# Malzeme Bilimi Mühendisliğinde Güncel Derlemeler

*Editör*

**İlyas Kartal**

BİDGE

**BİDGE Yayınları**

Malzeme Bilimi Mühendisliğinde Güncel Derlemeler

**Editör:** Doç. Dr. İlyas KARTAL

ISBN: 978-625-372-449-8

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 25.12.2024
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

# İçindekiler

Nanopartiküllerin Karakterizasyon Yöntemleri ..... 5

Gizem KARABULUT ŞEVK ..... 5

Biyolojik Olarak Parçalanabilen Çinko Esaslı Malzemelerdeki En Son Gelişmeler ..... 33

Gülşah Germen Tutaş ..... 33

Nanoteknolojinin Tarımsal Verimliliğe Etkileri; "Nanomalzemelerin Rolü" ..... 51

Mustafa Sami ATA ..... 51

Ekrem BÖLÜKBAŞI ..... 51

Investigating Ti(1-x) Al(x) Alloys: The Role of Composition in Structural, Mechanical, And Thermodynamic Properties ..... 92

Gülcan AYDIN ..... 92

Basit Karbonlu ve Düşük Alaşımlı Çeliklerde Sertleşebilirlik ve Optimizasyonu ..... 120

Aysel YAZICI ..... 120

Boronizing Techniques for Surface Hardening and Wear Resistance ..... 148

Mete Han BOZTEPE ..... 148

Termoplastik Kompozit Malzemelerden Rod Üretimi ve Güncel Uygulamaları ..... 167

Kamran SAMET ..... 167

Harun KOÇAK ..... 167

Çetin KARATAŞ ..... 167

Yüksek Saflıkta Metal Üretim Yöntemleri ..... 229

Güven YARKADAŞ ..... 229

İleri Teknoloji İçin Gerekli Kritik Elementler Ve Hammaddeler 247

Güven YARKADAŞ ..... 247

# BÖLÜM I

# Nanopartiküllerin Karakterizasyon Yöntemleri

**Gizem KARABULUT ŞEVK[1]**

## 1.Giriş

Nanopartiküller, boyutları 1 ila 100 nanometre arasında değişen malzeme parçacıklarıdır ve nanoteknolojinin en önemli yapı taşlarından biridir (S. Ahmad et al., 2019; Aygün, Özdemir, Gülcan, Cellat, & Şen, 2020; Madima, Mishra, & Mishra, 2022). Bu küçük boyutları sayesinde benzersiz fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere sahip olan nanopartiküller, birçok alanda devrim niteliğinde uygulamalar sunmaktadır (Bhushan, 2010; Das & Ansari, 2009; Jamkhande, Ghule, Bamer, & Kalaskar, 2019; Roco, 1999). Günümüzde sağlık, enerji, elektronik, çevre ve malzeme bilimleri gibi farklı disiplinlerde nanopartiküllerin kullanımı yaygınlaşmıştır

[1] Arş Gör. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0930-5380, gizem.karabulut@iuc.edu.tr

(Ersöz, 2018; Kango et al., 2013; Shi, 2015; Tüylek, 2019). Özellikle ilaç taşıyıcı sistemlerde hedefe yönelik tedavi için nanopartiküller kullanılırken, enerji depolama sistemlerinde de elektrot malzemesi olarak verimliliklerini artırmaktadır. Ayrıca çevre koruma ve su arıtma teknolojilerinde, kirleticilerin giderilmesinde etkili çözümler sunarlar. Nanopartiküller, nanoteknolojiyle birlikte yeni nesil malzemelerin geliştirilmesinde de önemli rol oynar. Bu malzemeler, daha hafif, dayanıklı ve işlevsel yapılarıyla sanayi ve teknoloji alanlarında ilerlemeyi hızlandırır.

Nanopartiküller, malzeme bilimi ve mühendislik alanında da devrim niteliğindedir. Daha hafif, daha dayanıklı ve yüksek işlevselliğe sahip malzemelerin üretilmesi, uzay-havacılık, otomotiv ve elektronik sektörlerinde performansı artırarak teknolojik gelişmelere kapı aralamaktadır. Nanopartiküller, bu çok yönlü kullanımları sayesinde günümüz teknolojisinin gelişimini hızlandırmakta ve gelecekte de pek çok alanda kritik bir rol oynamaya devam edeceklerdir. Üretilen nanopartiküllerin karakterizasyonu, nanopartiküllerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin anlaşılması açısından hayati öneme sahiptir (Karabulut, 2023). Nanopartiküller, çok küçük boyutları ve geniş yüzey alanları sayesinde geleneksel malzemelere kıyasla çok daha farklı özellikler sergilerler. Bu özelliklerin doğru bir şekilde tanımlanması, nanopartiküllerin hedef uygulamalardaki performansını belirler. Karakterizasyon süreci, nanopartiküllerin boyut dağılımını, morfolojisini, kristal yapısını, yüzey kimyasını, bileşimlerini ve yüzey yükünü anlamaya yönelik teknikler kullanarak yapılır.

Örneğin, boyut ve morfoloji analizleri, nanopartiküllerin hücrelere nüfuz etme yeteneği, yüzey reaksiyonları ve etkileşimleri gibi kritik özelliklerini doğrudan etkiler. Tıbbi uygulamalarda kullanılan nanopartiküller için, uygun boyut ve yüzey özelliklerine sahip olmaları, hedefe yönelik ilaç iletimi ve toksisite açısından önemlidir. Enerji uygulamalarında ise yüzey alanı ve kristal yapı, nanopartiküllerin batarya performansı, katalitik etkinlik ve enerji depolama kapasiteleri üzerinde doğrudan etkili olur. Karakterizasyon ayrıca, üretim süreçlerinin tekrarlanabilirliğini sağlamak ve kalite kontrol açısından da gereklidir. Farklı üretim yöntemleriyle elde edilen nanopartiküller, istenilen özellikleri tam olarak sergilemeyebilir. Bu nedenle, üretimden sonra yapılan karakterizasyon, nanopartiküllerin hedeflenen özelliklere sahip olup olmadığını doğrulamaya yardımcı olur. Doğru karakterizasyon sayesinde, nanopartiküllerin spesifik uygulamalarda en verimli şekilde kullanılmaları sağlanarak, araştırma ve endüstriyel projelerin başarısı artırılır.

Nanopartiküllerin karakterizasyonu, onların fiziksel ve kimyasal özelliklerini anlamak için kritik bir adımdır. Bu amaçla kullanılan başlıca teknikler arasında taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), dinamik ışık saçılımı (DLS), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) bulunur. SEM ve TEM gibi mikroskopi teknikleri, nanopartiküllerin morfolojisini ve boyut dağılımını analiz ederken, DLS daha çok parçacıkların kolloidal sistemlerdeki boyut dağılımını ölçer. XRD kristal yapıyı belirlerken, EDX element kompozisyonunu analiz eder. Bu karakterizasyon teknikleri, nanopartiküllerin uygulamalarda nasıl performans göstereceğini

anlamak için büyük öneme sahiptir. Bu kitap bölümünde nanopartiküllerin karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan karakterizasyon teknikleri ele alınarak detaylı şekilde anlatılmıştır.

## 2.Nanopartiküllerin Karakterizasyon Teknikleri

Nanopartiküllerin karakterizasyonu, onların boyut, şekil, yüzey kimyası, kristal yapı ve bileşim gibi temel özelliklerini belirlemek için çeşitli teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu amaçla SEM, TEM gibi görüntüleme yöntemleri, nanopartiküllerin boyut ve morfolojisini yüksek çözünürlükte incelemek için kullanılır. DLS, nanopartiküllerin çözeltilerdeki boyut dağılımını belirlerken, XRD kristal yapıyı analiz eder. EDX elementel bileşimleri tespit ederken, yüzey yükü ve potansiyelini anlamak için zeta potansiyel ölçümleri gibi yöntemler kullanılır. Bu teknikler, nanopartiküllerin performansını ve uygulamalarını optimize etmek için hayati bilgi sağlar.

### 2.1.Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Malzemelerin yüzey morfolojisi ve yapısal özelliklerini yüksek çözünürlükte incelemek için kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir. SEM, özellikle küçük ölçekteki yapıları, yani mikrometre ve nanometre boyutundaki detayları gözlemlemek için idealdir. Bu teknik, görüntüleme sırasında bir elektron demetinin numune yüzeyine odaklanarak tarama yapması prensibine dayanır. Elektronlar, numunenin yüzeyiyle etkileşime girdiğinde çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyaller, yüzey yapısını ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi verir (Rajeshkumar & Bharath, 2017; Rasmussen & Hooper, 1974; Tan, 2015).

SEM cihazında, bir elektron tabancası, numunenin üzerine yüksek enerjili bir elektron demeti gönderir. Bu elektronlar genellikle 1-30 kV arasında değişen enerjilere sahiptir. Demet, numunenin yüzeyinde belirli bir noktaya odaklanır ve ardından numune taranarak çok küçük bölgelerden geri saçılan sinyaller kaydedilir. Yüzeyle etkileşime giren elektronlar, ikincil elektronlar (secondary electrons), geri saçılan elektronlar (backscattered electrons), karakteristik X-ışınları ve diğer sinyaller gibi çeşitli türlerde sinyaller oluşturur (Goldstein et al., 2017; Singh & Singh, 2022a; Tahir & Ali, 2024). Bu sinyallerin her biri farklı bilgiler taşır:

- İkincil Elektronlar: Yüzey topografyası hakkında bilgi verir ve yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri sağlar.
- Geri Saçılan Elektronlar: Malzemenin atom numarasıyla ilişkili kontrast bilgisi verir; ağır elementler daha parlak görünür.
- X-Işınları: Malzemenin kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılır (EDX/EDS analizleri bu aşamada yapılır).

Elektronların numune ile serbestçe etkileşime girebilmesi için SEM analizleri genellikle vakum altında gerçekleştirilir. Yüksek vakum, elektronların hava moleküleriyle etkileşimini önler ve net görüntüler elde edilmesini sağlar. Düşük vakum ya da çevresel SEM (ESEM) ise biyolojik örnekler veya yalıtkan malzemeler gibi örneklerin doğal haliyle incelenmesini mümkün kılar. Numuneden gelen ikincil ve geri saçılan elektronlar bir detektör tarafından toplanır ve bu veriler kullanılarak bilgisayarda bir görüntü oluşturulur. Bu görüntü, malzemenin yüzey yapısını ayrıntılı bir

şekilde gösterir. SEM ile elde edilen görüntüler siyah-beyazdır, ancak yazılım aracılığıyla renkli hale getirilebilir. Mikrometre altı ve nanometre boyutlarında yapıları net bir şekilde görüntüleyebilir. Geniş bir derinlik alanı sağlar, bu sayede üç boyutlu yapıların yüzey detayı hakkında bilgi edinilebilir. EDX sistemi ile entegre edildiğinde elementel analiz yapma olanağı sunar (Egerton, 2005; Rajeshkumar & Bharath, 2017).

## 2.2.Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), malzemelerin atomik ve nanoyapı düzeyinde incelenmesine olanak tanıyan yüksek çözünürlüklü bir karakterizasyon tekniğidir. TEM, bir numune üzerinden geçen yüksek enerjili elektronları kullanarak, numunenin iç yapısını ve atomik düzenini detaylı bir şekilde gözlemlemek için geliştirilmiştir. Bu teknik, nanomalzemelerin iç yapısını incelemek, kristal yapılarını çözümlemek ve faz ayrımını gözlemlemek için yaygın olarak kullanılır. SEM'den farklı olarak, TEM yalnızca numunenin yüzeyini değil, iç yapısını da inceleme yeteneğine sahiptir (Williams & Carter, 2009).

TEM’de bir elektron tabancası, genellikle 100-300 kV arasında değişen enerjilere sahip yüksek enerjili bir elektron demeti oluşturur. Bu elektron demeti, numune üzerine odaklanır ve numune boyunca geçer. Elektronlar, numunenin atomlarıyla etkileşime girer ve sapma veya absorpsiyon gibi çeşitli fenomenler ortaya çıkar. TEM’de analiz yapılacak numuneler, çok ince (genellikle 100 nanometreden daha ince) olmalıdır. Çünkü elektronlar numunenin içinden geçmeli ve yeterince saydam olmalıdır. Bu nedenle, biyolojik örnekler, polimerler, metaller ve yarı iletkenler gibi malzemelerin çok ince kesitleri alınır ya da özel yöntemlerle (iyon

kesici ya da ultramikrotom) inceltilir. Bazı numuneler kriyo-TEM ile donmuş halde incelemeye alınabilir. Elektronlar numune üzerinden geçerken atomlarla etkileşir ve elektronların bir kısmı sapmaya uğrar, bir kısmı ise doğrudan geçer. Bu sapmalar ve geçişler sonucunda ortaya çıkan sinyaller, numunenin yapısı hakkında bilgi sağlar. Başlıca sinyaller: Elektronların sapmadan doğrudan geçmesi, numunenin yoğunluğunu ve kalınlığını belirler. Yoğun bölgeler daha koyu, ince bölgeler daha açık görünür. Elektronlar kristal yapı ile etkileştiğinde kırınım desenleri oluşur, bu sayede numunenin kristal yapısı ve yönelimi hakkında bilgi elde edilir. Elektronlar numune boyunca geçerken ortaya çıkan görüntü verileri, bilgisayarda işlenerek malzemenin iç yapısını gösteren yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturulur. TEM, atomlar arası mesafeleri bile görüntüleyebildiği için oldukça yüksek çözünürlüğe sahiptir (yaklaşık 0.1 nm veya daha iyi) (Orhan, 2021; Rajagopalan, Kaliannan, & Kulandaivel, 2024; Singh & Singh, 2022b; Zhou et al., 2023).

TEM Teknikleri:

- Parlak Alan TEM (Bright-Field TEM): Geçen elektronlar kullanılarak parlak bir görüntü elde edilir.
- Karanlık Alan TEM (Dark-Field TEM): Kırılan elektronlar kullanılarak numunenin farklı fazları ve yönelimleri hakkında bilgi alınır.
- Yüksek Çözünürlüklü TEM (HRTEM): Kristal yapıların ve atomik dizilimlerin doğrudan görüntülenmesi sağlanır.

- Enerji Kayıplı Elektron Mikroskobu (EELS): Elektronların enerjilerindeki kayıplar analiz edilerek elementel ve kimyasal bilgi elde edilir.
- Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX/EDS): Elektron-nümune etkileşiminden doğan karakteristik X-ışınları ile element analizi yapılır.

Atomlar arası mesafeleri görüntüleme kapasitesi sayesinde malzemelerin atomik yapısını incelemek için idealdir. Elektron kırınımı ile kristal yapı, faz analizi ve atom dizilimleri detaylı bir şekilde incelenebilir. Numunenin içindeki farklı katmanları, fazları ve hataları incelemek mümkündür. EDX ve EELS gibi tekniklerle kimyasal elementlerin ve bağların analizi yapılabilir (İlgar, 2015; Rajeshkumar & Bharath, 2017).

## 2.3.Ultraviyole Görünür Bölge Spektroskopisi (UV-Vis)

Bir numunenin ultraviyole (UV) (200-400 nm) ve görünür (Vis) (400-700 nm) ışık spektrumundaki elektromanyetik radyasyonu ne ölçüde absorbe ettiğini veya ilettiğini ölçen bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, moleküllerin elektronik geçişlerini incelemek için kullanılır ve malzemelerin optik özellikleri hakkında bilgi sağlar. UV-Vis spektroskopisi, çözeltideki moleküllerin, polimerlerin, proteinlerin, nanopartiküllerin, organik ve inorganik bileşiklerin kimyasal yapılarını ve konsantrasyonlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılır (Rajeshkumar & Bharath, 2017).

UV-Vis spektroskopisi, bir molekülün veya atomun UV veya görünür ışık bölgesindeki fotonları absorbe etmesiyle ilgili olup, bu absorpsiyon molekülün elektronlarının enerji seviyeleri arasında geçiş yapmasına neden olur. Genellikle, bir elektron daha düşük

enerjili bir temel durumdan daha yüksek enerjili bir uyarılmış duruma geçer. Bu geçişler, pi → pi* veya n → pi* gibi elektronik geçişlerle ilişkilidir. Numune, ışığı absorbe ettikçe, belirli dalga boylarındaki ışık daha az iletilir ve bu da absorpsiyon spektrumu oluşturur. Bir UV-Vis spektrumunda, absorpsiyonun bir fonksiyonu olarak dalga boyları grafiği çizilir. Beer-Lambert Yasası'na göre absorpsiyon, ışığın numune tarafından ne kadar absorbe edildiğini açıklamak için kullanılır (Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, George S. Kriz, 2008; Skoog, Holler, & Crouch, 1998).

Genellikle bir deuterium lambası (UV bölgesi için) ve tungsten-halojen lambası (görünür bölge için) kullanılır. Işık kaynağından çıkan ışık, numuneye yönlendirilmeden önce bir monokromatör yardımıyla belirli dalga boylarına ayrılır. Numuneler, genellikle kuvars küvetlerde (UV ışığını geçiren bir malzeme) çözeltide tutulur.Numuneden geçen ışığı algılayan dedektör, iletilen ışığı ölçer ve bu veriler kullanılarak absorpsiyon hesaplanır (Lakowicz, 2006).

UV-Vis analizinde numuneler genellikle çözelti formundadır ve numune yoğunluğu analiz edilecek spektral bölgeye uygun şekilde ayarlanır. Küvetler, optik özellikleri bozan hava kabarcıkları veya kirlerden arındırılmalıdır. Küvet yerleştirildikten sonra cihaz belirli dalga boyları aralığında tarama yapar ve absorbans değerleri kaydedilir. Absorpsiyon spektrumu analiz edilerek numunedeki bileşiklerin varlığı, saflığı, kimyasal yapısı ve konsantrasyonu hakkında bilgi edinilebilir. Örneğin, nanopartiküller genellikle karakteristik bir absorpsiyon piki gösterir; bu pik, partikül boyutu ve şekli hakkında bilgi verir. Kimyasal reaksiyonlar sırasında da spektral değişiklikler izlenerek reaksiyon kinetiği anlaşılabilir

(Kafle, 2020; Kaur, Singh, & Singh, 2021; Khalid, Ishak, & Chowdhury, 2024).

Numune hazırlığı basittir ve analiz hızlı sonuç verir. Numune yapısını bozmadan analiz yapılabilir. Çözeltideki maddelerin miktar tayini kolayca yapılabilir. Ancak, karışık bileşiklerin spektrumları üst üste binebilir, bu da analizi zorlaştırır. Çözünürlük, FTIR veya Raman gibi bazı diğer spektroskopi yöntemlerine göre daha düşüktür.

## 2.4.Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Bir numunenin kızılötesi (IR) ışığı absorplama veya geçirme yeteneğini ölçen bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, moleküllerin karakteristik vibrasyonel modlarını inceleyerek kimyasal yapılarını, fonksiyonel gruplarını ve bağ yapısını tespit eder. FT-IR, geleneksel dispersif IR spektroskopisinin yerini almış olup, daha hızlı, daha doğru ve daha yüksek çözünürlüklü sonuçlar sunar. Kızılötesi spektrumda (4000-400 $cm^{-1}$), moleküller üzerine düşen ışık, molekül içerisindeki bağların titreşimlerini (gerilme ve bükülme) etkiler. Molekülün fonksiyonel gruplarına ve yapısına bağlı olarak, her bağ belirli bir dalga boyundaki ışığı absorbe eder. Bu absorpsiyon, karakteristik spektral bantlar oluşturur ve bu bantlar kullanılarak molekülün kimyasal yapısı analiz edilebilir (Ramalingam et al., 2023; Singh & Singh, 2022c).

FT-IR cihazları, kızılötesi ışık kaynaklarını, numune odasını, dedektörleri ve Fourier dönüşüm işlemcilerini içerir. Kızılötesi ışık, genellikle bir SiC veya tungsten filaman gibi bir IR ışık kaynağından gelir. FT-IR cihazında, ışık kaynağından gelen kızılötesi ışık, bir Michelson interferometresi adı verilen bir cihaz tarafından

yönlendirilir. Bu interferometre, ışığı ikiye böler; biri sabit bir ayna üzerinden yansıtılır, diğeri ise hareketli bir ayna üzerinden yansıtılır. Bu ışınlar tekrar birleştirilerek interferans oluşturur. Oluşturulan interferans deseni, numuneye yönlendirilir. Numune, belirli dalga boylarındaki IR ışığı absorbe eder ve bu da titreşimsel modlarına göre absorpsiyon spektrumunu oluşturur. Numuneden geçen ışık, dedektör tarafından algılanır ve interferogram adı verilen bir sinyal oluşturur. Bu sinyal, Fourier dönüşümü kullanılarak kızılötesi spektruma dönüştürülür. Fourier dönüşümü, zaman ve frekans verileri arasında dönüşüm yaparak sinyali analize uygun hale getirir (Büyüksırıt & Kuleaşan, 2014; İlgar, 2015; Movasaghi, Rehman, & Rehman, 2008; Rajeshkumar & Bharath, 2017).

