantitation of Pentaerythritol Tetranitrate. *Journal of Chromatography A*. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.03.006>

Ma, T. (2023). Effect of Aging on Damage Properties and Reaction Characteristics of Typical 2,4-dinitroanisole (DNAN)-based Melt-cast Explosives Under Low-velocity Impact. *Propellants Explosives Pyrotechnics*. <https://doi.org/10.1002/prep.202300094>

Manikandan, R., & Rajesh, S. (2019). Fabrications of Effluence Free Fire Cracker Using Pyrotechnic Chemical Composition. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. <https://doi.org/10.35940/ijeat.a1045.1291s419>

Marrs, F. W., Manner, V. W., Burch, A. C., Yeager, J. D., Brown, G. W., Kay, L. M., Buckley, R. T., Anderson-Cook, C. M., & Cawkwell, M. (2021). Sources of Variation in Drop-Weight Impact Sensitivity Testing of the Explosive Pentaerythritol Tetranitrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c06294>

Melius, C. F. (1990). Thermochemical Modeling: I. Application to Decomposition of Energetic Materials. In *Chemistry and Physics of Energetic Materials* (pp. 21–49). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-2035-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-009-2035-4_3)



Meyer, R., Köhler, J., & Homburg, A. (2002). *Explosives*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/3527600515>

Misra, A. K., Acosta-Maeda, T. E., Porter, J. N., Berlanga, G., Muchow, D., Sharma, S. K., & S. Chee, B. J. (2018). A Two Components Approach for Long Range Remote Raman and Laser-Induced Breakdown (LIBS) Spectroscopy Using Low Laser Pulse Energy. *Applied Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1177/0003702818812144>

Misra, A. K., Acosta-Maeda, T. E., Porter, J. N., Egan, M. J., Sandford, M., Oyama, T., & Zhou, J. (2019). Remote Raman Detection of Chemicals From 1752 m During Afternoon Daylight. *Applied Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1177/0003702819875437>

Moretti, J. D., Sabatini, J. J., Gordon Shaw, A. P., Chen, G., Gilbert, R. A., & Oyler, K. D. (2013). Prototype Scale Development of an Environmentally Benign Yellow Smoke Hand-Held Signal Formulation Based on Solvent Yellow 33. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/sc400073p>

Moros, J., Lorenzo, J. A., Lucena, P., Tobarria, L. M., & Laserna, J. J. (2010). Simultaneous Raman Spectroscopy–Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Instant Standoff Analysis of Explosives Using a Mobile Integrated Sensor Platform. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/ac902470v>

Moxnes, J. F., Jensen, T. L., & Unneberg, E. (2013). Energetic measures of effectiveness. *Advanced Studies in Theoretical Physics*, 7, 207–228. <https://doi.org/10.12988/astp.2013.13020>

Muravyev, N. V., Gorn, M. V., Melnikov, I. N., Monogarov, K. A., Korsunskii, B. L., Dalinger, I. L., Pivkina, A. N., & Kiselev, V. G. (2022). Autocatalytic decomposition of energetic materials: interplay of theory and thermal analysis in the study of 5-amino-3,4-dinitropyrazole thermolysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24(26), 16325–16342. <https://doi.org/10.1039/D1CP04663B>

Muravyev, N. V., Monogarov, K. A., Melnikov, I. N., Pivkina, A. N., & Kiselev, V. G. (2021). Learning to fly: thermochemistry of energetic materials by modified thermogravimetric analysis and highly accurate quantum chemical calculations. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23(29), 15522–15542. <https://doi.org/10.1039/D1CP02201F>

Myint, P. C., McClelland, M. A., & Nichols, A. L. (2016). Application of the

Peng–Robinson Equation of State to Energetic Materials RDX and TNT: Pure Components, Liquid Mixtures, and Solid Mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04808>

Nazarian, A., & Presser, C. (2022). Thermochemical Analysis of Improvised Energetic Materials by Laser-Heating Calorimetry. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4103375>

Nilles, J. M., Connell, T. R., Stokes, S. T., & Durst, H. D. (2010). Explosives Detection Using Direct Analysis in Real Time (DART) Mass Spectrometry. *Propellants Explosives Pyrotechnics*. <https://doi.org/10.1002/prop.200900084>

O’Flynn, D., Reid, C. B., Christodoulou, C., Wilson, M. D., Veale, M. C., Seller, P., Hills, D., Desai, H., Wong, B., & Speller, R. (2013). Explosive detection using pixellated X-ray diffraction (PixD). *Journal of Instrumentation*, 8(03), P03007–P03007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/03/P03007>

Osmont, A., & Lefrancois, A. (2022). *Overview of energetic materials* (pp. 3–27). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822971-2.00011-5>

Rice, B. M., & Hare, J. J. (2002). A Quantum Mechanical Investigation of the Relation Between Impact Sensitivity and the Charge Distribution in Energetic Molecules. *The Journal of Physical Chemistry A*. <https://doi.org/10.1021/jp012602q>

Rotariu, T., Moldovan, A. E., Toader, G., Diacon, A., Rusen, E., Gingham, R. E., Iorga, O., Botiș, H. R., & Klapötke, T. M. (2023). “Green” PBX Formulations Based on High Explosives (RDX and HMX) and Water-Soluble pH-Sensitive Polymeric Binders. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym15071790>

Sağlam, Ş., Üzer, A., Erçağ, E., & Apak, R. (2018). Electrochemical Determination of TNT, DNT, RDX, and HMX With Gold Nanoparticles/Poly(Carbazole-Aniline) Film–Modified Glassy Carbon Sensor Electrodes Imprinted for Molecular Recognition of Nitroaromatics and Nitramines. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.8b00715>

Shaw, R. W., Brill, T. B., & Thompson, D. L. (2005). *Overviews of Recent Research on Energetic Materials*. World Scientific Publishing Company.