FT-IR spektrumu, dalga sayısı ($cm^{-1}$) ile absorpsiyon şiddeti arasında çizilen bir grafiktir. Dalga sayısı, ışığın frekansına ters orantılıdır ve farklı fonksiyonel gruplar farklı frekanslarda titreşir. Bu nedenle, spektrumda gözlenen her pik, numunedeki belirli bir bağ veya fonksiyonel grubun karakteristik titreşim modlarına karşılık gelir. Gerilme titreşimleri (stretching) atomlar arasındaki bağın uzayıp kısalmasıyla ilgilidir ve daha yüksek dalga sayılarında gözlemlenir. Bükülme titreşimleri (bending) ise bağ açılarının değişimiyle oluşur ve daha düşük dalga sayılarında gerçekleşir (Jangra, Verma, Ravelo, Thakur, & Thakur, 2025).

Spektral bantlar genellikle moleküldeki fonksiyonel gruplara özgüdür. Örneğin:

- OH grubu için geniş bir bant (yaklaşık 3200-3600 $cm^{-1}$),
- C=O grubu için keskin bir bant (yaklaşık 1700 $cm^{-1}$),

- CH gerilmesi (yaklaşık 2900 $cm^{-1}$), gibi bölgeler tipiktir.

FT-IR cihazı ile katı, sıvı ve gaz halindeki numuneler analiz edilebilir. Katı numuneler genellikle potasyum bromür (KBr) ile karıştırılarak ince bir tablet haline getirilir veya ATR (Attenuated Total Reflectance) tekniği kullanılarak doğrudan analiz edilir. Sıvı numuneler genellikle ince bir film oluşturularak ya da bir NaCl veya KBr küvet içerisine yerleştirilerek analiz edilir. Gaz halindeki maddeler bir gaz hücresine konarak analiz edilir (Mohamed, Jaafar, Ismail, Othman, & Rahman, 2017). Fourier dönüşümü sayesinde tüm spektrum tek bir ölçümde elde edilir, bu da hızlı ve doğru sonuçlar sağlar. ATR tekniği ile numune hazırlığı basit ve hızlıdır. Moleküllerin kimyasal yapısı, fonksiyonel grupları ve bağları hakkında detaylı bilgi verir. Numune yapısında değişiklik yapmadan analiz gerçekleştirilir (Borode, Tshephe, Akinwamide, & Olubambi, 2025; Rajeshkumar & Bharath, 2017).

## 2.5.X-Işını Difraksiyonu (XRD)

Bir malzemenin kristal yapısını, faz bileşenlerini ve atomların düzenlenmesini incelemek için kullanılan önemli bir analiz yöntemidir. XRD, özellikle katı hal malzemeleri, mineraller, seramikler, polikristal malzemeler, metal ve yarı iletkenlerin analizinde yaygın olarak kullanılır. Bu teknik, malzemelerin atomik ölçekli yapısına ilişkin bilgi sağlar ve kristal fazları ayırt etme, kafes parametrelerini belirleme, kristal yapısındaki kusurları inceleme gibi birçok uygulama sunar (Rajeshkumar & Bharath, 2017; Tan, 2015).

X-Işını difraksiyonu, Bragg Yasasını temel alınarak çalışır. X-ışınları, kristalin atomik düzlemlerine çarptığında, bu düzlemlerden

geri yansır. Kristal yapısındaki düzenli atomlar, gelen X-ışınlarını belirli açılarda yansıtarak konstrüktif veya destrüktif girişim oluşturur. Bu girişim desenleri, X-ışınlarının malzeme tarafından nasıl difrakte olduğunu gösterir (Borode et al., 2025; Jangra et al., 2025).

Genellikle Cu-Kα (λ = 1.5406 Å) veya Mo-Kα X-ışını tüpleri kullanılır. Bu X-ışınları malzemeye yönlendirilir. Numune, genellikle ince bir toz halinde hazırlanır ve yüzeyi düzgün bir şekilde yerleştirilir. Bu sayede rastgele yönlenmiş kristal yapılar, X-ışınına farklı açılarda çarparak her yönden difraksiyon oluşmasını sağlar. Numune üzerinden difrakte olan X-ışınları bir dedektör tarafından algılanır. Dedektör, belirli açılardaki girişim desenlerini kaydeder ve bir difraktogram oluşturur. Difraktogram, X-ışınlarının numune tarafından nasıl yansıtıldığını gösteren bir grafiktir. Bu grafik, **2θ** açısına karşı difraksiyon şiddetinin çizildiği bir spektrumdur. Her bir zirve (pik), kristal yapıya ait belirli bir düzlemi temsil eder (Epp, 2016).

XRD ile elde edilen difraksiyon desenleri, malzemedeki kristal fazlarını tanımlamak için kullanılır. Bu desenler, bilinen kristal fazlarla karşılaştırılarak malzemenin hangi fazlardan oluştuğu belirlenir. Her bir difraksiyon piki, belirli bir düzleme ait atomik mesafeyi temsil eder. Bu pikler kullanılarak kafes parametreleri (a, b, c) hesaplanabilir. Scherrer Denklemi kullanılarak XRD piki genişliğinden nanokristallerin boyutları hesaplanabilir (Falsafi, Rostamabadi, & Jafari, 2020). XRD, malzemeye zarar vermeden analiz yapar. Malzemelerin atomik düzeyde yapısal özelliklerini ortaya koyar. XRD, oldukça hassas sonuçlar verir ve geniş bir malzeme yelpazesine uygulanabilir. Ancak, XRD yalnızca kristal

yapılı malzemelerde etkili olduğundan, amorf yapıları tanımlamakta zorluklar yaşar. XRD, ince filmler ve yüzeylerde daha sınırlı bilgi sağlar. Çoklu fazlar içeren karışımlarda, faz tanımlaması zor olabilir (A. Ahmad et al., 2021).

## 2.6.Zeta potansiyeli

Bir dispersiyonun (örneğin, kolloidal bir çözeltinin) elektrostatik özelliklerini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Zeta potansiyeli, partiküllerin yüzey yüklerinin, sıvı içindeki hareketlerine ve dağılımlarına etkisini gösterir. Bu parametre, nanopartiküllerin stabilitesi, aglomerasyonu ve yüzey modifikasyonları hakkında önemli bilgiler sağlar. Zeta potansiyeli analizi, özellikle nanoteknoloji, malzeme bilimi, biyomedikal uygulamalar ve çevre bilimleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Adam et al., 2024; Tahir & Ali, 2024).

Zeta potansiyeli, bir partikülün yüzeyinde bulunan elektrik yüklerinin, partikül etrafındaki sıvı içinde oluşturduğu elektriksel alanı temsil eder. Bu potansiyel, partiküllerin sıvı içinde ne kadar stabil kalacağını belirler. Yüksek zeta potansiyeline sahip partiküller, birbirlerinden uzak durarak aglomerasyon (topaklanma) eğilimini azaltırken, düşük zeta potansiyeli, partiküller arasında daha fazla çekim kuvveti oluşturarak aglomerasyona neden olabilir. Zeta potansiyeli, partiküller arasındaki elektrostatik etkileşimleri tanımlar. Genellikle, zeta potansiyeli:

- +30 mV veya daha yüksek: Partiküller arasında güçlü elektrostatik repülme; yüksek stabilite.
- -30 mV veya daha düşük: Partiküller arasında güçlü elektrostatik çekim; düşük stabilite.

- -30 mV ile +30 mV arasında: Belirsiz bir stabilite durumu; partiküller aglomerasyona daha yatkındır.

Zeta potansiyeli genellikle elektroforetik hareket (elektroforez) prensibi ile ölçülür. Bu yöntem, bir elektrik alanı altında partiküllerin hareketini izleyerek zeta potansiyelini hesaplar. İnce dispersiyonlar (örneğin, nanopartikül çözeltileri) hazırlanır. Numune, uygun bir çözücü (genellikle su veya başka bir solvent) içinde disperse edilir. Zeta potansiyeli ölçen bir cihaz (genellikle lazer difraksiyon veya dinamik ışık saçılması (DLS) kullanılır) ayarlanır. Numuneye bir elektrik alanı uygulanır. Bu alan, yüzey yüküne sahip partikülleri hareket ettirir. Partiküllerin hareketi lazer ışınıyla izlenir. Partiküllerin hızı, elektrik alanı ve zeta potansiyeli arasında bir ilişki kurar (Singh & Singh, 2022d).

Zeta potansiyeli ölçüm cihazı, standart bir çözeltide (genellikle bilinen bir zeta potansiyeline sahip olan bir standart partikül çözeltisi) kalibre edilmelidir. Hazırlanan numune, ölçüm hücresine yerleştirilir. Numune, elektrik alanı altında hareket ettirilir. Cihaz, partiküllerin hızını ve yönünü izler. Cihaz, elde edilen verileri kullanarak zeta potansiyelini hesaplar. Hesaplama genellikle Hückel veya Smoluchowski teorileri kullanılarak yapılır. Elde edilen zeta potansiyeli, sistemin stabilitesini belirlemek için yorumlanır. Pozitif ve negatif değerler, partiküllerin yüzey yüklerini ve etkileşimlerini tanımlar (Al Thaher et al., 2021).

Zeta potansiyeli ölçümleri genellikle hızlıdır ve kolayca yapılabilir. Numuneye zarar vermeden analiz yapılır. Zeta potansiyeli analizi, aynı anda parçacık boyutunu ve dağılımını da ölçebilir. Ancak, zeta potansiyeli ölçümleri, sıvı ortamdaki

çözücülerle sınırlıdır. Büyük partiküller veya aglomeratlar, doğru zeta potansiyeli ölçümünü zorlaştırabilir.

## 2.7.Dinamik Işık Saçılımı Spektrofotometrisi (DLS)

Partikül boyutu ve dağılımı hakkında bilgi elde etmek için kullanılan yaygın bir analiz tekniğidir. Özellikle kolloidal çözeltilerde ve nanopartikül sistemlerinde sıklıkla tercih edilir. DLS, partiküllerin sıvı içindeki Brown hareketi sırasında lazer ışığını saçılması prensibine dayanarak çalışır (Sakho, Allahyari, Oluwafemi, Thomas, & Kalarikkal, 2017).

DLS, partiküllerin sıcaklığa bağlı olarak sıvı içindeki rastgele hareketi olan Brown hareketinden yararlanır. Bu hareket, küçük partiküllerin sıvı içindeki dalgalanmalar nedeniyle sürekli olarak yön değiştirmesi ve hızının değişmesidir. DLS, bu hareketleri izleyerek partiküllerin boyutunu belirler. DLS cihazında, bir lazer kaynağı kullanılarak sıvıya yönlendirilmiş lazer ışığı, dispersiyon içindeki partiküllere çarparak saçılır. Saçılan ışığın yoğunluğu ve faz değişimleri, partiküllerin boyutları ve hareketleri hakkında bilgi verir. DLS analizi, lazer ışığının saçılma eğrilerinin zamanla nasıl değiştiğini izler. Saçılan ışığın zamanla değişen yoğunluğu, bir korelasyon fonksiyonu ile analiz edilir. Bu fonksiyon, partiküllerin hızını ve dolayısıyla boyutunu belirlemek için kullanılır. Zeta potansiyeli gibi DLS verileri de, partikül hareketinin hızına dayalı olarak hesaplanır. Daha hızlı hareket eden daha küçük partiküller, daha yavaş hareket eden daha büyük partiküllere kıyasla daha az ışık saçma eğilimindedir (Babick, 2020; Glatter, 2018; Tosi, Ramos, Esposto, & Jafari, 2020).

Numune, ince bir dispersiyon haline getirilir. Genellikle, sıvı ortamda homojen bir çözelti hazırlanması önemlidir. Partikül konsantrasyonu, DLS ölçümüne uygun seviyede olmalıdır (genellikle 0.1 – 1 mg/mL aralığında). DLS cihazı, ölçüm için uygun bir dalga boyu ve sıcaklık ayarına kalibre edilir. Numune ölçüm hücresine yerleştirilir ve sıcaklığı ayarlanır. Lazer, numuneye yönlendirilir. Saçılan ışık, dedektör tarafından algılanır. Cihaz, lazer ışığının saçılma hızını ve yönünü izler. Elde edilen veriler, korelasyon fonksiyonu ile analiz edilir. Partikül boyutları, genel dağılım ve diğer parametreler hesaplanır. Bu hesaplamalar genellikle Stokes-Einstein denklemi kullanılarak yapılır. Elde edilen boyut dağılımı, partiküllerin homojenliği ve dispersiyonun stabilitesi hakkında bilgi verir. DLS analizi, partikül boyutu ve dağılımı ile ilgili grafiksel verileri sağlar.

DLS ölçümleri genellikle hızlıdır ve birden fazla numunenin analizini sağlar. Numuneye zarar vermeden yapılır. Küçük partiküllerin boyutlarını doğru bir şekilde ölçebilir. Ancak, çok yüksek veya çok düşük konsantrasyonlarda doğru sonuçlar vermeyebilir. Çoklu fazlar içeren sistemlerde boyut belirleme zorluğu. Partiküllerin yüzey yükleri, sonuçları etkileyebilir (Ateş, 2018).

### 2.8.X Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS)

Bir yüzeydeki elementlerin ve bileşiklerin kimyasal durumunu, yüzey bileşimini ve elektron yapısını analiz etmek için kullanılan güçlü bir spektroskopi tekniğidir. XPS, özellikle nanomalzeme karakterizasyonu, yüzey mühendisliği ve yüzey kimyası alanlarında yaygın bir uygulama bulur (Adam et al., 2024).

XPS, yüksek enerjili X-ışınlarının bir yüzeye yönlendirilmesiyle başlar. X-ışınları, yüzeydeki atomların iç elektronlarına çarparak onları serbest hale getirir. Bu işlem, fotoelektronların salınmasına neden olur. Salınan fotoelektronların enerjisi, ilgili atomun bağlanma enerjisi ile X-ışınının enerjisi arasındaki ilişkiye bağlıdır. Salınan fotoelektronların enerjisi, bir analiz cihazı (genellikle bir spektrometre) kullanılarak ölçülür. Fotoelektronların enerjisi, yüzeyde bulunan elementlerin kimyasal durumuna göre değişiklik gösterir. Bu bilgiler, elementlerin tanımlanması ve kimyasal analiz için kullanılır. Fotoelektronların enerjisi, bağlanma enerjisi olarak bilinen bir parametre ile ilişkilidir. Bağlanma enerjisi, elektronun atomdan ayrılmak için gereken enerji miktarını ifade eder. Bu enerji, elementin kimyasal durumu hakkında bilgi verir. Örneğin, aynı elementin farklı bileşiklerdeki bağlanma enerjileri, kimyasal bağların farklılıklarını yansıtabilir. XPS, salınan fotoelektronların enerji dağılımını analiz ederek bir spektrum oluşturur. Spektrumda, her bir elementin belirli bir bağlanma enerjisi değerinde pikler gözlemlenir. Bu piksler, elementlerin ve bileşiklerin varlığını ve kimyasal durumunu belirler (Aziz & Ismail, 2017; Carbonio, 2024; Carley & Morgan, 2016; Tougaard, 2013).

Numune, yüzey analizi için uygun bir şekilde hazırlanmalıdır. Genellikle, yüzey temizliği sağlanmalı ve kirleticilerden arındırılmalıdır. Numunenin yüzeyi, ince bir tabaka (genellikle birkaç nanometre) halinde olmalıdır. XPS, yalnızca yüzeysel bilgileri elde eder. XPS cihazı, uygun bir X-ışını kaynağı ile kalibre edilir. Genellikle Mg Kα (1253.6 eV) veya Al Kα (1486.6 eV) kaynakları kullanılır. Numune, cihazın ölçüm hücresine yerleştirilir. X-ışınları, numune yüzeyine yönlendirilir. Salınan fotoelektronlar,

bir dedektör tarafından toplanır. Cihaz, fotoelektronların enerji seviyelerini ölçer ve bir spektrum oluşturur. Elde edilen spektrum, bağlanma enerjileri ile ilgili piksler içerir. Bu piksler, belirli elementlerin kimyasal durumları hakkında bilgi sağlar. Spektrumda bulunan pikslerin alanları, elementlerin yüzeydeki oranlarını belirlemek için kullanılabilir. Spektrum analizi, yüzey bileşimi ve kimyasal durum hakkında bilgi sağlar. Ayrıca, farklı bileşenlerin varlığı ve oranları hakkında çıkarımlar yapılabilir (Carley & Morgan, 2016; Tougaard, 2013).

XPS, yalnızca yüzeysel bilgileri elde eder, bu da malzeme yüzeyindeki kimyasal bileşimi anlamada etkilidir. Çok az miktarda örnekle, farklı elementlerin ve bileşiklerin varlığını belirleyebilir. Elementlerin kimyasal durumunu (örneğin, oksidasyon durumu) belirlemede güçlü bir araçtır. XPS, yüzeyin yalnızca birkaç nanometre derinliğindeki bilgileri sağlar. Numune hazırlama ve cihaz kalibrasyonu bazen karmaşık olabilir. XPS cihazları genellikle pahalıdır ve işletimi için özel eğitim gerektirebilir (Chusuei & Goodman, 2013; Engelhard, Droubay, & Du, 2016).

**Kaynaklar**

Adam, M. R., Mokhter, M. A., Aziz, M. H. A., Kamaludin, R., Ahmad, N. A., & Azmi, M. F. I. (2024). Chemical analysis of photocatalytic membrane (FTIR, XRD, UV-vis/optical, XPS, and zeta potential). *Advanced Ceramics for Photocatalytic Membranes: Synthesis Methods, Characterization and Performance Analysis, and Applications in Water and Wastewater Treatment*, 295–315. Elsevier.

Ahmad, A., Pervaiz, M., Ramzan, S., Kiyani, M. Z., Khan, A., Ahmad, I., & Asiri, A. M. (2021). Role of XRD for nanomaterial analysis. *Nanomedicine Manufacturing and Applications*, 149–161. Elsevier.

Ahmad, S., Munir, S., Zeb, N., Ullah, A., Khan, B., Ali, J., Bilal, M., et al. (2019). Green nanotechnology: a review on green synthesis of silver nanoparticles — an ecofriendly approach. *International Journal of Nanomedicine*, *14*, 5087. Dove Press. Retrieved June 18, 2022, from /pmc/articles/PMC6636611/

Ateş, M. (2018). Nanoparçacıkların Ölçme ve İnceleme Teknikleri. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, *11*(1), 63–69. Retrieved November 9, 2022, from https://dergipark.org.tr/en/pub/derleme/issue/41668/451254

Aygün, A., Özdemir, S., Gülcan, M., Cellat, K., & Şen, F. (2020). Synthesis and characterization of Reishi mushroom-mediated green synthesis of silver nanoparticles for the biochemical applications. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *178*, 112970. Elsevier.

Aziz, M., & Ismail, A. F. (2017). X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS). *Membrane Characterization*, 81–93. Elsevier.

Babick, F. (2020). Dynamic light scattering (DLS). *Characterization of Nanoparticles: Measurement Processes for Nanoparticles*, 137–172. Elsevier.

Bhushan, B. (2010). Introduction to Nanotechnology. *Springer Handbook of Nanotechnology*, 1–13. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved August 9, 2021, from http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-02525-9_1

Borode, A. O., Tshephe, T. S., Akinwamide, S. O., & Olubambi, P. A. (2025). Nanotechnology characterization: Emerging techniques for accurate and reliable nanostructural analysis. *Smart Nanomaterials for Environmental Applications*, 57–91. Elsevier.

Büyüksırıt, T., & Kuleaşan, H. (2014). FOURIER DÖNÜŞÜMLÜ KIZILÖTESİ (FTIR) SPEKTROSKOPİSİ ve GIDA ANALİZLERİNDE KULLANIMI, 235–241.

Carbonio, E. A. (2024). X-ray photoelectron spectroscopy meets electrochemistry: From UHV to operando conditions. *Encyclopedia of Solid-Liquid Interfaces*, *1–3*, 283–299. Elsevier.

Carley, A. F., & Morgan, D. J. (2016). Surface Analysis: X-Ray Photoelectron Spectroscopy. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier.

Chusuei, C. C., & Goodman, D. W. (2013). X-Ray Photoelectron Spectroscopy. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier. Retrieved

March 11, 2022, from https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124095472054603

Das, I., & Ansari, S. A. (2009). Nanomaterials in science and technology. *Journal of Scientific and Industrial Research*, *68*(8), 657–667.

Donald L. Pavia, Gary M. Lampman, George S. Kriz, J. A. V. (2008). Introduction to Spectroscopy [Paperback], 752. Cengage Learning; 4 edition. Retrieved October 23, 2024, from https://books.google.com/books/about/Introduction_to_Spectroscopy.html?hl=tr&id=FkaNOdwk0FQC

Egerton, R. F. (2005). Physical principles of electron microscopy: An introduction to TEM, SEM, and AEM. *Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM*, 1–202. Springer US.

Engelhard, M. H., Droubay, T. C., & Du, Y. (2016). X-ray photoelectron spectroscopy applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 716–724. Elsevier.

Epp, J. (2016). X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, 81–124. Woodhead Publishing.

Ersöz, M. M. (2018). *Nanoteknoloji 1: nanoteknolojinin temelleri* (1st ed., Vol. 1). Nevşehir: Pamukkale Üniversitesi Yayınları. Retrieved November 7, 2022, from http://acikerisim.pau.edu.tr:8080/xmlui/handle/11499/3117

Falsafi, S. R., Rostamabadi, H., & Jafari, S. M. (2020). X-ray diffraction (XRD) of nanoencapsulated food ingredients. *Characterization of Nanoencapsulated Food Ingredients*, 271–293. Academic Press.

Glatter, O. (2018). Dynamic Light Scattering (DLS). *Scattering Methods and their Application in Colloid and Interface Science*, 223–263. Elsevier.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 1–550. Springer New York.

İlgar, M. (2015). *Selüloz katkılı poli(ε-Kaprolakton) kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.

Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *53*(July), 101174. Elsevier. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174

Jangra, S., Verma, R., Ravelo, B., Thakur, P., & Thakur, A. (2025). Advanced characterization techniques for nanoferrites. *Nanoferrites for Emerging Environmental Applications*, 37–69. Elsevier Science Ltd. Retrieved October 24, 2024, from https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780443222320000034

Kafle, B. P. (2020). Application of UV–VIS spectrophotometry for chemical analysis. *Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry*, 79–145. Elsevier.

Kango, S., Kalia, S., Celli, A., Njuguna, J., Habibi, Y., & Kumar, R. (2013). Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic–inorganic nanocomposites—A review. *Progress in Polymer Science*, *38*(8), 1232–1261. Pergamon.

Karabulut, G. (2023). *Yeşil kimya yaklaşımıyla sentezlenen nanotaneciklerin metalik yüzeylerde kaplama özelliklerinin incelenmesi*. Istanbul Universitesi-Cerrahpaşa.

Kaur, G., Singh, H., & Singh, J. (2021). UV-vis spectrophotometry for environmental and industrial analysis. *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science: Analytical Techniques for Environmental and Industrial Analysis*, 49–68. Elsevier.

Khalid, K., Ishak, R., & Chowdhury, Z. Z. (2024). UV–Vis spectroscopy in non-destructive testing. *Non-Destructive Material Characterization Methods*, 391–416. Elsevier.

Lakowicz, J. R. (2006). Principles of fluorescence spectroscopy. *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, 1–954. Springer.

Madima, N., Mishra, S. B., & Mishra, A. K. (2022). Nanotechnology and green materials: Introduction, fundamentals, and applications. *Green Functionalized Nanomaterials for Environmental Applications*, 3–19. Elsevier.

Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *Membrane Characterization*, 3–29. Elsevier.

Movasaghi, Z., Rehman, S., & Rehman, I. U. (2008). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Biological Tissues. *https://doi.org/10.1080/05704920701829043*, *43*(2), 134–179. Taylor & Francis Group . Retrieved March 7, 2022, from https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05704920701829043

Orhan, Z. (2021). TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPE (TEM). *The World of Biomedical Technology*, *1*(1), 11–13. Ataturk University. Retrieved October 24, 2024, from https://dergipark.org.tr/en/pub/worlbiomedtech/issue/77249/1332029

Rajagopalan, K., Kaliannan, M., & Kulandaivel, S. (2024). Transmission electron microscope. *Non-Destructive Material Characterization Methods*, 167–188. Elsevier.

Rajeshkumar, S., & Bharath, L. V. (2017). Mechanism of plant-mediated synthesis of silver nanoparticles – A review on biomolecules involved, characterisation and antibacterial activity. *Chemico-Biological Interactions*, *273*, 219–227. Elsevier Ireland Ltd. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1016/j.cbi.2017.06.019

Ramalingam, K., Thiagamani, S. M. K., Theivasanthi, T., Chandrasekar, M., Santulli, C., Senthilkumar, K., & Siengchin, S. (2023). Characterization of fiber surface treatment by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopy. *Cellulose Fibre*

*Reinforced Composites: Interface Engineering, Processing and Performance*, 115–127. Woodhead Publishing.

Rasmussen, H. P., & Hooper, G. R. (1974). Electron Optics: Principles, Techniques, and Applications in Horticulture1. *HortScience*, *9*(5), 425–433. American Society for Horticultural Science. Retrieved October 24, 2024, from https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/9/5/article-p425.xml

Roco, M. C. (1999). Nanoparticles and Nanotechnology Research. *Journal of Nanoparticle Research*, *1*(1), 1–6.

Sakho, E. H. M., Allahyari, E., Oluwafemi, O. S., Thomas, S., & Kalarikkal, N. (2017). Dynamic Light Scattering (DLS). *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization*, *3*, 37–49. Elsevier.

Shi, D. G. Z. B. (2015). *Nanomaterials and Devices - Donglu Shi - Google Kitaplar*. (D. G. Z. B. Shi, Ed.). Elsevier.

Singh, M. K., & Singh, A. (2022a). Scanning electron microscope. *Characterization of Polymers and Fibres*, 387–419. Woodhead Publishing. Retrieved October 24, 2024, from https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128239865000087

Singh, M. K., & Singh, A. (2022b). Transmission electron microscope. *Characterization of Polymers and Fibres*, 435–448. Woodhead Publishing. Retrieved October 24, 2024, from https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012823986500004X

Singh, M. K., & Singh, A. (2022c). Fourier transform infrared (FTIR) analysis. *Characterization of Polymers and Fibres*, 295–320. Woodhead Publishing.

Singh, M. K., & Singh, A. (2022d). Particle size analysis. *Characterization of Polymers and Fibres*, 341–358. Woodhead Publishing. Retrieved October 24, 2024, from https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128239865000099

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (1998). Skoog, Douglas A.; Holler, F. James; Crouch, Stanley R. (2007). Principles of Instrumental Analysis (6th ed.). Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole. pp. 169–173. ISBN 978-0-495-01201-6.Principles of instrumental analysis. Cengage learning. Retrieved October 23, 2024, from https://books.google.com/books/about/Principles_of_Instrumental_Analysis.html?hl=tr&id=D13EDQAAQBAJ

Tahir, M. Y., & Ali, S. (2024). Analytical techniques for nanomaterials. *Nanomaterials-Based Electrochemical Sensors: Properties, Applications, and Recent Advances*, 37–51. Elsevier.

Tan, E. (2015). *ANTİBAKTERİYEL YENİ BİR NANO-BİYOKOMPOZİTİN HAZIRLANMASI VE YÜZEY KARAKTERİZASYONU*. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.

Al Thaher, Y., Satoof, A., Kamal, A., Almani, D., Shaban, D., Kassab, G., Surchi, H., et al. (2021). Instrumental analytical techniques for physicochemical characterization of bio-nanomaterials. *Handbook on Nanobiomaterials for Therapeutics and Diagnostic Applications*, 133–150. Elsevier.

Tosi, M. M., Ramos, A. P., Esposto, B. S., & Jafari, S. M. (2020). Dynamic light scattering (DLS) of nanoencapsulated food ingredients. *Characterization of Nanoencapsulated Food Ingredients*, 191–211. Academic Press.

Tougaard, S. (2013). SURFACE ANALYSIS | X-ray Photoelectron Spectroscopy. *Encyclopedia of Analytical Science*, 400–409. Academic Press.

Tüylek, Z. (2019). Nanotıp Alanında Kullanılan Sistemler. *Archives Medical Review Journal*, *28*(2), 119–129. Retrieved November 7, 2022, from https://dergipark.org.tr/en/pub/aktd/issue/44965/412772

Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). Transmission electron microscopy: A textbook for materials science. *Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science*, 1–760. Springer US.

Zhou, W., Ikuhara, Y. H., Zheng, Z., Wang, K., Cao, B., & Chen, J. (2023). Transmission electron microscopy (TEM) studies of functional nanomaterials. *Modeling, Characterization, and Production of Nanomaterials: Electronics, Photonics, and Energy Applications, Second Edition*, 467–512. Woodhead Publishing.

# BÖLÜM II

# Biyolojik Olarak Parçalanabilen Çinko Esaslı Malzemelerdeki En Son Gelişmeler

**Gülşah Germen Tutaş**[1]

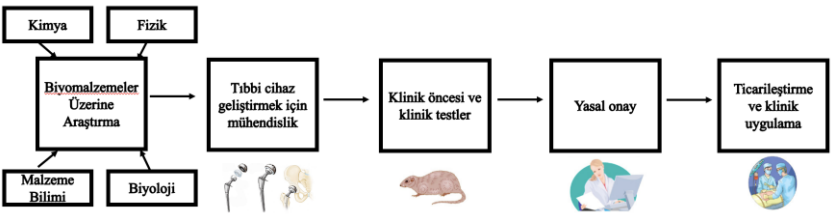
## 1.Giriş

Geleneksel olarak tıbbi cihazlarda kullanılan malzemeler olarak tanımlanan biyomalzemeler antik çağlardan beri kullanılmaktadır, genel olarak da vücudun işleyişine yardımcı olmak amacıyla üretilen ve belirli bir süre vücutla temas halinde olabilecek şekilde tasarlanmış yapılar olarak tanımlanır. Üç temel malzeme sınıfı olan metalik, seramik ve sentetik polimerik malzemelerin tekil ya da bir arada kullanılması ile üretilirler, ancak biyomalzeme tasarımındaki son yıllardaki yeni gelişmeler, biyolojik malzemelerden (örneğin ipek ve kolajen) türetilen veya bunlardan

[1] Niğde Ömer Halis Üniversitesi Endüstriyel Hammaddeler ve Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye, ORCID: 1 0000-0002-7705-7465

esinlenen malzemeleri dahil etmeye çalışmıştır. Biyomalzemelerin kullanımı genellikle hastalıklı veya hasarlı doku ve organların güçlendirilmesi, değiştirilmesi veya restorasyonuna odaklanmaktadır. Biyomalzemelerin toplumdaki yaygınlığı en çok tıp ve diş hekimliği muayenehanelerinde, eczanelerde ve hastanelerde görülmektedir(Hildebrand, 2013; Migonney, 2014; Mooney & Huebsch, 2009; Ratner, 2013; Ratner et al., 2013; Seal & Panitch, 2006).

Biyomalzeme bilimi hem terapötik hem de diagnostik alanlara hitap etmektedir. Biyomalzemelerin son yıllarda toplumumuzda artan önemi, biyomalzemelerin hem akademik bir disiplin hem de önemli bir endüstri olarak büyümesi de dahil olmak üzere çeşitli şekillerde izlenebilir. Son 30 yılda biyomalzeme alanındaki bilimsel yayınlarda hızlı bir artış olmuştur ve biyomalzemeler tarihsel olarak çok az sayıda okulun çalışma odağı olmasına rağmen, alan son 20 yılda belirgin bir şekilde genişlemiştir(Mooney & Huebsch, 2009). Sonuç olarak, biyomalzeme biliminin klinik açıdan önemli tıbbi cihazlara dönüştürülmesi şunlara bağlıdır: (1) sağlam mühendislik tasarımı; (2) in vitro, hayvanlarda ve insanlarda test; (3) klinik gerçekler; ve (4) ürün geliştirme ve ticarileştirmeye izin veren endüstrinin katılımı. Şekil 1, bilimsel gelişimden kliniğe giden yolu şematik olarak gösterilmektedir(Chandra & Pandey, 2020; Levy et al., 2017; Ratner et al., 2013; Zhang et al., 2013).




*Şekil 1. Biyomalzemelerin temel biliminden tıbbi bir cihaza ve klinik uygulamaya giden yol.*

Biyomalzemenin klinik uygulama giden yolundaki birinci aşama yani yapılan bilimsel araştırmalarda daha öncede bahsedildiği gibi 3 malzeme sınıfı (metalik, seramik ve polimerik) üzerine yoğun olarak durulduğu görülmektedir(Seal & Panitch, 2006). Metalik biyomalzemeler genel olarak kalıcı ve kalıcı olmayan(biyobozunur) olarak iki gruba ayrılır. Son yıllarda, bir çok araştırmacı ortopedi ve kardiovasküler uygulamalar için biyobozunur implantların geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedir. Çünkü kalıcı implantlar vücutta uzun dönemli komplikasyonlara neden olmakta, aynı zamanda vücut içindeki görevini tamamladıktan sonra ikinci bir operasyon ile vücuttan çıkarılması gerekmektedir. Biyobozunur implantların en önemli adayları olan magnezyum ve demir malzemeler üzerine bugüne kadar çok sayıda çalışma rapor edilmiştir. Magnezyumun zayıf sünekliği ve oldukça hızlı korozyonu ve demirin çok yavaş bozunması ile ilgili önemli endişeler hala arzu edilen şekilde karşılanmamış gibi görünmektedir. Çinko, umut verici biyolojik olarak parçalanabilirliği ve biyouyumluluğu nedeniyle 2013 yılında potansiyel bir implant malzemesi olarak tanıtılmıştır(Chen & Thouas, 2015; Ehsan Mostaed et al., 2018).

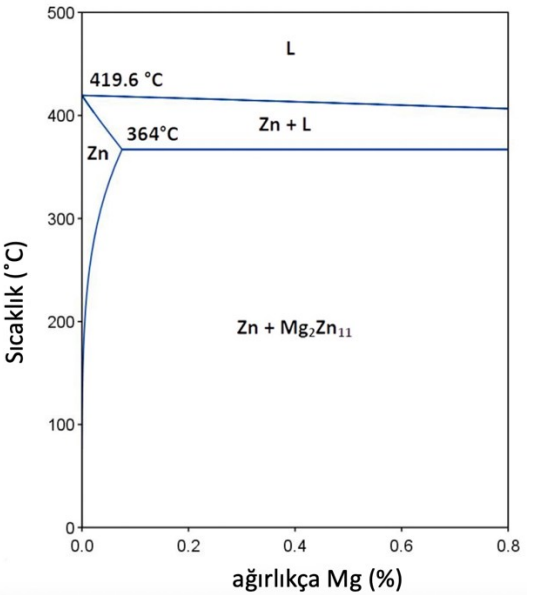
## 2.Çinko (Zn) metali ve Biomedikal Uygulamaları

Çinko bir yaşam elementidir ve yeni nesil biyolojik olarak parçalanabilen, anti-enflamatuar ve anti-proliferatif özelliklere sahip bir metaldir. Bu nedenle biyomedikal sektöründe uygulama alanı bulabileceği ön görüsüyle son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiş görünüyor(Hussain et al., 2022; Levy et al., 2017; Ehsan Mostaed et al., 2018; Wang et al., 2021).

### 2.1. Biyobozunur Zn-Mg Alaşım sistemleri

Zn'in korozyon hızı Mg'ninkinden çok daha yavaştır ve biyolojik bozunma sürecinde gaz açığa çıkmamaktadır. Mg, etkili güçlendirme etkisi, gelişmiş biyouyumluluk ve osteogenez nedeniyle biyolojik olarak parçalanabilir Zn alaşımları için en umut verici alaşım elementlerinden biri olarak kabul edilmektedir(Qin et al., 2022). Zn-Mg ikili alaşımlarının yüksek biyo güvenliği koruduğu bilinmektedir. Bunun yanında üstün mekanik özelliklere sahip olması beklenmektedir. Yapılan bir çalışmada farklı oranlarda Mg çalışılarak biyomedikal uygulamalar için 200 C'de haddelenen Zn-0.1wt%Mg alaşımı, biyolojik olarak parçalanabilir bir malzeme adayı olarak imal edilebilecek mekanik özellikler ve korozyon oranının uygun kombinasyonunu sağlamıştır(Li et al., 2023). Yeni biyolojik olarak emilebilir implant malzemeleri olarak Zn-Mg alaşımları ve bunların mikro yapısal ve mekanik özellikleri hakkında henüz çok az çalışma bulunmaktadır(E. Mostaed et al., 2016). Bir diğer araştırmada ise Zn-1.2 Mg alaşımı ekstrüzyonla işlenmiştir, ekstrüde edilmiş Zn-1.2 Mg alaşımının üstün mekanik performansı, uygun korozyon direnci ve in vitro biyouyumluluğu sayesinde biyolojik olarak derecelendirilebilir bir implant malzemesi olarak potansiyel bir aday olduğu gösterilmiştir(Shen et al., 2016). Zn-Mg

denge diyagramı Şekil 2 ‘de gösterilmektedir. Magnezyumun çinko içindeki katı çözünürlüğünün düşük olduğu, faz diyagramının Zn bakımından zengin bölgesi ve MgZn11 intermetalik fazının küçük magnezyum miktarlarında bile yapıda olduğu görülmektedir(Vojtěch et al., 2011).

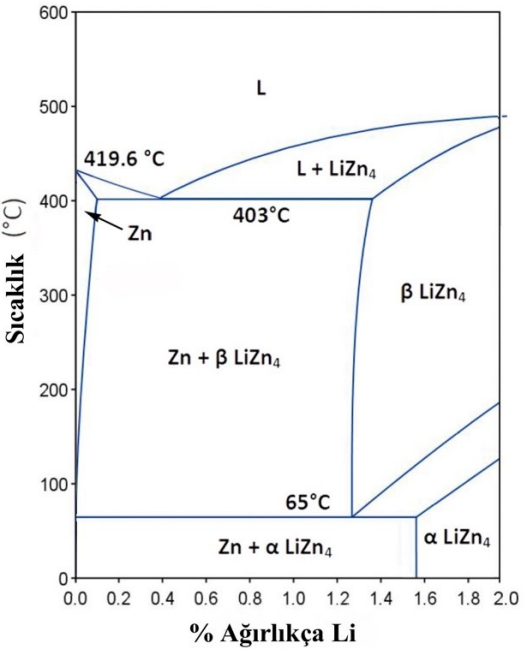



*Şekil 2. Zn-Mg denge faz diyagramı(Vojtěch et al., 2011)*

## 2.2.Biyobozunur Zn-Li Alaşım sistemleri

Zn-Li, Lityumun çinko içindeki önemli çözünürlüğü nedeniyle potansiyel olarak yaşla sertleşebilen birkaç sistemden biridir. Ağırlıkça %4 lityum içeren LAE442’nin in vivo çalışmaları, bu implant malzemesinin ortopedik kullanım için uygunluğunu doğrulamıştır. Ayrıca lityum ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından manik depresyon tedavisi için bir ilaç olarak onaylanmıştır. Ve daha birçok sağlık alanında tedavi amaçlı

kullanımları mevcuttur. Fakat insan vücudu için günlük dozlar belirlenmiştir. Bir Zn-Li stentten (ağırlıkça %0,7 Li içeren) salınan toplam lityum miktarı, günlük vücut tüketimin izin verdiği miktarın 2 kat altındadır ve Li'nin Zn'ya dahil edilmesi, nihai gerilme mukavemetini (UTS) 120 MPa'dan (saf Zn) 560 MPa'ya (%6 Li) yükseltecektir ki kardiyovasküler stent uygulaması 300 MPa gerilme mukavemetine yakın malzeme gerektirmektedir(Yang et al., 2020; Zhao, McNamara, et al., 2017; Zhao, Seitz, et al., 2017; Zhu et al., 2020). Bununla birlikte, aşırı Li içerisi, LiZn4 (Şekil 3) fazındaki büyük hacimsel kırılmalar nedeniyle sünekliği önemli ölçüde düşürmektedir. Kardiyovasküler stent uygulaması için uygun kabo sünekliğini ve yeterli mukavemeti korumak içi Li ilavesi %4 ün (ağırlıkça %0.4) altında kalmalıdır(Zhao, Seitz, et al., 2017). Saf Zn ve Zn alaşımlarının döküm halindeki mukavemet özellikleri, vasküler stentler gibi biyolojik olarak parçalanabilir uygulamaların gereksinimlerini karşılayamamaktadır(Zhu et al., 2020) Zn-Li alaşımları saf Zn'ye kıyasla gelişmiş mekanik özellikleri ve olağanüstü korozyon davranışına dayalı olarak biyolojik parşalanabilir bir başka stent malzeme olduğunu göstermiştir(Zhao, McNamara, et al., 2017).