Shioji, H., Uematsu, A., Onoda, M., Matsuda, K., Sawada, K., Kitagawa, S., & Ohtani, H. (2021). P-97: Separation of Isomeric OLED Materials Using Ion

Mobility-Mass Spectrometry (IM-MS). *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 52(1), 1444–1447. <https://doi.org/10.1002/sdtp.14980>

Siegert, B., Comet, M., Muller, O., Pourroy, G., & Spitzer, D. (2010). Reduced-Sensitivity Nanothermites Containing Manganese Oxide Filled Carbon Nanofibers. *The Journal of Physical Chemistry C*. <https://doi.org/10.1021/jp1014737>

Singh, A., Soni, P. K., Sarkar, C., & Mukherjee, N. (2019). Thermal reactivity of aluminized polymer-bonded explosives based on non-isothermal thermogravimetry and calorimetry measurements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136(3), 1021–1035. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7730-9>

Sun, Q., Chen, Z., Yuan, D., Yu, C.-P., Megharaj, M., & Naidu, R. (2011). On-Line SPE Coupled With LC–APCI–MS for the Determination of Trace Explosives in Water. *Chromatographia*. <https://doi.org/10.1007/s10337-011-1964-z>

Surdu, V.-A., & György, R. (2023). X-ray Diffraction Data Analysis by Machine Learning Methods—A Review. *Applied Sciences*, 13(17), 9992. <https://doi.org/10.3390/app13179992>

Tarchoun, A. F. (2023). New Insights Into the Chemical Compatibility of Nitrochitosan With Potential Energetic Molecules. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr11113060>

Tripathi, A., Emmons, E. D., Wilcox, P. G., Guicheteau, J. A., Emge, D. K., Christesen, S. D., & Fountain, A. W. (2011). Semi-Automated Detection of Trace Explosives in Fingerprints on Strongly Interfering Surfaces With Raman Chemical Imaging. *Applied Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1366/10-06214>

Tuhuț, L., Munteanu, L., Șimon-Marinică, A.-B., & Matei, A. D. (2022). Explosives Identification by Infrared Spectrometry. *Matec Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237300025>

Wang, F. C.-Y. (2020). Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Hyphenated With a Vacuum Ultraviolet Spectrometer to Analyze Diesel—A Three-Dimensional Separation (GC × GC × VUV) Approach. *Energy & Fuels*. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00688>

Warner, K. F., Sandstrom, M. M., Brown, G. W., Remmers, D. L., Phillips, J. J., Shelley, T., Reyes, J. A., Hsu, P., & Reynolds, J. G. (2014). ABL and BAM

Friction Analysis Comparison. *Propellants Explosives Pyrotechnics*. <https://doi.org/10.1002/prop.201400196>

Weir, C., Pantoya, M. L., Ramachandran, G., Dallas, T., Prentice, D., & Daniels, M. (2013). Electrostatic Discharge Sensitivity and Electrical Conductivity of Composite Energetic Materials. *Journal of Electrostatics*. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.10.002>

Wickham, J., Beaudoin, S. P., & Son, S. F. (2020). The Role of Adhesion and Binder Stiffness in the Impact Sensitivity of Cast Composite Energetic Materials. *Journal of Applied Physics*. <https://doi.org/10.1063/5.0030900>

Wiscons, R. A., & Matzger, A. J. (2017). Evaluation of the Appropriate Use of Characterization Methods for Differentiation between Cocrystals and Physical Mixtures in the Context of Energetic Materials. *Crystal Growth & Design*, 17(2), 901–906. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.6b01766>

Wu, J., Jiang, Y., Zeng, L., Li, H., & Zhang, J. G. (2021). Computational Design and Screening of Promising Energetic Materials: The Coplanar Family of Novel Heterocycle-based Explosives. *International Journal of Quantum Chemistry*. <https://doi.org/10.1002/qua.26788>

Yellampalle, B., Martin, R. B., Sluch, M., McCormick, W., Ice, R., & Lemoff, B. E. (2015). *Continuous-Wave Deep Ultraviolet Sources for Resonance Raman Explosive Sensing*. <https://doi.org/10.1117/12.2176672>

Yin, P., Zhang, Q., & Shreeve, J. M. (2016). Dancing with Energetic Nitrogen Atoms: Versatile N-Functionalization Strategies for N-Heterocyclic Frameworks in High Energy Density Materials. *Accounts of Chemical Research*, 49(1), 4–16. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00477>

Zhang, X., Liu, Q.-J., Liu, F.-S., & Liu, Z.-T. (2024). Predicting the thermal decomposition temperature of energetic materials from a simple model. *Journal of Molecular Modeling*, 30(8), 277. <https://doi.org/10.1007/s00894-024-06075-z>

Zhao, J., Cheng, X., Bi, H., & Yang, X. (2006). Neural Networks Study on the Correlation Between Impact Sensitivity and Molecular Structures for Nitramine Explosives. *Structural Chemistry*. <https://doi.org/10.1007/s11224-006-9101-6>

Zhou, J. (2024). *Thermal Chemistry and Decomposition Behaviors of Energetic Materials With Trimerizing Furoxan Skeleton*. <https://doi.org/10.22541/au.170663868.81907425/v1>

Zhou, Y., Hou, C., Jia, X., Tan, Y., & Wang, J. (2020). Compatibility Study of 1,1-Diamino-2,2-Dinitroethene (FOX-7) With Some Energetic Materials. *Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2020/7605140>