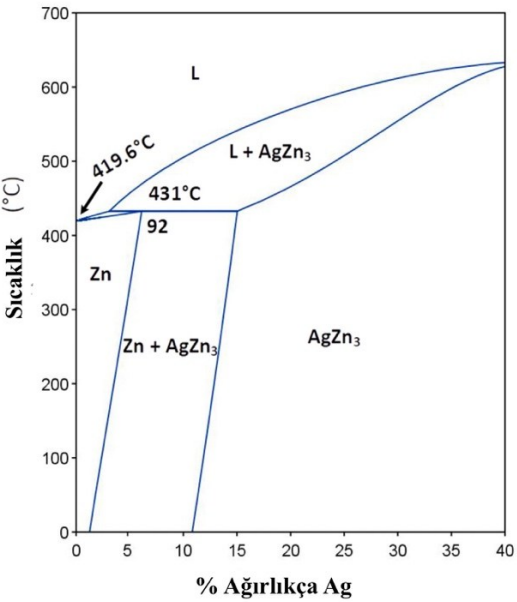



*Şekil 3. Zn-Li Denge faz diyagramı*

## 2.3. Biyobozunur Zn-Ag Alaşım sistemleri

Gümüş insanlık tarihinde antibateriyel özelliğinin bulunması ve korozyon direncinin yüksekliği nedeniyle ev araç gereçlerinde, medikal sektörde ayrıca kozmetik sektöründe kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir. Ayrıca enfeksiyon önlemesi için tıbbi implantlarda ve aletlerde de özellikle günümüzde önerilmektedir(Chernousova & Epple, 2013). Son zamanlarda Zn-Ag alaşımları yeniden kristalleşmeyi teşvik eden $AgZn_3$ (şekil 4) intermetalik fazın oluşumu nedeniyle belirgin şekilde çinko metalinin tane boyutunu küçültmektedir. Örneğin Zn-5Ag ve Zn-7Ag için sırasıyla 4,2 μm ve 1,5 μm tane boyutlarına sahiptir. Bu durum tane inceltme sertleşmesi ve ikinci faz mukavemet arttırıcı

etkilerini arttırmaktadır. Ag ilavesi, nihai gerilme mukavemetini, kopma uzamasından ödün vermeden 280-290 MPa'ya çıkarır ve faydalı bir antibakteriyel etki sağlamaktadır(Guillory et al., 2022). Zn'de peritektik oluşturan bir element olarak görülen Ag, Zn nin tane boyutunu önemli ölçüde azaltabilmektedir(Shuai et al., 2018). Seçici lazer eritme, 105K/s'den daha yüksek bir soğutma hızına sahip hızlı bir katılaştırma teknolojisidir ve tanelerin büyümesini etkili bir şekilde engelleyebilir ve bileşenlerin ayrılmasını engelleyebilmektedir. Seçici lazer yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada Zn-xAg alaşımlarının tanelerinin Ag ile alaşımlama ile önemli ölçüde inceltildiğini göstermiştir. Zn-xAg alaşımlarının korozyon oranı, Zn matrisi ile $AgZn_3$ fazı arasındaki galvanik mikro hücrelerin oluşumu sayesinde Zn'ye kıyasla iyileştirilmiştir. Yüksek mekanik özellikleri göz önüne alındığında Ag'li Zn alaşımları özellikle kemik onarımı için umut vadeden biyomalzemeler olarak iade edilmiştir(Shuai et al., 2018).

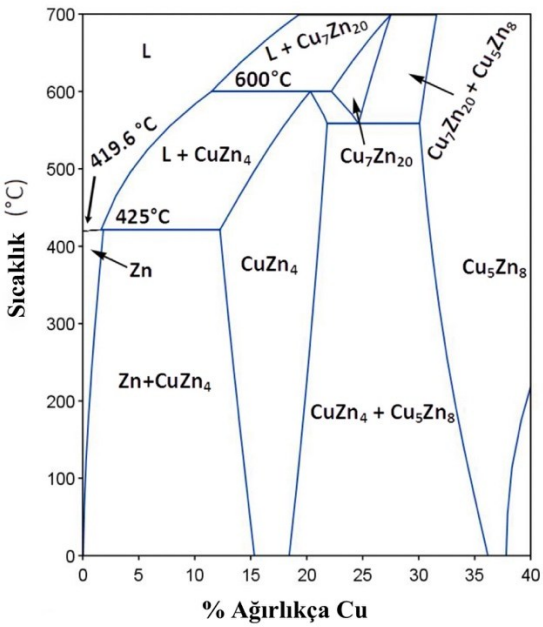



*Şekil 4. Zn-Ag denge faz diyagramı*

## 2.4.Biyobozunur Zn-Cu Alaşım sistemleri

Cu ve Cu bileşiklerinin virüsler, bakteriler, mntarlar ve hatta sporlar dahil olmak üzere çok çeşitli mikroorganizmaları öldürdüğü çeşitli araştırmalarla gösterilmiştir. Aslında, kaydedilen bilgilere göre bakır, iki saat içinde bakterilerin %99,9'undan fazlasını öldürmeye devam etmektedir, üstelik antibiyotik dirençli bakteriler için bile geçerli olduğu yapılan çalışmalar neticesinde kaydedilmiştir(Drelich et al., 2017). Bununla birlikte Cu, endüstriyel uygulamalar için Zn bazlı alaşımlarda yaygın bir alaşım elementidir. Cu'nun Zn'nin mekanik özellikleri iyileştirmesinin yanında insan endotel hücreleri için kabul edilebilir sistotoksisite ve önemli antibakteriyel etki gösterdiği ancak bozunma oranlarının tıbbi uygulamalar için nispeten yavaş olduğu sonucuna ulaşılmıştır(Ehsan

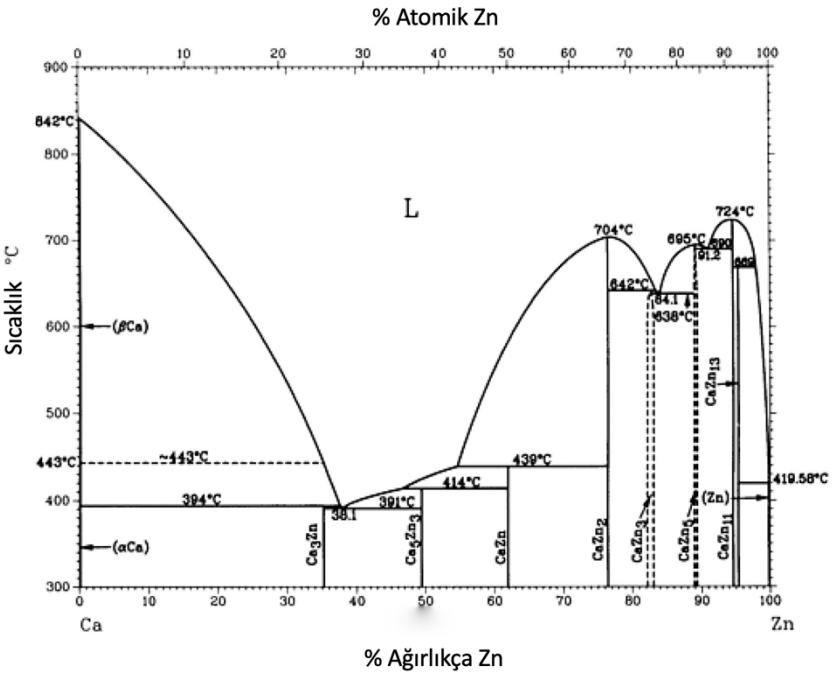
Mostaed et al., 2018). Bakır içeren çeşitli biyomedikal mazlemelerin, bakır iyonlarını serbest bırakarak kan damarlarının oluşumunu hızlandırdığı kanıtlanmıştır(Huang et al., 2020). Sağlanan avantajlar ile Zn-Cu alaşımlarının biyolojik olarak parçalanabilir kardiyovasküler iskele malzemelerinde büyük umut vadetmektedir. Zn-Cu alaşımları 424 $^{o}$C'de peritektik reaksiyona sahiptir (Şekil 5.). Bu nedenle Zn-xCu alaşımların etkisini araştırmak için tek fazlı ve iki fazlı bölgede ağırlıkça % 1,2,3 oranlarına sahip Zn-xCu alaşımlarına ilişkin yürütülen bir çalışmada Zn3Cu'nun belirli korozyon özellikleri ve en iyi mekanik özellikleri ile biyouyumluluğu olduğu tespit edilmiştir(Huang et al., 2020).




*Şekil 5. Zn-Cu denge faz diyagramı(Huang et al., 2020)*

## 2.5. Biyobozunur Zn-Ca Alaşım sistemleri

İnsan vücudunda bir besin elementi olan Ca , Zn alaşımı için başka bir seçenektir. Zn-Ca denge diyagramına göre Zn-Ca ikili alaşımında Zn ve ana ikinci fazda $CaZn_{13}$ yer almaktadır (Şekil 6). Döküm halindeki Zn-Ca alaşımının mekanik performansı, kaba $CaZn_{13}$ fazı nedeniyle zayıftır. Sıcak ekstrüzyon ile Zn-Ca alaşımlarının mukavemeti marttırabilse de saf Zn'ninkine benzer özellik göstermektedir(Zhuo et al., 2022). Diğer taraftan literatürde Zn-Ca alaşımının korozyon davranışının saf Zn'ye göre daha korozif olduğu ve mekanik dayanımında iyileşme gözlenmemiştir(Yang et al., 2020). Bu neden genellikle Zn-Mg alaşımına Ca ilavesi ve ya Zn-Ca-X sistemleri olarak üçlü alaşım elementi şeklinde Ca ilavesi uygulanmıştır(Zhuo et al., 2022). Zn-Mg-Ca alaşımları ile ilgili literatür çalışmaları, bu alaşımların soğutma hızıyla katılaşması ile oluşan farklı fazların değişimine odaklanan deneysel çalışmalar yetersiz görülmektedir(VIDA et al., 2021). Yapılan bir çalışmada Zn açısından zengin dendritik matris ve ötektik karışımda bulunan Zn-Mg alaşımına Ca ve Mn ilavesi ile $CaZn_{11}$ ve $CaZn_{13}$ ile $MnZn_9$ fazları oluşturuldu. Ca ilavesi ile Mn spiral lamellerin oluşumu engellenmiş ve lamelli ötektiği çubuk benzeri bir ötektiğe dönüştürdüğü gözlenmiştir. Ve alaşımın sertlik değerinin arttığı kanıtlanmıştır(VIDA et al., 2021).




*Şekil 6. Zn-Ca denge faz diyagramı*

## KAYNAKLAR

Chandra, G., & Pandey, A. (2020). Biodegradable bone implants in orthopedic applications: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, *40*(2), 596–610. https://doi.org/10.1016/j.bbe.2020.02.003

Chen, Q., & Thouas, G. A. (2015). Metallic implant biomaterials. *Materials Science and Engineering R: Reports*, *87*, 1–57. https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.10.001

Chernousova, S., & Epple, M. (2013). Silver as antibacterial agent: Ion, nanoparticle, and metal. *Angewandte Chemie - International Edition*, *52*(6), 1636–1653. https://doi.org/10.1002/anie.201205923

Drelich, A. J., Miller, J., Donofrio, R., & Drelich, J. W. (2017). Novel durable antimicrobial ceramic with embedded copper sub-microparticles for a steady-state release of copper ions. *Materials*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/ma10070775

Guillory, R. J., Mostaed, E., Oliver, A. A., Morath, L. M., Earley, E. J., Flom, K. L., Kolesar, T. M., Mostaed, A., Summers, H. D., Kwesiga, M. P., Drelich, J. W., Carlson, K. D., Dragomir-Daescu, D., & Goldman, J. (2022). Improved biocompatibility of Zn–Ag-based stent materials by microstructure refinement. *Acta Biomaterialia*, *145*, 416–426. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.03.047

Hildebrand, H. F. (2013). Biomaterials - a history of 7000 years. *BioNanoMaterials*, *14*(3–4), 119–133. https://doi.org/10.1515/bnm-2013-0014

Huang, J., Lai, Y., Jin, H., Guo, H., Ai, F., Xing, Q., Yang, X., & Ross, D. J. (2020). Preparation and Properties of Zn-Cu Alloy for Potential Stent Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *29*(10), 6484–6493. https://doi.org/10.1007/s11665-020-05167-0

Hussain, M., Ullah, S., Raza, M. R., Abbas, N., & Ali, A. (2022). Recent Developments in Zn-Based Biodegradable Materials for Biomedical Applications. *Journal of Functional Biomaterials*, *14*(1), 1. https://doi.org/10.3390/jfb14010001

Levy, G. K., Goldman, J., & Aghion, E. (2017). The prospects of zinc as a structural material for biodegradable implants—a review paper. *Metals*, *7*(10), 1–18. https://doi.org/10.3390/met7100402

Li, C., Huang, T., & Liu, Z. (2023). Effects of thermomechanical processing on microstructures, mechanical properties, and biodegradation behaviour of dilute Zn–Mg alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, *23*, 2940–2955. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.203

Migonney, V. (2014). History of Biomaterials. *Biomaterials*, 1–10. https://doi.org/10.1002/9781119043553.ch1

Mooney, D. J., & Huebsch, N. (2009). Inspiration and application in the evolution of biomaterials. *Nature*, *462*(7272), 426–432. https://doi.org/10.1038/nature08601.Inspiration

Mostaed, E., Sikora-Jasinska, M., Mostaed, A., Loffredo, S., Demir, A. G., Previtali, B., Mantovani, D., Beanland, R., & Vedani, M. (2016). Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: Design, development and in vitro degradation. *Journal*

*of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *60*, 581–602. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.03.018

Mostaed, Ehsan, Sikora-Jasinska, M., Drelich, J. W., & Vedani, M. (2018). Zinc-based alloys for degradable vascular stent applications. *Acta Biomaterialia*, *71*, 1–23. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.03.005

Qin, Y., Liu, A., Guo, H., Shen, Y., Wen, P., Lin, H., Xia, D. D., Voshage, M., Tian, Y., & Zheng, Y. (2022). Additive manufacturing of Zn-Mg alloy porous scaffolds with enhanced osseointegration: In vitro and in vivo studies. *Acta Biomaterialia*, *145*, 403–415. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.03.055

Ratner, B. D. (2013). A History of Biomaterials. *Biomaterials Science: An Introduction to Materials: Third Edition*, xli–liii. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087780-8.00154-6

Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., & Lemons, J. E. (2013). Introduction - Biomaterials Science: An Evolving, Multidisciplinary Endeavor. In *Biomaterials Science: An Introduction to Materials: Third Edition* (Third Edit). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087780-8.00153-4

Seal, B., & Panitch, A. (2006). Biomaterials: An Overview. *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*, *12*(6), 270–274. https://doi.org/10.1017/9781316084304.003

Shen, C., Liu, X., Fan, B., Lan, P., Zhou, F., Li, X., Wang, H., Xiao, X., Li, L., Zhao, S., Guo, Z., Pu, Z., & Zheng, Y. (2016). Mechanical properties,: In vitro degradation behavior, hemocompatibility and cytotoxicity evaluation of Zn-1.2Mg alloy

for biodegradable implants. *RSC Advances*, *6*(89), 86410–86419. https://doi.org/10.1039/c6ra14300h

Shuai, C., Xue, L., Gao, C., Yang, Y., Peng, S., & Zhang, Y. (2018). Selective laser melting of Zn–Ag alloys for bone repair: microstructure, mechanical properties and degradation behaviour. *Virtual and Physical Prototyping*, *13*(3), 146–154. https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1458991

VIDA, T. A., SILVA, C. A. P., LIMA, T. S., CHEUNG, N., BRITO, C., & GARCIA, A. (2021). Tailoring microstructure and microhardness of Zn−1wt.%Mg−(0.5wt.%Mn, 0.5wt.%Ca) alloys by solidification cooling rate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *31*(4), 1031–1048. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65559-0

Vojtěch, D., Kubásek, J., Šerák, J., & Novák, P. (2011). Mechanical and corrosion properties of newly developed biodegradable Zn-based alloys for bone fixation. *Acta Biomaterialia*, *7*(9), 3515–3522. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.05.008

Wang, X., Ma, Y., Meng, B., & Wan, M. (2021). Effect of equal-channel angular pressing on microstructural evolution, mechanical property and biodegradability of an ultrafine-grained zinc alloy. *Materials Science and Engineering: A*, *824*(August), 141857. https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141857

Yang, H., Jia, B., Zhang, Z., Qu, X., Li, G., Lin, W., Zhu, D., Dai, K., & Zheng, Y. (2020). Alloying design of biodegradable zinc as promising bone implants for load-bearing applications. *Nature*

*Communications*, *11*(1), 1–16. https://doi.org/10.1038/s41467-019-14153-7

Zhang, L. N., Hou, Z. T., Ye, X., Xu, Z. Bin, Bai, X. L., & Shang, P. (2013). The effect of selected alloying element additions on properties of Mg-based alloy as bioimplants: A literature review. *Frontiers of Materials Science*, *7*(3), 227–236. https://doi.org/10.1007/s11706-013-0210-z

Zhao, S., McNamara, C. T., Bowen, P. K., Verhun, N., Braykovich, J. P., Goldman, J., & Drelich, J. W. (2017). Structural Characteristics and In Vitro Biodegradation of a Novel Zn-Li Alloy Prepared by Induction Melting and Hot Rolling. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, *48*(3), 1204–1215. https://doi.org/10.1007/s11661-016-3901-0

Zhao, S., Seitz, J. M., Eifler, R., Maier, H. J., Guillory, R. J., Earley, E. J., Drelich, A., Goldman, J., & Drelich, J. W. (2017). Zn-Li alloy after extrusion and drawing: Structural, mechanical characterization, and biodegradation in abdominal aorta of rat. *Materials Science and Engineering C*, *76*, 301–312. https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.02.167

Zhu, S., Wu, C., Li, G., Zheng, Y., & Nie, J. F. (2020). Microstructure, mechanical properties and creep behaviour of extruded Zn-xLi (x = 0.1, 0.3 and 0.4) alloys for biodegradable vascular stent applications. *Materials Science and Engineering: A*, *777*(February), 139082. https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139082

Zhuo, X., Wu, Y., Ju, J., Liu, H., Jiang, J., Hu, Z., Bai, J., & Xue, F. (2022). Recent progress of novel biodegradable zinc alloys: from the perspective of strengthening and toughening. *Journal of Materials Research and Technology*, *17*, 244–269. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.004

# BÖLÜM III

# Nanoteknolojinin Tarımsal Verimliliğe Etkileri; "Nanomalzemelerin Rolü"

Mustafa Sami ATA[1]
Ekrem BÖLÜKBAŞI[2]

## Giriş

Nanoteknoloji; "cüce" anlamına gelen "nano" ölçekli malzemelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri ile birlikte uygulama alanlarını inceleyen bilim dalıdır. Nanotekolojinin hammaddesi konumunda olan nanopartiküller bulk formlarına göre daha küçük boyutta olmasının bir avantajı olarak yüksek yüzey enerjisi ve geniş yüzey alanlarına sahiptir. Nanopartiküller bulk formlarından farklı olarak sahip olduğu yapısal özelliklerinden

[1] Dr. Öğr. Üy., Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye, Orcid: 0000-0003-0944-4276, mustafa.ata@amasya.edu.tr
[2] Doç. Dr., Amasya Üniversitesi, Suluova Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye, Orcid: 0000-0003-3828-1226, ekrem.bolukbasi@amasya.edu.tr

dolayı gelişmiş fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklere sahiptir (Ata vd., 2024; Sangeetha vd., 2011). Nanopartiküller endüstriyel alanda yaygın olarak kullanımı nedeni ile nanopartikülerin sentez yöntemi ekonomik, ekolojik ve uygulanabilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda nanopartiküllerin biyomoleküller ile sentezlenmesi yani; "yeşil biyosentez" araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Biyolojik sentezde indirgeyici ajan olarak bitki, alg, liken, mantar ve mikroorganizmalar gibi biyolojik özütlerin kullanılması, yukarıda bahsedilen geleneksel yöntemlere kıyasla ucuz, kimyasal reaktan kullanmaksızın ve pahalı ekipmanlar gerektirmeden sentezlenmektedir (Senapati vd., 2012).

Nanopartiküllerin farklı morfoloji ve yapısal özelliklerine sahip olan organik@inorganik tabanlı hibrit nanoyapıların güneş pilleri (Li vd., 2019), sensor uygulamaları (Baek vd., 2020), arıtım işlemleri (Sang vd., 2020), enzim ve antimikrobiyal ve antikanser uygulamalarda (Sharma vd., 2020) kullanım yeterliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca gıda ve tarım sektöründe nanopartiküllerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle tarımsal sistemlerde nanapartiküller; bitki verimliliğinden bitki patojenlerine kadar geniş bir yelpazede kullanıma başlanmıştır. Genel olarak NP'lerin kullanım alanları aşağıda verilen Tablo 1'de özetlenmiştir (Molina vd., 2019).

***Tablo 1*** *Nanopartiküllerin kullanım alanları*

| Sektör | Uygulama |
|---|---|
| Biyomühendislik, tıp ve sağlık | Kemik doku mühendisliği, Pansuman malzemeleri, Elektronik veri toplama aletleri, ilaç transferi, moleküler görüntüleme |
| Çevre ve enerji | Hava ve su arıtımı |
| Ev işleri | Seramik, cam ve pencere temizleme materyalleri |
| İnşaat | Boya, vernik, plastik üretimi |
| Kozmetik | Güneş kremi, diş macunu |
| Mühendislik | Makineler ve diğer araçlar için koruyucu kaplamalar |
| Otomotiv | Araba aletleri, Sensörler, katalizörler |
| Savunma | İnsansız hava araçları, akıllı mermiler, akıllı üniformalar |
| Spor materyalleri | Tenis raketleri |
| Tarım ve gıda | Nanogübre, tarımsal ilaç, Bitki hastalıkları, Patojenlere karşı |
| Tekstil | Yanmayan ve çarpmaya dayanıklı yüzeyler, suya dayanıklı kumaşlar |

Gıda üretiminin sürdürülebilirliği, dünya genelinde artan nüfus ve iklim değişiklikleriyle birlikte daha fazla önem kazanmış, bitki hastalıkları ise bu süreçte ciddi bir tehdit haline gelmiştir (Elmer & White, 2018). Bitki patojenleri, ürün verimliliğinde kayıplara yol açarken tarımsal sürdürülebilirliği de olumsuz etkilemektedir (Pandey vd., 2018). Geleneksel pestisitler, zararlıların kontrolünde önemli rol oynasa da, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle daha güvenli ve etkili çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır (Meena vd., 2020). Bu bağlamda, mühendislik ürünü nanopartiküller (NP'ler), bitki sağlığını koruma ve patojenleri kontrol altına alma konusunda umut vaat eden bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Nanopartiküllerin büyük yüzey alanı ve yüksek reaktivite gibi özellikleri, onları bitki patojenlerine karşı etkili bir antimikrobiyal

araç haline getirmektedir. Örneğin, titanyum dioksit ($TiO_2$) ve çinko oksit (ZnO) nanopartikülleri, birçok patojene karşı güçlü koruyucu etkiler göstermiştir (Mahmoodzadeh vd., 2013). Bu özellikler, nanopartiküllerin tarımsal uygulamalarda erken teşhis ve hastalık yönetimi için biyosensör olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

Bununla birlikte, nanopartiküllerin bitki sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkileri ve çevrede birikme riskleri de göz önünde bulundurulmalıdır (Vargas-Hernandez vd., 2020). Bu sebeple, çevre dostu sentez yöntemleri ve kontrollü dozaj uygulamaları gibi konular, mühendislik nanopartiküllerinin güvenli kullanımı için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, nanopartiküllerin tarımsal uygulamalarda güvenli entegrasyonunu sağlamak amacıyla düzenleyici çerçeveler geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çerçevede, mühendislik nanopartiküllerinin bitki hastalık yönetimindeki uygulamaları, hem tarımsal verimliliği artıracak hem de gıda güvenliğini destekleyecek önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

## 1.Nanopartiküllerin Sentezi ve Çevre Dostu Yaklaşımlar

### 1.1.Kimyasal ve biyolojik (yeşil) sentez yöntemleri

Nanopartikül sentezi, farklı yöntemler kullanılarak çeşitli boyut, şekil ve özelliklerde nanopartiküller elde edilmesini sağlar. Kimyasal sentez yöntemleri, özellikle indirgeme, çöktürme ve sol-jel teknikleri gibi birçok alt yöntemi içerir. Bu yöntemlerde indirgeme ajanları olarak sodyum borohidrat veya hidroksilamin gibi kimyasal bileşikler kullanılır ve bu sayede kontrollü boyut ve yapıda nanopartiküller elde edilir. Ancak, bu kimyasalların toksik yan ürünlere neden olması ve çevreye zarar verme potansiyeli,

kimyasal sentez yönteminin kısıtlamalarından biridir. Özellikle, bu tür sentezlerde kullanılan kimyasalların doğrudan doğaya karışması durumunda çevresel toksisite ve biyoakümülasyon riskleri ortaya çıkabilmektedir (Mittal vd., 2013).

Biyolojik sentez yöntemleri, mikroorganizmalar (bakteriler, mantarlar) ve bitki özütleri kullanarak nanopartiküllerin üretiminde çevre dostu bir alternatif sunar. Mikroorganizmalar metal iyonlarını biyolojik süreçlerle indirger ve stabilize eder. Örneğin, *Bacillus subtilis* ve *Aspergillus niger* gibi mikroorganizmalar, gümüş ve altın nanopartiküllerini biyolojik olarak sentezleyebilmektedir (Singh vd., 2021). Bu biyolojik süreçler, düşük enerji gereksinimleri ve zararlı kimyasal kullanılmaması nedeniyle sürdürülebilir olarak değerlendirilir. Mikroorganizmalar, nanopartiküllerin homojen boyut dağılımı ve yüksek yüzey aktivitesi elde edilmesine de katkıda bulunmaktadır.

Son yıllarda yeşil sentez yöntemleri öne çıkmaktadır. Bu yöntemler, bitki özütleri, polisakkaritler, proteinler gibi çevre dostu ve biyoaktif maddeler kullanarak nanopartiküllerin üretimini içerir. Özellikle, bitki özütleri, polifenoller ve flavonoidler gibi doğal bileşenler içerdiğinden, kimyasal indirgeme ajanları yerine etkili biyo-indirgeyiciler olarak kullanılır. Örneğin, *Pelargotnium graveolens* ve *Azadirachta indica* özütleri, gümüş ve altın nanopartiküllerin yeşil sentezinde kullanılmıştır ve bu nanopartiküllerin antimikrobiyal etkinliği yüksek bulunmuştur (Ahmed vd., 2017). Bu tür bitkisel bazlı sentez yöntemleri, biyobozunur ve biyouyumlu nanopartiküller elde etmeyi mümkün kılar, bu da tarımsal uygulamalarda güvenle kullanılmalarını sağlamaktadır.

Kimyasal ve biyolojik sentez yöntemleri arasındaki temel farklardan biri, biyolojik ve yeşil sentez yöntemlerinde çevreye zararlı atıkların ortaya çıkmaması veya minimal düzeyde kalmasıdır. Kimyasal sentez yöntemlerinde olduğu gibi toksik atıklar üretmeden nanopartiküllerin sentezlenebilmesi, özellikle tarım ve gıda endüstrisinde bu biyolojik yöntemlerin önemini artırmaktadır Nanopartiküllerin daha çevre dostu ve sürdürülebilir şekilde üretilebilmesi, biyolojik ve yeşil sentez yöntemlerini ileriye taşıyan en önemli avantajlardan biridir.

## 1.2.Nanopartikül sentezinde kullanılan bitki ekstraktları ve diğer doğal kaynaklar

Nanopartikül sentezinde kullanılan bitki ekstraktları ve diğer doğal kaynaklar, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım sunarak kimyasal sentezdeki toksik ajanlara alternatif oluşturmaktadır. Bitki ekstraktları, doğal indirgeyici ve kaplayıcı ajanlar içerir. Bu sayede, metal iyonlarını biyolojik olarak indirgemek ve stabilize etmek için ideal birer kaynak haline gelirler. Özellikle, *Pelargonium graveolens*, *Azadirachta indica* ve *Ocimum sanctum* gibi bitkiler, polifenoller, flavonoidler ve terpenoidler gibi doğal bileşenleri sayesinde, gümüş ve altın nanopartiküllerin sentezinde etkili indirgeyici ajanlar olarak kullanılmıştır (Ahmed vd., 2017).

Bitki ekstraktlarının yanı sıra, meyve ve sebze özütleri de nanopartikül sentezinde kullanılmaktadır. Örneğin, üzüm, nar ve limon gibi meyve özütleri, yüksek antioksidan içerikleriyle metal iyonlarının nanopartiküllere dönüşümünü sağlar. Nar kabuğu özütü kullanılarak sentezlenen gümüş nanopartiküllerin, antimikrobiyal aktivite açısından oldukça etkin olduğu bulunmuştur (Ahmed vd., 2017). Bu doğal bileşenler, aynı zamanda nanopartiküllerin yüzey

kaplama ajanı olarak işlev görerek onların stabilitesini ve biyolojik etkinliğini artırmaktadır.

Mikroorganizmalar da nanopartikül sentezinde biyolojik birer kaynak olarak dikkat çekmektedir. *Bacillus subtilis* ve *Pseudomonas aeruginosa* gibi bakteriler, metal iyonlarını biyoaktif nanopartiküllere indirgeme kapasitesine sahiptir. Özellikle, bu tür mikroorganizmaların gümüş ve altın gibi metalleri indirgeme yeteneği, biyolojik sentezde güvenli ve çevre dostu bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bakterilerin yanı sıra, mantarlar da nanopartikül sentezinde kullanılmaktadır. *Aspergillus niger* ve *Fusarium oxysporum* gibi mantarlar, metal iyonlarını biyolojik süreçlerle indirger ve bu nanopartiküller çevreye daha az toksik etki gösterir (Hassan vd., 2018).

Bu doğal kaynakların nanopartikül sentezinde kullanılmasının çevre üzerindeki olumlu etkileri çok yönlüdür. İlk olarak, bu biyolojik ajanların kullanımı, kimyasal sentezde kullanılan toksik indirgeme ve kaplama ajanlarına duyulan ihtiyacı azaltır. Ayrıca, bitki ve mikroorganizmalarla yapılan sentez, nanopartiküllerin biyobozunur özellikler kazanmasını sağlayarak doğaya daha az zarar vermesine yol açmaktadır. Doğal kaynakların kullanılması, aynı zamanda nanopartiküllerin biyolojik etkinliğini artırarak antimikrobiyal, antikanserojen ve antioksidan özelliklerini de güçlendirebilir (Singh vd., 2021).

Özetle, nanopartikül sentezinde bitki ekstraktları ve mikroorganizmalar gibi doğal kaynakların kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sağlar. Bu yaklaşım,

tarım ve biyomedikal uygulamalarda güvenli, ekonomik ve biyouyumlu nanopartiküller üretilmesini desteklemektedir.

### 1.3.Çevresel ve toksikolojik açıdan güvenlik önlemleri

Nanopartiküllerin çevresel ve toksikolojik açıdan güvenliği, özellikle tarımsal uygulamalarda ve ekosistemlerde nanopartiküllerin uzun vadeli etkilerini göz önüne aldığımızda kritik bir konudur. Çeşitli nanopartiküllerin çevresel yayılımı, biyobirikim potansiyeli ve toksikolojik etkileri, üretim sürecinde ve uygulama aşamasında dikkatle yönetilmelidir. Gümüş (Ag) ve çinko oksit (ZnO) nanopartiküller, bitki sağlığına fayda sağlayabilse de yüksek konsantrasyonlarda topraktaki mikroorganizmalar üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir, bu da toprak verimliliğini düşürebilir (Priester vd., 2012). Bu nedenle, nanopartiküllerin toprak ekosistemine etkilerini azaltmak için kontrollü dozaj uygulamaları ve nanopartikül boyutlarının dikkatle seçilmesi gerekmektedir.

Nanopartiküllerin toksisite düzeyleri, kullanılan materyalin tipi, nanopartikül boyutu, yüzey özellikleri ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin, küçük boyutlu ve yüksek yüzey alanına sahip nanopartiküller, daha yüksek biyolojik reaktivite gösterdiğinden, canlı organizmalar üzerinde daha güçlü toksik etkiler yaratabilir. Metal oksit nanopartiküller (ör. $TiO_2$, CuO), serbest radikal üretimine neden olarak bitki hücre zarlarını zedeleyebilir ve hücre içi oksidatif stresi artırabilir (Ghosh vd., 2010). Bu nedenle, çevreye salınan nanopartiküllerin toksik etkilerini minimize etmek için biyolojik olarak uyumlu ve daha düşük toksisiteye sahip nanopartikül sentezine yönelmek önemlidir.

Nanopartiküllerin güvenli kullanımı için bazı stratejiler geliştirilmiştir. Yeşil sentez ile elde edilen nanopartiküller, çevre dostu olmalarının yanı sıra biyolojik olarak bozunabilir ve daha az toksik özellikler taşıma eğilimindedir. Bu yöntem, nanopartiküllerin çevrede biyobirikim yapma potansiyelini azaltarak uzun vadeli çevresel etkileri minimize edebilir (Siddiqi vd., 2018). Aynı zamanda, nanopartiküllerin çevreye güvenli bir şekilde salınmasını sağlamak için kapsülleme teknikleri de kullanılabilir. Bu teknikler, aktif bileşenlerin kontrollü salınımını sağlayarak çevresel maruziyeti azaltır ve bitkilerin biyoyararlanımını artırır.

Nanopartiküllerin toksikolojik açıdan güvenliği sağlamak için biyobozunur materyaller kullanmak ve nanopartiküllerin yüzey modifikasyonlarını çevre dostu hale getirmek de önemlidir. Örneğin, nanopartiküllerin bitki büyüme ortamına salınması durumunda toksisiteyi önlemek için biyobozunur polimerlerle kaplanmış nanopartiküller tercih edilebilir (Subramanian & Rajkishore, 2018). Ayrıca, tarımsal uygulamalarda kullanılan nanopartiküllerin etkinliği ve güvenliği konusunda kapsamlı çevresel risk değerlendirmeleri yapılmalıdır. Bu değerlendirmeler hem kısa hem de uzun vadede nanopartiküllerin ekosistem üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak için gereklidir.

Çevresel ve toksikolojik güvenlik önlemleri, nanopartiküllerin tarımsal uygulamalarda sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önemli bir temel oluşturur. Nanopartiküllerin çevreye duyarlı ve güvenli bir şekilde uygulanabilmesi için sentez, kaplama ve salınım aşamalarında çevre dostu ve toksikolojik riski düşük yöntemlerin tercih edilmesi, uzun vadeli ekolojik dengeyi korumaya yardımcı olabilir.

## 2.Biyolojik Sentez Yöntemleri ve Ekolojik Etkiler

### 2.1.Çevre dostu nanopartikül sentezi: bitki ve mikroorganizma kullanımı

Nanopartiküllerin çevre dostu sentezi, sürdürülebilir tarım uygulamaları için büyük bir öneme sahiptir. Bitkisel özütler ve mikroorganizmalar kullanılarak yapılan biyolojik sentez süreçleri, kimyasal yöntemlere göre daha düşük toksisiteye sahip ürünler oluşturur. Örneğin, bitkisel özütlerle gerçekleştirilen gümüş (Ag) nanopartikül sentezi, geleneksel kimyasal indirgeme ajanlarına gerek duymadan antimikrobiyal özellikleri güçlü nanopartiküller elde edilmesini sağlar (Mittal vd., 2013). Bu yöntem, özellikle bitki patojenleriyle mücadelede çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Mikroorganizmalar da nanopartikül sentezinde etkili birer biyolojik ajan olarak görev yapmaktadır. Bakteri ve mantar türleri, metal iyonlarını hücre dışı veya hücre içi mekanizmalarla nanopartiküllere dönüştürme yeteneğine sahiptir. Bacillus subtilis gibi bakteriler, gümüş nanopartikül sentezinde kullanılmış olup, düşük maliyetli ve çevreye zararsız bir yöntem olarak öne çıkmıştır (Singh vd., 2021). Mikroorganizmaların bu tür biyosentez süreçlerinde biyokatalitik roller üstlenmesi, nanopartiküllerin daha homojen ve kontrol edilebilir morfolojilere sahip olmasını sağlamaktadır.

Biyolojik sentez yöntemlerinin çevre dostu olması, tarımda sürdürülebilir çözümler sunarken, aynı zamanda toprak ve su kaynakları üzerindeki olumsuz etkileri de minimize eder. Kimyasal maddelerden arındırılmış nanopartiküller, tarımsal uygulamalarda daha az toksik yan etkilere sahiptir, böylece bitkilerin yanı sıra

topraktaki mikroorganizmalar ve faydalı böcekler üzerinde de olumlu bir etki bırakır (Siddiqi vd., 2018).

## 2.2.Nanopartiküllerin tarımsal sistemlerde çevresel etkileri

Nanopartiküllerin tarımsal sistemlerde kullanımı, bitki büyümesini teşvik etmek, hastalıkları kontrol etmek ve ürün verimliliğini artırmak açısından büyük potansiyel sunar. Ancak, bu yenilikçi materyallerin çevresel etkileri de dikkatle değerlendirilmelidir. Özellikle, metal oksit nanopartiküllerin (ör. ZnO, $TiO_2$, CuO) toprak ekosistemi üzerindeki etkileri konusunda çeşitli endişeler bulunmaktadır. Bu nanopartiküller, hem bitkilerde hem de topraktaki mikrobiyal topluluklarda biyokimyasal ve fizyolojik değişikliklere neden olabilmektedir (Gajjar et al., 2009). Yapılan çalışmalar, ZnO ve Ag nanopartiküllerin yüksek konsantrasyonlarda topraktaki mikroorganizma çeşitliliğini ve enzim aktivitelerini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir (Priester vd., 2012).

Topraktaki nanopartiküllerin bitkilerle etkileşimi de bu maddelerin çevresel etkileri üzerinde belirleyicidir. Örneğin, bitkiler tarafından absorbe edilen bazı metal oksit nanopartiküller, kök dokularında birikir ve hücre içi zarların geçirgenliğini etkileyerek bitki sağlığını olumsuz yönde etkileyebilir (Rico vd., 2013). Ancak, doğru dozlarda kullanıldığında, nanopartiküller bitki sağlığını ve büyümesini destekleyebilir. Örneğin, uygun konsantrasyonlarda uygulanan $TiO_2$ nanopartikülleri, bitki fotosentezini artırarak daha sağlıklı bir büyüme sağlayabilmektedir.

Öte yandan, nanopartiküllerin çevresel yayılımı ve biyolojik birikimi üzerine yapılan araştırmalar, tarımsal sistemler üzerindeki

potansiyel uzun vadeli etkilerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Biyolojik birikim potansiyeline sahip bazı nanopartiküller, besin zincirinde yukarı doğru taşınarak insan sağlığına da olumsuz etki edebilirler. Ayrıca, nanopartiküllerin toprak ekosisteminde birikmesi, toprak organizmalarının biyolojik döngülerini bozarak ekosistem sağlığını tehlikeye atabilirler.

Nanopartiküllerin çevre üzerindeki bu etkilerini azaltmak için biyolojik sentez yöntemlerinin kullanılması bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bitki bazlı sentezle üretilen biyouyumlu nanopartiküller, geleneksel kimyasal yöntemlerle üretilen nanopartiküllere göre daha az toksiktir ve çevresel etkiyi minimize edebilir (Siddiqi vd., 2018). Çevresel ve biyolojik risklerin azaltılması için, nanopartiküllerin sürdürülebilir bir şekilde uygulanması ve çevre dostu sentez yöntemlerinin geliştirilmesi, tarımsal sistemlerde nanopartikül kullanımının yaygınlaştırılmasını kolaylaştırabilir.

## 3.Nanoteknolojinin Gıda Güvenliği ve Üretimine Etkisi

### 3.1.Nanopartiküller ve nanogübreler ile bitki beslenmesinin iyileştirilmesi

Nanoteknoloji, bitki beslenmesini desteklemek ve tarımsal verimliliği artırmak için çeşitli yenilikçi çözümler sunar. Nanosensörler, bitkilerin ihtiyaç duyduğu besin maddelerinin doğru zamanda uygulanmasını sağlayarak büyüme sürecinin optimize edilmesine katkıda bulunur. Bu sensörler, topraktaki besin, nem, pH, sıcaklık gibi parametreleri izleyebilir ve çiftçilere doğru zamanda müdahale etme olanağı tanır. Özellikle tarımsal alanlarda kullanılan nanosensörler, bitki sağlığını ve gelişimini gerçek zamanlı olarak izleyebilme yetenekleri sayesinde, bitkilerin besin ihtiyaçlarını

erken dönemde tespit ederek daha sağlıklı büyümelerine olanak sağlamaktadır (Rana vd., 2024). Hastalıkların erken teşhisi için geliştirilen nano-biyosensörler de bitkilerin enfeksiyona karşı korunmasına yardımcı olur.

Nanogübreler, bitkilere daha yüksek oranda ve etkin bir şekilde besin sağlama amacıyla kullanılan bir diğer yenilikçi nanoteknoloji ürünüdür. Geleneksel gübreler çoğunlukla toprakta hızla çözünür ve besin kaybına yol açarken, nanogübreler kontrollü salınım özellikleri sayesinde besin maddelerini bitki köklerine yavaş ve sürekli bir şekilde ileterek bu kaybı minimize etmektedir. Örneğin, azot ve fosfor gibi temel makro besinler ve çinko gibi mikro besinlerden üretilen nanogübreler, bitkilerin gelişim sürecinde ihtiyaç duyduğu besinleri daha verimli bir şekilde sağlar ve bu da ürün verimini artırır (Prasad vd., 2017). Nanogübreler ayrıca, besinlerin bitki hücreleri tarafından daha etkin bir şekilde emilmesine yardımcı olur ve böylece büyüme performansını artırır.

Nanogübrelerin sağladığı avantajlar, hem çevresel hem de ekonomik açılardan önemlidir. Kontrollü salınım özellikleri sayesinde, toprakta biriken fazla besin miktarı azalır ve bu da su kaynaklarının kirliliğini önler. Aynı zamanda, daha az miktarda gübre kullanılarak aynı verim elde edilebildiği için, nanogübrelerin ekonomik açıdan da sürdürülebilir olduğu söylenebilir. Bu özellikler, nanogübrelerin çevresel sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından geleneksel gübrelere göre daha üstün olduğunu göstermektedir.

Nanosensörler ve nanogübreler, tarımda daha verimli bir bitki beslenme sistemi sağlamak için güçlü araçlar olarak kabul

edilmektedir. Nanosensörler, bitki besin ihtiyaçlarını hızlı ve doğru bir şekilde belirleyerek tarımsal süreçlerin daha verimli yönetilmesini sağlarken; nanogübreler, besin maddelerinin daha verimli kullanılmasını sağlayarak hem verimi artırmakta hem de çevreye olan olumsuz etkileri azaltmaktadır. Bu teknolojilerin, sürdürülebilir tarım uygulamaları için gelecek vaat eden çözümler sunduğu açıktır.

### 3.2.Gıda zincirinde nanopartiküllerin potansiyel etkileri ve güvenlik endişeleri

Nanopartiküllerin tarımsal uygulamalarda yaygınlaşması, bu maddelerin gıda zincirine dahil olma potansiyelini artırmaktadır. Nanopartiküller bitkiler tarafından emildiğinde, bu maddeler bitki dokularında birikim yapabilir ve tüketildiğinde insan vücuduna taşınabilir. Bu durum, nanopartiküllerin gıda güvenliği üzerindeki potansiyel etkileri konusunda güvenlik endişelerini artırmaktadır. Özellikle metal oksit nanopartiküller, serbest radikal oluşumuna yol açarak hücresel düzeyde oksidatif strese neden olabilir ve bu da DNA, proteinler ve hücre zarları üzerinde hasar oluşturabilir (Gogos vd., 2012). Örneğin, çinko oksit (ZnO) ve gümüş (Ag) nanopartiküller, antimikrobiyal özellikleri nedeniyle tarımda kullanılmalarına rağmen, toksikolojik açıdan insan sağlığına risk oluşturabilir.

Gıda zincirine giren nanopartiküllerin vücuttaki etkileri henüz tam olarak anlaşılmamış olmakla birlikte, bazı çalışmalar bu maddelerin biyokimyasal süreçleri değiştirebileceğini göstermektedir. Nanopartiküller, insan vücuduna girdiğinde sindirim sistemi yoluyla emilip kana karışabilir. Bu süreçte, nanopartiküllerin yüksek yüzey alanları ve küçük boyutları

nedeniyle biyoaktif hale gelmeleri mümkündür, bu da hücresel seviyede olası toksik etkileri artırabilir (Rico vd., 2013). Örneğin, bazı nanopartiküller hücre zarını geçerek organlarda birikebilir ve uzun vadede sağlık sorunlarına yol açabilir. Özellikle karaciğer, böbrek ve beyin gibi organlarda birikim yapabilen nanopartiküllerin potansiyel toksik etkileri halen araştırılmaktadır.

Gıda güvenliği açısından bir diğer önemli konu, nanopartiküllerin çevresel yayılımı ve biyoakümülasyon potansiyelidir. Toprağa veya suya salınan nanopartiküller, besin zincirinde yukarı doğru taşınarak toprak mikroorganizmalarından bitkilere, oradan da insanlara kadar ulaşabilir. Toprak mikroorganizmaları üzerinde yapılan bazı araştırmalar, nanopartiküllerin bu organizmaların biyolojik fonksiyonlarını etkileyebileceğini ve mikroorganizma çeşitliliğini azaltabileceğini ortaya koymuştur (Priester vd., 2012). Mikroorganizmalar, besin döngüsü ve toprak sağlığı açısından kritik bir role sahip olduğundan, bu etkiler tarımsal ekosistemlerin sürdürülebilirliğini tehlikeye atabilir.

Nanopartiküllerin güvenli kullanımını sağlamak amacıyla, nanopartikül uygulamalarında biyouyumluluğu ve biyobozunurluğu yüksek olan materyallerin tercih edilmesi önerilmektedir. Örneğin, karbon bazlı nanomateryaller, metal nanopartiküllere göre daha düşük toksisiteye sahip olup daha güvenli alternatifler olarak değerlendirilmektedir (Nair vd., 2010). Ayrıca, nanopartiküllerin gıda güvenliği üzerindeki uzun vadeli etkilerini anlamak için kapsamlı risk değerlendirmeleri yapılması önemlidir. Bu risk değerlendirmeleri, nanopartiküllerin tarımsal ekosistemlere ve gıda

zincirine olan etkilerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olacak ve güvenlik protokollerinin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır.

Özetle, nanopartiküllerin gıda zincirindeki potansiyel etkileri ve insan sağlığı üzerindeki güvenlik endişeleri, bu teknolojinin kullanımında dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Nanopartiküllerin çevreye ve gıda zincirine girişini kontrol altına almak için biyouyumlu ve biyobozunur materyallerin kullanılması, düzenleyici önlemler alınması ve kapsamlı araştırmaların yapılması, gıda güvenliğinin sağlanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

## 4.Nanoteknoloji ile Tarımsal Sistemlerde Bitki Hastalıklarının Yönetimi

Nanopartiküller (NP'ler), büyük yüzey alanları, yüksek reaktivite kapasiteleri ve kontrollü salım özellikleri sayesinde, geleneksel pestisitlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik potansiyel taşımaktadır. Tarımda bitki hastalıklarının önlenmesi ve patojenlerin baskılanması amacıyla kullanılan bu nanopartiküller, özellikle metaller ve metal oksitler ile çeşitli bileşiklerden oluşmaktadır. Titanyum dioksit ($TiO_2$), çinko oksit (ZnO) ve gümüş (Ag) gibi metal nanopartiküller, bitki patojenleri üzerinde doğrudan öldürücü veya inhibe edici etkiler göstererek tarımsal üretimde sürdürülebilirliği desteklemektedir (Kumar vd., 2021). Bu bağlamda, nanopartiküllerin tarımsal üretim ve bitki sağlığı üzerindeki rolleri, hem patojenleri engelleme yetenekleri hem de çevreye olan potansiyel etkileriyle önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır.

## 4.1.Bitki hastalıkları ve tarımsal üretim üzerindeki etkiler

Küresel gıda güvenliğini sağlamak için bitki hastalıklarının kontrol altına alınması büyük önem taşımaktadır. Günümüzde tarımsal ürünlerde her yıl meydana gelen kayıpların yaklaşık % 20-30'unun çeşitli bitki hastalıklarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Elmer & White, 2018). Bu patojenler, bakteriler, mantarlar, virüsler ve nematodlar gibi çeşitli zararlı organizmalardan oluşur ve ürünlerin kalitesi ile verimliliğinde ciddi düşüşlere neden olmaktadır (Servin vd., 2015). Örneğin, *Fusarium* ve *Phytophthora* gibi mantar patojenleri dünya çapında önemli gıda ürünlerinde büyük kayıplara neden olmaktadır (Pandey vd., 2018). Bitki hastalıklarının neden olduğu bu kayıplar, tarım sektörünün ekonomik sürdürülebilirliğini tehdit etmekle kalmaz, aynı zamanda üretim maliyetlerini de artırarak çiftçilerin gelirlerini olumsuz etkilemektedir.

Bitki hastalıklarının tarımsal üretim üzerindeki etkilerini daha da artıran bir diğer faktör ise iklim değişikliğidir. İklim koşullarının değişmesi, patojenlerin daha geniş alanlara yayılmasına ve daha dayanıklı hale gelmesine sebep olarak küresel tarımsal üretim üzerindeki baskıyı artırmaktadır (Elmer & White, 2018). Ayrıca, bazı patojenlerin pestisitlere karşı direnç geliştirmesi, hastalık yönetiminde sürekli güncellenen stratejilere ihtiyaç doğurmaktadır (Meena vd., 2020). Bu durum, genetik dayanıklılığı olmayan veya sınırlı dayanıklılık sağlayan bitki türleri üzerinde daha fazla zarara yol açabilmektedir. İklim değişikliğinin hastalık döngüleri ve patojen dayanıklılığı üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, bitki sağlığını korumak için çevre dostu ve etkili alternatiflerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Geleneksel kimyasal pestisitler, hastalıkları kısa vadede kontrol altına alabilse de, bu kimyasalların çevresel etkileri uzun vadeli sorunlara yol açmaktadır. Pestisit kullanımı, toprak sağlığını bozmakta, yeraltı sularını kirletmekte ve hedef olmayan organizmalar üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır (Meena vd., 2020). Özellikle toprakta kalıcı olan bu kimyasal bileşiklerin biyolojik birikim yapması, ekosistem dengesi için tehdit oluşturmaktadır. Öte yandan, bitki hastalıkları ve zararlılara karşı kullanılan mevcut kimyasal maddelerin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için yoğun miktarda kullanılması gerekmesi, ürün maliyetini artırmakta ve sürdürülebilirlik hedefleriyle çeliştiği düşünülmektedir.

Bitki sağlığını koruma amacıyla farklı pestisitlerin geliştirilmesine yönelik olarak yürütülen çalışmalarda, kimyasal içerikli pestisitlerin hedeflenen bitkiler üzerinde etkinliğini yitirdiği gözlemlenmiştir. Bazı patojenlerin pestisitlere karşı direnç geliştirmesi, hastalık yönetiminde zorluklara yol açmaktadır (Servin vd., 2015). Üstelik, geleneksel yöntemlerin etkinliğini sınırlayan bu direnç gelişimi, patojen kontrolünde yeni stratejilerin oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla, çevresel etkileri azaltacak, verimliliği artıracak ve sürdürülebilirliği destekleyecek yeni teknolojilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda mühendislik nanopartikülleri gibi yenilikçi çözümler, bitki patojenlerinin baskılanmasında çevre dostu ve sürdürülebilir alternatifler olarak dikkat çekmektedir.

## 4.2.Nanopartiküllerin bitki patolojisindeki rolü

Nanopartiküller (NP'ler), bitki patolojisi alanında yenilikçi bir çözüm olarak, hastalık yönetimi ve bitki sağlığının korunmasında

önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle metal ve metal oksit nanopartiküller, patojen hücreleri üzerinde doğrudan antimikrobiyal etki göstererek hastalıkların yayılmasını engeller. Gümüş (Ag), çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit ($TiO_2$) nanopartikülleri, çeşitli bitki patojenlerine karşı etkinlikleri ile bilinir ve bu nanopartiküller geniş yüzey alanları, yüksek reaktivite ve oksidatif stres yaratma kapasiteleri sayesinde bitki patojenlerini baskılama potansiyeline sahiptir (Mahmoodzadeh vd., 2013). Bu nanopartiküllerin, bakteri, mantar ve virüs gibi çok çeşitli patojenleri hedef alabilmesi, tarımsal uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanına işaret etmektedir.

Özellikle gümüş nanopartiküller (AgNP'ler), hücre zarı proteinleri ile etkileşime girerek hücre geçirgenliğini bozmakta ve patojenlerin biyokimyasal süreçlerini aksatmaktadır. Gümüş iyonlarının bu etkisi, plazma membranındaki sülfidril gruplarına bağlanarak proteinlerin inaktive edilmesiyle ortaya çıkmakta, bu da patojenin hücresel metabolizmasını ciddi şekilde sekteye uğratmaktadır (Siddiquee vd., 2014). Gümüş iyonlarının, mantar ve bakteri patojenlerine karşı yüksek etkililiği gösterilmiş olup, özellikle tarımsal uygulamalarda geniş bir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir.

Çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit ($TiO_2$) nanopartikülleri, reaktif oksijen türleri (ROS) üretimi ile patojenleri hedef almakta, oksidatif stres yaratarak patojen hücre zarlarını ve DNA yapılarını bozmakta etkinlik göstermektedir (Vinković vd., 2017). ZnO nanopartiküllerinin, hücre zarına bağlanarak patojenin protein sentezini durdurduğu ve hücre zarını destabilize ettiği gözlemlenmiştir. Bu etkiler, özellikle fungal patojenler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir; örneğin *Fusarium* türleri, ZnO

nanopartiküllerinin uygulandığı alanlarda büyüme ve üreme kapasitesini kaybetmektedir (Pandey vd., 2018).

Nanopartiküller ayrıca, patojenlerin çoğalma ve bulaşma kapasitesini sınırlayan genetik ve biyokimyasal mekanizmalar üzerinde de etki gösterir. Örneğin, bakır oksit (CuO) nanopartiküller, patojenlerin DNA replikasyonunu inhibe etmekte, bu da patojenin üreme yeteneğini sınırlamaktadır (Ghosh vd., 2010). Bu özellik, CuO nanopartiküllerinin biyokimyasal süreçlere müdahale etme yeteneğini göstererek patojenlerin bitki dokularında yayılmasını önlemekte önemli bir rol oynar (Rai vd., 2010). Buna ek olarak, demir oksit ($Fe_3O_4$) nanopartikülleri gibi diğer metal oksit NP'lerin de, özellikle kök bölgesinde toprak patojenlerine karşı koruma sağladığı, bitki büyümesini teşvik ettiği ve bitkilerin savunma yanıtlarını artırdığı gözlemlenmiştir (Singh vd., 2021).

Nanopartiküllerin sahip olduğu antimikrobiyal özellikler, bitki hastalıklarının yönetiminde yeni stratejiler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Nanosensörlerle entegre kullanımı, bitki patojenlerinin erken teşhisine ve hızlı müdahaleye imkan tanıyarak hastalık yayılımını kontrol altında tutmaya katkı sağlamaktadır (Bhattacharyya vd., 2016). Dolayısıyla, nanopartiküller, tarım sektöründe çevre dostu ve sürdürülebilir bir hastalık yönetim stratejisi sunmakta, geleneksel kimyasallara duyulan ihtiyacı azaltarak bitki sağlığı için alternatif çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

### 4.3.Nanopartiküllerin bitki patojenleri üzerindeki baskılayıcı etkileri

Nanopartiküller (NP'ler), bitki patojenleri üzerinde baskılayıcı ve öldürücü etkiler gösteren yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Nanopartiküllerin biyolojik etkinlikleri, büyük yüzey alanları ve reaktif özellikleri nedeniyle bitki hastalıklarının önlenmesinde kimyasal pestisitlere göre daha hedefe yönelik ve çevre dostu bir alternatif sunar. Metal ve metal oksit nanopartikülleri, özellikle antibakteriyel, antifungal ve antiviral özellikleri ile bilinir. Bu nanopartiküller patojenlerin hücre zarına bağlanarak, hücresel geçirgenliği bozmakta, hücresel metabolizmayı engellemekte ve reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini artırarak patojenleri öldürmektedir (Kumar vd., 2021).

Özellikle gümüş (Ag) nanopartiküller, bitki patojenlerine karşı etkili bir savunma mekanizması sunmaktadır. Gümüş iyonları, patojen hücre zarındaki sülfidril grupları ile bağlanarak hücre zarının yapısını bozar ve zar geçirgenliğini artırarak hücre içi enzimlerin aktivitesini engeller (Siddiquee vd., 2014). Bu etki, bakteriyel patojenlerde, viral ve fungal organizmalarda da gözlemlenmiş olup, AgNP'lerin çok çeşitli bitki patojenleri üzerinde etkinliğini artırmaktadır. Diğer metal oksit NP'ler arasında çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit ($TiO_2$) nanopartikülleri de bitki patojenlerine karşı güçlü koruyucu etkiler sunmaktadır. ZnO nanopartikülleri, patojen hücre zarında protein sentezini inhibe ederek hücresel aktiviteleri durdurmakta ve bu sayede patojenin yayılmasını engellemektedir (Elmer & White, 2018). Ayrıca, $TiO_2$ nanopartikülleri ışığa maruz kaldığında reaktif oksijen türleri üretir ve bu türler patojenlerin hücre duvarlarına doğrudan zarar vererek öldürücü etki göstermektedir (Mahmoodzadeh vd., 2013).

Nanopartiküllerin patojenler üzerindeki baskılayıcı etkileri sadece hücresel yapılarla sınırlı kalmayıp, biyokimyasal ve genetik seviyelerde de kendini göstermektedir. Çeşitli metal oksit NP'leri, bitkilerin bağışıklık yanıtlarını tetikleyerek, patojenlere karşı savunma mekanizmalarını harekete geçirebilir. Örneğin, nanopartiküller bitkilerde fenilalanin amonyak liyaz ve peroksidaz gibi enzimlerin üretimini teşvik ederek, patojenlerin hücre duvarını hedef almasını zorlaştırır (Servin vd., 2015). Bu enzimler, bitkilerde patojen saldırısına yanıt olarak savunma amaçlı biyokimyasal değişiklikler yaratırmakta ve patojenlerin bitkiye girişini zorlaştırarak yayılmasını önlemektedir.

Ayrıca, nanopartiküllerin, hedef patojenlere özgü olarak seçici etki gösterebilme özelliği tarımsal uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar. ZnO ve $TiO_2$ nanopartikülleri gibi metal oksit nanopartikülleri, düşük dozlarda kullanıldığında bile yüksek antimikrobiyal etki göstererek patojenlerin yayılmasını engellemektedir (Pandey vd., 2018). Örneğin, çinko oksit nanopartiküllerinin foliar uygulamalarında, bu nanopartiküllerin patojen hücre zarına yapışarak hücre yapısını bozduğu ve patojenin metabolizmasını engellediği gözlemlenmiştir (Kumar vd., 2021). Çinko ve titanyum dioksit nanopartikülleri ayrıca oksidatif strese neden olan serbest radikallerin üretimini teşvik etmekte, bu durum ise patojenlerin hayatta kalma oranını azaltmaktadır (Vinković vd., 2017).

Bunun yanında, nanopartiküllerin patojen hücre zarını hedef alarak hücre içi organelleri ve DNA'yı bozma özellikleri, bitki patojenlerinin biyolojik süreçlerini etkisiz hale getirir. Örneğin, gümüş nanopartiküller hücre zarına nüfuz ederek DNA

replikasyonunu ve protein sentezini inhibe eder, bu durum ise patojenin üreme ve yayılma kapasitesini önemli ölçüde azaltır (Siddiquee vd., 2014). Bitki hastalıklarının kontrolünde biyosensör olarak da işlev görebilen NP'ler, patojenlerin varlığını erken teşhis etme ve hızlı bir şekilde müdahale etme fırsatı sunar (Bhattacharyya vd., 2016). Bu özellikler, nanoteknolojinin bitki patolojisi alanında çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler sunarak tarımsal sürdürülebilirliği desteklediğini göstermektedir.

Özetle, nanopartiküller bitki patojenlerine karşı güçlü bir antimikrobiyal etki göstererek kimyasal pestisitlerin yerini alabilecek potansiyele sahiptir. Bu üstün özellikleri, nanopartiküllerin tarımsal hastalık yönetiminde etkili bir araç olarak kullanımını teşvik etmekte ve gelecekte bitki patojenlerine karşı daha sürdürülebilir bir koruma sağlama ihtimalini artırmaktadır.

### 4.4.Patojenlere karşı nanopartiküller kullanımı

Nanopartiküller (NP'ler), bitkilerde bağışıklık yanıtlarını tetikleyerek bitkilerin patojenlere karşı daha dirençli hale gelmesini sağlama potansiyeline sahiptir. Geleneksel pestisitlerin aksine, nanopartiküller bitkilerin doğal savunma mekanizmalarını harekete geçirerek patojenlere karşı dirençlerini artırır ve bu sayede kimyasal müdahalelere olan bağımlılığı azaltır (Servin vd., 2015). Bitkilerin doğal bağışıklık sistemini aktive eden bu strateji, sürdürülebilir ve çevre dostu bir bitki koruma yöntemi sunmaktadır.

Nanopartiküllerin bağışıklık güçlendirme sürecindeki en önemli mekanizmalardan biri, bitkilerde savunma bileşenlerinin üretimini teşvik etmeleridir. Örneğin, çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit ($TiO_2$) nanopartikülleri, fenolik bileşikler, flavonoidler ve

lignin gibi savunma moleküllerinin sentezini artırarak bitkilerin patojenlere karşı direnç geliştirmesine katkıda bulunur (Elmer & White, 2018). Fenolik bileşikler ve flavonoidler, patojenlerin bitki dokularına nüfuz etmesini engelleyen yapısal bariyerler oluştururken, lignin bitki hücre duvarını güçlendirerek patojenlerin hücre içine girişini zorlaştırır (Mahmoodzadeh vd., 2013). Bu özellikler, nanopartiküllerin düşük dozlarda bile bitkilerde geniş çaplı bir bağışıklık yanıtı oluşturabilmesini sağlar.

Nanopartiküller aynı zamanda bitkilerde reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini de teşvik eder. ROS, bitki hücrelerinde doğal bir bağışıklık yanıtı olarak üretilen moleküllerdir ve patojenlere karşı güçlü bir oksidatif stres ortamı oluşturarak patojen hücrelerinde yapısal bozulmalara yol açar (Kumar vd., 2021). Örneğin, gümüş nanopartiküller (AgNP'ler), ROS üretimini teşvik ederek bitki dokularında oksidatif stres yaratır ve bu da patojenlerin hücre duvarlarını zayıflatarak etkisiz hale getirir (Siddiquee vd., 2014). ROS üretimini artırma yetenekleri nedeniyle, AgNP'ler gibi nanopartiküller yalnızca patojenleri yok etmekle kalmaz, aynı zamanda bitkinin doğal bağışıklık yanıtını da destekleyerek uzun vadeli bir koruma sağlar.

Bir diğer strateji ise nanopartiküllerin bitki hücrelerinde savunma enzimlerinin üretimini artırmasıdır. Özellikle ZnO nanopartikülleri, bitkilerde peroksidaz, polifenol oksidaz ve süperoksit dismutaz gibi enzimlerin üretimini artırarak, patojenlere karşı etkili bir biyokimyasal savunma mekanizması sağlar (Vinković vd., 2017). Bu enzimler, patojen hücre zarlarını hedef alarak hücredeki biyolojik süreçleri bozmakta ve patojenin bitki dokularında yayılmasını zorlaştırmaktadır. Polifenol oksidaz ve

peroksidaz enzimleri, fenolik bileşiklerin oksidasyonunu sağlayarak patojenlere karşı kimyasal bir bariyer oluşturmaktadır (Servin vd., 2015). Böylece, nanopartiküllerin bitkilerdeki bağışıklık sistemini destekleyici etkisi, yalnızca hastalıkların önlenmesi değil, aynı zamanda patojenlerin uzun vadede etkinliğinin azaltılması açısından da önem taşır.

Nanopartiküllerin bağışıklık güçlendirme stratejileri, bitki kökleri ve yaprakları aracılığıyla sistemik bir savunma sağlamasına olanak tanır. Bu da bitki savunma mekanizmalarının lokalize olmaktan çıkıp, tüm bitkiyi kapsayan bir bağışıklık yanıtına dönüşmesine katkıda bulunur (Martinelli vd., 2015). Örneğin, $SiO_2$ ve ZnO nanopartikülleri kökler tarafından emildiğinde, bitki bünyesinde taşınarak farklı dokulara yayılır ve böylece bitkinin tüm bölgelerinde patojenlere karşı savunma sağlar (Rezaei Savadkouhi vd., 2020). Bu özellik, nanopartiküllerin özellikle kök kaynaklı toprak patojenlerine karşı güçlü bir savunma aracı olarak kullanımını destekler. Bitkilerin tüm bölgelerinde etkili bir bağışıklık tepkisi oluşturulması, tarımsal üretimde kayıpları azaltırken kimyasal ilaç kullanımını da minimuma indirebilir.

Son olarak, nanopartiküllerin hedefe yönelik bağışıklık güçlendirme potansiyeli, tarım alanında gelecekteki hastalık yönetimi stratejilerine yeni bir boyut kazandırmaktadır. Nanopartiküllerin düşük dozlarda kullanılarak bitkilerin bağışıklık tepkilerinin artırılması, çevresel açıdan güvenli ve sürdürülebilir bir hastalık yönetimi stratejisi sunar. Nanopartiküllerin yapısal ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesiyle, bitki bağışıklığını artıran formülasyonlar gelecekte daha yaygın bir şekilde kullanılabilir. Bu stratejiler, bitkilerin doğal savunma mekanizmalarını destekleyerek

uzun vadede tarımsal verimliliği artıracak ve gıda güvenliğine katkı sağlayacaktır.

## 5.Tarımsal Verimliliğin Korunmasında Nanopartiküllerin Rolü

### 5.1.Nanopartiküllerle bitki sağlığını izleme ve teşhis

Bitki hastalıklarının erken teşhisi, hastalıkların yayılmasını önlemek ve ürün kayıplarını en aza indirmek için oldukça önemlidir. Nanoteknoloji, bitki patojenlerinin tespitini hızlandırmak ve hassasiyeti artırmak için nanosensörlerin geliştirilmesi ile bu sürece yeni bir boyut kazandırmıştır. Nanopartiküllerin (NP'ler) biyosensörlerde kullanılması, patojenlerin neden olduğu biyokimyasal değişiklikleri hızlı ve doğru bir şekilde tespit ederek, tarım alanlarında erken uyarı sistemleri oluşturmaktadır (Shen vd., 2020). Özellikle altın (Au) ve gümüş (Ag) nanopartiküller, yüksek reaktivite ve iletkenlik özellikleri sayesinde biyosensörlerde sıklıkla kullanılmakta ve hastalık belirtilerini ilk aşamalarda tespit edebilme kabiliyeti sunmaktadır. Nanosensörler, patojenlerin neden olduğu belirli biyomolekülleri veya metabolitleri algılayarak hızlı teşhise olanak tanır. Örneğin, patojenlerin DNA, RNA veya protein yapıları ile etkileşime girebilen nanopartiküller, biyomolekül varlığına göre renk, elektriksel iletkenlik veya optik sinyal değişiklikleri yaratır (Bhattacharyya vd., 2016). Bu tür optik nanosensörler, çok düşük konsantrasyonlarda bile patojenleri algılayabilir ve hastalığın yayılmasını önlemek için erken müdahaleye olanak tanır. Özellikle altın nanopartiküllerin, yüzey plazmon rezonansı (SPR) gibi optik teknikler aracılığıyla belirli patojenlerle hızlı bir şekilde bağlanması, patojenlerin tespitini daha güvenilir hale getirmektedir (Vargas-Hernandez vd., 2020).

Elektrokimyasal nanosensörler de, bitki patojenlerini hızlı bir şekilde tespit edebilme açısından önemlidir. Bu tür nanosensörler, bitki patojenlerine özgü antikor veya DNA probu ile işlevselleştirilmiş nanopartiküller kullanarak, patojenin biyomoleküler yapısındaki değişiklikleri elektrik sinyallerine dönüştürür. Örneğin, çinko oksit (ZnO) ve bakır oksit (CuO) nanopartiküller, elektrokimyasal iletkenlik özellikleri sayesinde patojenlerin varlığını hızlı bir şekilde tespit edebilmekte ve laboratuvar analizine ihtiyaç duymadan sahada teşhis yapılmasına olanak tanımaktadır (Singh vd., 2021). Elektrokimyasal nanosensörlerin taşınabilirliği ve düşük maliyeti, tarlada gerçek zamanlı hastalık teşhisi için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Nanosensörlerin bir diğer önemli özelliği ise, çoklu patojenleri aynı anda tespit edebilme kapasitesidir. Bu özellik, birden fazla hastalığa neden olan patojenleri tarlada veya depolama sırasında hızlıca tanımlamayı mümkün kılmakta ve ürün kaybını önlemek için etkili müdahaleyi sağlamaktadır. Çok hedefli tespit özelliği sunan nanosensörler, çiftçilere hasattan önce bitki sağlığı hakkında geniş bilgi sunmakta ve böylece hastalık yönetiminde proaktif bir yaklaşımı teşvik etmektedir (Ghosh vd., 2010). Altın ve gümüş nanopartiküllerle yapılan çalışmalarda, bu nanopartiküllerin çok sayıda patojene karşı duyarlı olduğu ve bu nedenle özellikle büyük ölçekli tarımsal uygulamalar için kullanıma uygun olduğu gösterilmiştir.

Optik tabanlı nanosensörler de, patojenlerin algılanmasında yüksek hassasiyet sunmaktadır. Bu sensörler, nanopartiküllerin ışık emme veya yayma özelliklerinden yararlanarak bitkideki patojenlerin varlığını tespit eder. Özellikle titanyum dioksit ($TiO_2$)

ve gümüş nanopartiküller, UV ışığı altında belirgin optik değişiklikler yaratarak patojen varlığını hızlı bir şekilde belirleme kabiliyetine sahiptir (Siddiquee vd., 2014). Böylece nanosensörler, patojen teşhisinde sadece doğruluk ve hız sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tarımsal üretimde yüksek maliyetleri düşürür ve hastalık yönetiminde çevre dostu çözümler sunar.

Nanopartikül temelli nanosensörler, bitki sağlığı izleme ve hastalık yönetimi süreçlerini geliştirerek tarımsal sürdürülebilirliği desteklemekte ve kimyasal pestisitlerin gereksiz kullanımını azaltmaktadır. Nanosensörlerin yaygınlaşmasıyla, bitki hastalıklarının erken teşhisi ve yönetimi, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahip olduğu öngörülmektedir.

## 5.2.Bitki patojenlerinin erken teşhisinde nanopartiküllerin rolü

Nanopartiküller (NP'ler), bitki patojenlerinin erken teşhisi ve bitki bağışıklığının güçlendirilmesi gibi alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle mühendislik ürünü nanosensörler, hastalıkların tarlada erken aşamalarda tespit edilmesi ve hızlı müdahale sağlanması için büyük bir potansiyele sahiptir. Nanosensörler, patojenlerin neden olduğu moleküler ve biyokimyasal değişiklikleri yüksek hassasiyetle algılayarak, bitki sağlığı izlemede etkili bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır (Servin vd., 2015). Ayrıca, nanopartiküller aracılığıyla bitkilerin bağışıklık sistemlerinin güçlendirilmesi, patojen saldırılarına karşı daha dirençli bitkilerin geliştirilmesini sağlayabilir.

Bitki hastalıklarının erken teşhisi, tarımsal sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından kritik öneme sahiptir. Bitki patojenlerinin

tarlada hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, hastalıkların yayılmasını önlemek ve kimyasal müdahale ihtiyacını azaltmak için gereklidir. Bu noktada nanosensörler, patojenlerin hızlı, spesifik ve hassas bir şekilde algılanmasını sağlayarak geleneksel teşhis yöntemlerine göre önemli avantajlar sunmaktadır (Kumar vd., 2021). Geleneksel yöntemler genellikle laboratuvar ortamında yapılan DNA analizlerine ve antikor bazlı testlere dayanmaktadır; bu da pahalı, zaman alıcı ve yerinde teşhis açısından sınırlı bir seçenek sunmaktadır (Pandey vd., 2018). Nanosensörler ise, düşük maliyetli ve taşınabilir yapılarıyla tarlada hızlı teşhis için uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Nanosensörlerin temel avantajı, bitki patojenlerinin neden olduğu biyokimyasal değişiklikleri algılayabilmeleridir. Bitkiler, patojen enfeksiyonuna yanıt olarak benzersiz biyomoleküller, uçucu organik bileşikler ve metabolitler üretmektedir (Bhattacharyya vd., 2016). Nanosensörler, bu biyomolekülleri hızlı ve hassas bir şekilde algılayarak erken teşhisi mümkün kılar. Özellikle altın (Au) ve gümüş (Ag) nanopartikülleri, biyosensörlerde kullanılan en yaygın malzemelerdendir. Altın nanopartiküller, patojenlere spesifik DNA veya proteinlere bağlanarak yüzey plazmon rezonans (SPR) gibi optik özelliklerle patojen varlığını tespit edebilir (Vargas-Hernandez vd., 2020). Bu tür optik nanosensörler, patojenlerin düşük konsantrasyonlarda bile algılanmasını sağlayarak hastalıkların yayılmasını önlemek amacıyla erken müdahaleye olanak tanır.

Nanosensörlerin bir diğer önemli avantajı ise çoklu hedef tespit edebilme yetenekleridir. Çeşitli patojenleri aynı anda tespit edebilme kapasitesi, tarım alanında etkili bir şekilde hastalık yönetimine olanak tanır. Örneğin, aynı anda birçok patojeni

algılayabilen bir nanosensör, tarım alanında hastalıkların doğru bir şekilde sınıflandırılmasına yardımcı olabilir (Martinelli vd., 2015). Böylece, patojenlerin neden olduğu biyokimyasal değişiklikler hızlı bir şekilde analiz edilerek doğru teşhis yapılabilir. Bu yaklaşım, yalnızca patojen tespitinde değil, aynı zamanda bitkilerin fizyolojik durumunun genel izlenmesinde de kullanışlıdır ve çiftçilerin hasattan önce hastalıklara karşı proaktif önlemler almalarını sağlar.

Elektrokimyasal nanosensörler de bitki patojenlerinin tespiti için umut vaat eden bir diğer teknolojidir. Bu tür nanosensörler, bitki patojenlerine spesifik antikor veya DNA probu ile işlevselleştirilmiş nanopartiküller kullanarak, hedef patojenin elektriksel özelliklerindeki değişiklikleri algılar. Örneğin, Ag nanopartikülleri, DNA hibridizasyonu veya antijen-antikor etkileşimleri gibi biyokimyasal olayları elektrik sinyallerine dönüştürerek patojenin varlığını belirler (Siddiquee vd., 2014). Bu tür elektrokimyasal nanosensörler, özellikle tarlada gerçek zamanlı ve hızlı teşhis için uygun olup, geleneksel laboratuvar tekniklerine kıyasla çok daha hızlı sonuç vermektedir.

Nanosensörlerin patojen teşhisindeki başarısı, bu teknolojinin çevre dostu bir yaklaşımla bitki sağlığını izlemeye olanak tanımasında yatmaktadır. Kimyasal analizler veya pestisitlerin yoğun kullanımı yerine, nanosensörler sayesinde bitkilerde erken aşamalarda tespit edilen enfeksiyonlar sayesinde zamanında ve düşük müdahale gerektiren çözümler uygulanabilir. Nanosensörlerin bitki sağlığı izleme ve teşhis süreçlerine entegre edilmesi, tarım sektöründe yeni bir dönemin habercisi olarak değerlendirilmektedir.

## 5.3.Nanopartiküller ile bitkilerde bağışıklık güçlendirme stratejileri

Nanopartiküller (NP'ler), bitkilerin bağışıklık sistemini güçlendirmede etkili bir araç olarak dikkat çekmektedir. Geleneksel hastalık yönetim yöntemlerinin aksine, nanopartiküller bitkilerin doğal savunma mekanizmalarını tetikleyerek patojenlere karşı direnç oluşturmalarını sağlar. Bu tür bağışıklık güçlendirme stratejileri, pestisit kullanımını azaltırken çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirir. Metal ve metal oksit nanopartiküller, fenolik bileşikler, lignin ve flavonoidler gibi savunma bileşenlerinin üretimini teşvik ederek, bitki dokularında yapısal ve kimyasal bariyerler oluşturmaktadır (Giannousi vd., 2013).

Örneğin, çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit ($TiO_2$) nanopartiküllerinin bitkilerde fenolik bileşikler ve flavonoidlerin sentezini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bileşikler, patojenlerin bitki hücrelerine nüfuz etmesini engelleyerek bitkinin savunma kapasitesini güçlendirmektedir (Vinković vd., 2017). Ayrıca lignin, hücre duvarını güçlendirerek patojenlerin girişini zorlaştıran yapısal bir bariyer oluşturur ve bitkilerin enfeksiyon riskini azaltmaktadır (Elmer & White, 2018). Bu tür yapısal değişiklikler, nanopartiküllerin bitkilerde uzun süreli bağışıklık yanıtlarını destekleme potansiyeline işaret etmektedir.

Nanopartiküller ayrıca, bitkilerde reaktif oksijen türleri (ROS) üretimini teşvik ederek, patojenlere karşı güçlü bir oksidatif savunma mekanizması sağlamaktadır. ROS, patojenlerin hücre zarlarına zarar vererek ve protein fonksiyonlarını bozar ve böylece patojenin çoğalmasını engellemektedir. Gümüş nanopartiküller (AgNP'ler), ROS üretimini artırarak bitki dokularında patojenlerin

hayatta kalmasını zorlaştırmaktadır (Shen vd., 2020). Gümüş iyonlarının bu etkisi, özellikle bakteriyel patojenlere karşı etkinlik gösterirken, ROS oluşumunun kontrolü bitkilerin kendi hücrelerinde de hasara yol açmadan bağışıklığı desteklemektedir.

Bağışıklık güçlendirme sürecinde nanopartiküllerin bir diğer önemli etkisi, bitkilerde savunma enzimlerinin üretimini artırmasıdır. Polifenol oksidaz, peroksidaz ve süperoksit dismutaz gibi enzimlerin aktivasyonu, bitki hücrelerinde zararlı patojenlerin biyokimyasal süreçlerini bozar (Servin vd., 2015). Örneğin, ZnO nanopartikülleri, bu enzimlerin üretimini teşvik ederek patojenlere karşı etkili bir biyokimyasal savunma oluşturmaktadır (Dimkpa vd., 2013). Bu enzimlerin aktivitesi, patojenin hücre yapısını bozarak bitki dokularında yayılmasını sınırlandırır ve böylece daha güçlü bir bağışıklık sistemi yaratmaktadır.

Nanopartiküllerin sistemik bağışıklık sağlama yetenekleri de dikkat çekicidir. Özellikle silika ($SiO_2$) ve ZnO nanopartikülleri, bitki kökleri veya yapraklarından alındığında, bitki dokuları boyunca taşınarak sistemik bir bağışıklık tepkisi oluşturur. Bu sistemik etki, bitkinin tüm organlarında bağışıklık güçlenmesini sağlar ve lokalize enfeksiyonların kontrol altına alınmasını kolaylaştırır (Martinelli vd., 2015). ZnO nanopartikülleri kökler aracılığıyla alındığında, tüm bitki boyunca taşınarak yaprak ve saplarda da patojenlere karşı etkili bir koruma sağlamaktadır (Singh vd., 2021). Böylece, sistemik bağışıklık tepkisinin artırılması, bitkinin tamamında geniş bir koruma sağlamaktadır.

Son olarak, nanopartiküllerin düşük dozlarda etkili olması, tarımda sürdürülebilirlik açısından da büyük avantajlar sunmaktadır.

Bitki bağışıklığını güçlendirme sürecinde kullanılan nanopartiküllerin düşük miktarlarla dahi yüksek etki göstermesi, tarımsal alanlarda çevresel kirliliği azaltır ve ekonomik verimliliği artırmaktadır. Bu özellik, nanopartiküllerin pestisit alternatifleri olarak kullanımını desteklemekte ve hastalık yönetiminde ekolojik dengeyi koruyan yöntemlerin geliştirilmesini teşvik etmektedir.

**Sonuç ve Öneriler**

Mühendislik ürünü nanopartiküller, bitki hastalıklarının yönetimi için etkili bir çözüm olarak öne çıkmakta, tarımsal verimliliği artırmak ve sürdürülebilir gıda güvenliğine katkı sağlamak için büyük bir potansiyele sahip bulunmaktadır. Titanyum dioksit, çinko oksit ve gümüş gibi metal ve metal oksit nanopartiküller, geniş yüzey alanları ve yüksek reaktiviteleri sayesinde, bitki patojenleri üzerinde doğrudan öldürücü etkiler gösterir ve bu özellikleri ile geleneksel pestisitlerin çevresel zararlarını azaltan çevre dostu bir alternatif sunar. Ayrıca, nanosensörlerin bitki patojenlerinin erken teşhisinde ve hızlı müdahale sağlanmasında kullanılabilmesi, tarlada gerçek zamanlı izleme yapılmasını mümkün kılmakta ve bitki sağlığı koruma süreçlerini güçlendirmektedir.

Nanopartiküllerin bitki bağışıklığını artırıcı özellikleri de tarımsal hastalık yönetiminde umut verici bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bağışıklık güçlendirme sürecinde nanopartiküllerin bitki hücre zarlarına bağlanarak savunma enzimlerini tetiklemesi, reaktif oksijen türlerinin üretimini destekleyerek patojenlerin yapısal ve biyokimyasal süreçlerini bozmasını sağlamaktadır. Bu yöntemler sayesinde, daha düşük

dozlarda kimyasal kullanımı ile yüksek etkililik sağlanmakta ve çevresel etkiler minimize edilmektedir.

Sonuç olarak, mühendislik nanopartiküllerinin çevre dostu sentez yöntemlerinin geliştirilmesi ve güvenli dozlarda uygulanması, sürdürülebilir tarım hedeflerine ulaşmak için kilit bir rol oynamaktadır. Bu teknolojinin güvenli entegrasyonu için yapılan araştırmaların artması ve biyolojik olarak uyumlu nanopartiküllerin geliştirilmesi, tarımsal üretimde nanopartikül kullanımını yaygınlaştıracaktır.

## KAYNAKÇA

Ahmed, S., Annu, Chaudhry, S. A., & Ikram, S. (2017). A review on biogenic synthesis of ZnO nanoparticles using plant extracts and microbes: A prospect towards green chemistry. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *166*, 272-284. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.12.011

Ata, M. S., Yılmaz, E. A., Polatcı, Ş., & Bölükbaşı, E. (2024). An in vitro study: assessment of gene expression changes ınduced by nanoparticles synthesized from *Cladonia subulata* lichen on colon cell lines. *International Journal of Nature and Life Sciences*, *8*(1), 23-35.

Baek, S. H., Roh, J., Park, C. Y., Kim, M. W., Shi, R., Kailasa, S. K., & Park, T. J. (2020). Cu-nanoflower decorated gold nanoparticles-graphene oxide nanofiber as electrochemical biosensor for glucose detection. *Materials Science and Engineering: C*, *107*, 110273.

Bhattacharyya, A., Duraisamy, P., Govindarajan, M., Buhroo, A. A., & Prasad, R. (2016). Nano-Biofungicides: Emerging trend in ınsect pest control. R. Prasad (Ed.), *Advances and Applications Through Fungal Nanobiotechnology* (ss. 307-319). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42990-8_15

Dimkpa, C. O., McLean, J. E., Britt, D. W., & Anderson, A. J. (2013). Antifungal activity of ZnO nanoparticles and their interactive effect with a biocontrol bacterium on growth antagonism of the plant pathogen *Fusarium graminearum*. *Biometals*, *26*, 913-924.

Elmer, W., & White, J. C. (2018). The future of nanotechnology in plant pathology. İçinde *Annual Review of Phytopathology* (C. 56, Sayı Volume 56, 2018, ss. 111-133). Annual Reviews. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050108

Ghosh, M., Bandyopadhyay, M., & Mukherjee, A. (2010). Genotoxicity of titanium dioxide ($TiO_2$) nanoparticles at two trophic levels: Plant and human lymphocytes. *Chemosphere*, *81*(10), 1253-1262.

Giannousi, K., Avramidis, I., & Dendrinou-Samara, C. (2013). Synthesis, characterization and evaluation of copper based nanoparticles as agrochemicals against *Phytophthora infestans*. *RSC advances*, *3*(44), 21743-21752.

Gogos, A., Knauer, K., & Bucheli, T. D. (2012). Nanomaterials in plant protection and fertilization: Current state, foreseen applications, and research priorities. *Journal of agricultural and food chemistry*, *60*(39), 9781-9792.

Hassan, S. E.-D., Salem, S. S., Fouda, A., Awad, M. A., El-Gamal, M. S., & Abdo, A. M. (2018). New approach for antimicrobial activity and bio-control of various pathogens by biosynthesized copper nanoparticles using endophytic actinomycetes. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *11*(3), 262-270. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.05.003

Kumar, A., Choudhary, A., Kaur, H., Mehta, S., & Husen, A. (2021). Smart nanomaterial and nanocomposite with advanced agrochemical activities. *Nanoscale Research Letters*, *16*(1), 156. https://doi.org/10.1186/s11671-021-03612-0

Li, Y., Mao, Q., Li, X., Yin, J., Wang, Y., Fu, J., & Huang, Y. (2019). High-fidelity and high-efficiency additive manufacturing using tunable pre-curing digital light processing. *Additive Manufacturing*, *30*, 100889.

Mahmoodzadeh, H., Nabavi, M., & Kashefi, H. (2013). Effect of nanoscale titanium dioxide particles on the germination and growth of canola (*Brassica napus*). *Biotechnology advances*, *34*(4), 546-556.

Martinelli, F., Scalenghe, R., Davino, S., Panno, S., Scuderi, G., Ruisi, P., Villa, P., Stroppiana, D., Boschetti, M., Goulart, L. R., Davis, C. E., & Dandekar, A. M. (2015). Advanced methods of plant disease detection. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(1), 1-25. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0246-1

Meena, R.S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., Brtnicky, M., Sharma, M. P., Yadav, G. S., Jhariya, M. K., & Jangir, C. K. (2020). Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land*, *9*(2), 34.

Mittal, A. K., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2013). Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology advances*, *31*(2), 346-356.

Molina, G. A., Esparza, R., López-Miranda, J. L., Hernández-Martínez, A. R., España-Sánchez, B. L., Elizalde-Peña, E. A., & Estevez, M. (2019). Green synthesis of Ag nanoflowers using *Kalanchoe daigremontiana* extract for enhanced photocatalytic and antibacterial activities. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *180*, 141-149.

Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., & Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant science*, *179*(3), 154-163.

Pandey, A. K., Burlakoti, R. R., Kenyon, L., & Nair, R. M. (2018). Perspectives and challenges for sustainable management of fungal diseases of mungbean [*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek var. *radiata*]: A review. *Frontiers in Environmental Science*, *6*, 53.

Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology*, *8*(JUN). Scopus. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014

Priester, J. H., Ge, Y., Mielke, R. E., Horst, A. M., Moritz, S. C., Espinosa, K., Gelb, J., Walker, S. L., Nisbet, R. M., & An, Y.-J. (2012). Soybean susceptibility to manufactured nanomaterials with evidence for food quality and soil fertility interruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(37), E2451-E2456.

Rai, A., Prabhune, A., & Perry, C. C. (2010). Antibiotic mediated synthesis of gold nanoparticles with potent antimicrobial activity and their application in antimicrobial coatings. *Journal of Materials Chemistry*, *20*(32), 6789-6798. https://doi.org/10.1039/C0JM00817F

Rana, K., Tripathi, R. M., & Pudake, R. N. (2024). Advances in the fabrication of nanosensors for management of abiotic stress in crop plants. *Innovative Methods in Horticultural Crop Improvement: Biosensors and Nanosensors* (ss. 75-97). Springer.

Rezaei Savadkouhi, N., Ariaii, P., & Charmchian Langerodi, M. (2020). The effect of encapsulated plant extract of hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) in biopolymer nanoemulsions of *Lepidium perfoliatum* and *Orchis mascula* on controlling oxidative stability of soybean oil. *Food Science & Nutrition*, *8*(2), 1264-1271.

Rico, C. M., Morales, M. I., Barrios, A. C., McCreary, R., Hong, J., Lee, W.-Y., Nunez, J., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2013). Effect of cerium oxide nanoparticles on the quality of rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(47), 11278-11285. https://doi.org/10.1021/jf404046v

Sang, Y., Cao, X., Dai, G., Wang, L., Peng, Y., & Geng, B. (2020). Facile one-pot synthesis of novel hierarchical $Bi_2O_3/Bi_2S_3$ nanoflower photocatalyst with intrinsic pn junction for efficient photocatalytic removals of RhB and Cr (VI). *Journal of hazardous materials*, *381*, 120942.

Sangeetha, G., Rajeshwari, S., & Venckatesh, R. (2011). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles by aloe barbadensis miller leaf extract: Structure and optical properties. *Materials Research Bulletin*, *46*(12), 2560-2566.

Senapati, S., Syed, A., Moeez, S., Kumar, A., & Ahmad, A. (2012). Intracellular synthesis of gold nanoparticles using alga *Tetraselmis kochinensis*. *Materials Letters*, *79*, 116-118.

Servin, A., Elmer, W., Mukherjee, A., De la Torre-Roche, R., Hamdi, H., White, J. C., Bindraban, P., & Dimkpa, C. (2015). A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant

disease and enhance crop yield. *Journal of Nanoparticle Research*, *17*, 1-21.

Sharma, P., Kumar, N., Chauhan, R., Singh, V., Srivastava, V. C., & Bhatnagar, R. (2020). Growth of hierarchical ZnO nano flower on large functionalized rGO sheet for superior photocatalytic mineralization of antibiotic. *Chemical Engineering Journal*, *392*, 123746.

Shen, Y., Borgatta, J., Ma, C., Elmer, W., Hamers, R. J., & White, J. C. (2020). Copper Nanomaterial morphology and composition control foliar transfer through the cuticle and mediate resistance to root fungal disease in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(41),11327-11338. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04546

Siddiqi, K. S., Husen, A., & Rao, R. A. K. (2018). A review on biosynthesis of silver nanoparticles and their biocidal properties. *Journal of Nanobiotechnology*, *16*(1), 14. https://doi.org/10.1186/s12951-018-0334-5

Siddiquee, S., Rovina, K., Yusof, N. A., Rodrigues, K. F., & Suryani, S. (2014). Nanoparticle-enhanced electrochemical biosensor with DNA immobilization and hybridization of *Trichoderma harzianum* gene. *Sensing and Bio-Sensing Research*, *2*, 16-22. https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2014.06.002

Singh, R. P., Handa, R., & Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, *329*, 1234-1248. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051

Subramanian, K. S., & Rajkishore, S. (2018). Regulatory framework for nanomaterials in agri-food systems. *Nanomaterials: ecotoxicity, safety, and public perception*, 319-342.

Vargas-Hernandez, M., Macias-Bobadilla, I., Guevara-Gonzalez, R. G., Rico-Garcia, E., Ocampo-Velazquez, R. V., Avila-Juarez, L., & Torres-Pacheco, I. (2020). nanoparticles as potential antivirals in agriculture. *Agriculture*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/agriculture10100444

Vinković, T., Novák, O., Strnad, M., Goessler, W., Jurašin, D. D., Parađiković, N., & Vrček, I. V. (2017). Cytokinin response in pepper plants (*Capsicum annuum* L.) exposed to silver nanoparticles. *Environmental Research*, *156*, 10-18. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.015

# BÖLÜM IV

# Investigating Ti(1-x) Al(x) Alloys: The Role of Composition in Structural, Mechanical, And Thermodynamic Properties

**Gülcan AYDIN[1]**

## 1.Introduction

Metallic alloys are essential in engineering and technology due to their strength, low density, heat resistance, and corrosion resistance. Titanium-aluminium (Ti-Al) alloys are particularly valued for their high-temperature resistance, light weight, and durability, making them ideal for aerospace and automotive uses (Peters et al., 2003; Wu, 2006; Appel et al., 2011). Notably, γ-TiAl-based alloys have high specific strength and creep resistance, which suit them well for high-temperature applications like gas turbines.

[1] Kocaeli Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Kocaeli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-4627-961X gulcan.aydin@kocaeli.edu.tr

The Ti-Al alloy system includes phases such as α2-$Ti_3Al$, γ-TiAl, and $TiAl_3$, each with distinct microstructures that depend on composition and heat treatment (Clemens, & Mayer, 2013). Adding more aluminium typically lowers the alloy's density and increases its oxidation resistance, though it may reduce ductility (Kim, & Kim, 2018). These alloys are about 50% lighter than traditional nickel-based superalloys, enabling significant weight savings (Bewlay et al., 2016) This balance of density, resistance, and flexibility depends on precise alloy composition, making it essential to tailor these properties for specific uses (Lapin, 2009).

Recently, theoretical calculations and modelling have gained importance in predicting Ti-Al alloy properties (Ramanujan, 2000; Wang et al., 2004). These approaches complement experimental studies and speed up material design. Techniques like density functional theory (DFT) calculations, ab initio molecular dynamics simulations, and thermodynamic modelling provide insights into the alloy at the atomic level (Hao et al., 2002; Ghosh, & Olson, 2007).

This study investigates the structural, mechanical, and thermodynamic properties of Ti(1-x)Al(x) alloys over a range of compositions ($0 \leq x \leq 1$). Using theoretical models, we explore how composition affects lattice parameters, density, elastic properties, and thermodynamic functions. Our model predicts Ti-Al alloy properties across a broad spectrum, offering a valuable tool for material design. By clarifying the complex links between alloy composition and material properties, we aim to support future applications of Ti-Al alloys.

This research establishes a foundation for optimizing Ti-Al alloys and offers a method to analyze similar binary systems. Thus, it contributes to advanced materials design and engineering.

## 2.Theoretical Methods

In this section, the theoretical approaches and computational methods used to examine the structural, mechanical, and thermodynamic properties of the $Ti_{(1-x)}Al_x$ alloy system are presented in detail.

### 2.1.Crystal Structure and Lattice Parameter Calculations

In the $Ti_{(1-x)}Al_x$ alloy system, titanium (Ti) exhibits a hexagonal close-packed (HCP) structure at room temperature, while aluminum (Al) has a face-centered cubic (FCC) structure. The lattice parameter was calculated using Vegard's law (Jacob et al., 2007).

$$\mathrm{a}\left(Ti_{(1-x)}Al_x\right) = (1-\mathrm{x}) * \mathrm{a(Ti)} + \mathrm{x} * \mathrm{a(Al)} \tag{1}$$

Here, a(Ti) and a(Al) are the lattice parameters of pure Ti and Al, respectively. For Ti, the lattice constants of the HCP structure are a(Ti) = 2,951 Å and c(Ti)= 4.683 Å, while for Al, a(Al) = 4.045 Å (Straumanis, &Woodward, 1971).

### 2.2.Theoretical Density Calculation

Theoretical density is calculated as the ratio of the unit cell mass to the unit cell volume:

$$\rho\left(Ti_{(1-x)}Al_x\right) = \frac{(A_{alloy} * Z)}{N_A * V_{alloy}} \tag{2}$$

$$M_{alloy} = \left((1-x) * A_{Ti} + x * A_{Al}\right) \tag{3}$$

Here, $A_{Ti}$ and $A_{Al}$ are the atomic masses of Ti ($A_{Ti}$=47.867 g/mol) and Al ($A_{Al} = 26.982\,\mathrm{g/mol}$), respectively. Z is the number of atoms in the unit cell, $N_A$ ($6.022\times10^{23}$ atoms/mol) is Avogadro's number, and $V_{alloy}$ is the volume of the alloy. To calculate the density of the alloy, the average of Z values of 6 for HCP and 4 for FCC can be used, resulting in Z=5.

Unit cell volume in HCP structure ($V_{HCP}$):

$$V_{HCP} = \frac{\sqrt{3}}{2} a_{Ti}^2 c_{Ti} \tag{4}$$

Unit cell volume in FCC structure ($V_{FCC}$):

$$V_{FCC} = a_{Al}^3 \tag{5}$$

According to Vegard's Law, the volume of an alloy can be determined as the weighted average of the volumes of its components:

$$V_{alloy} = (1 - x) * V_{HCP} + x * V_{FCC} \tag{6}$$

## 2.3.Estimation of Elastic Properties

To predict the elastic properties, we use a semi-empirical approach supported by first-principles calculations and experimental data. The Voigt-Reuss-Hill (VRH) averaging method has been applied for the Young's modulus (E), bulk modulus (K), and shear modulus (G).

**Young Modulus (E):**

The Young modulus of Titanium ($E_{Ti}$) was taken as 107 GPa, and that of Aluminum ($E_{Al}$) as 69 GPa.

Voigt Upper Limit:

$$E_V = (1 - x) * E_{Ti} + x * E_{Al} \tag{7}$$

Reuss Lower Limit:

$$\frac{1}{E_R} = \frac{(1 - x)}{E_{Ti}} + \frac{x}{E_{Al}} \tag{8}$$

VRH Average:

$$E_{VRH} = \frac{E_V + E_R}{2} \tag{9}$$

**Bulk Modulus (K):**

The Bulk modulus of Titanium ($K_{Ti}$) was taken as 110 GPa (Srivastav, 2011), and that of Aluminum ($K_{Al}$) as 76 GPa.

Voigt Upper Limit:

$$K_V = (1 - x) * K_{Ti} + x * K_{Al} \tag{10}$$

Reuss Lower Limit:

$$\frac{1}{K_R} = \frac{(1 - x)}{K_{Ti}} + \frac{x}{K_{Al}} \tag{11}$$

VRH Average:

$$K_{VRH} = \frac{K_V + K_R}{2} \tag{12}$$

**Shear Modulus (G):**

The shear modulus of titanium ($G_{Ti}$) was taken as 45 GPa and that the shear modulus of aluminum ($G_{Al}$) as 25 GPa.

Voigt Upper Limit:

$$G_V = (1 - x) * G_{Ti} + x * G_{Al} \tag{13}$$

Reuss Lower Limit:

$$\frac{1}{G_R} = \frac{(1 - x)}{G_{Ti}} + \frac{x}{G_{Al}} \tag{14}$$

***VRH Average:***

$$G_{VRH} = \frac{G_V + G_R}{2} \tag{15}$$

**Calculation of Poisson Ratio (ν):**

The Poisson ratio is calculated using modules:

$$\nu = \frac{3K_{VRH} - 2G_{VRH}}{6K_{VRH} + 2G_{VRH}} \tag{16}$$

**2.4.Calculation of Thermodynamic Properties**

To calculate the thermodynamic properties of the alloy system, the regular solution model has been used. This model allows us to predict the alloy's mixing enthalpy ($\Delta H_{mix}$), configurational entropy ($\Delta S_{mix}$), and Gibbs free energy (ΔG_mix). The mixing enthalpy represents the energy absorbed or released during the formation of

the alloy. According to the regular solution model, the mixing enthalpy is calculated as follows:

$$\Delta H_{mix} = \Omega * x * (1 - x) \tag{17}$$

Here, Ω is the interaction parameter (J/mol) and x is the mole fraction of Al.

The interaction parameter (Ω) is a crucial factor in determining the thermodynamic behavior of the alloy system. In this study, the Ω value has been determined as 18000 J/mol by reviewing experimental and theoretical studies from the literature (Miedema et al., 1980; Sundman et al., 1985).

Configurational entropy refers to the entropy arising from the different possible arrangements of atoms in the alloy. Under the assumption of an ideal solid solution, the configurational entropy is calculated as follows:

$$\Delta S_{mix} = -\mathrm{R} * [x * In(x) + (1 - x) * In(1 - x)] \tag{18}$$

Here, R is the gas constant (8.314 J/mol·K) and x is the mole fraction of Al.

Gibbs free energy is a key parameter that determines the thermodynamic stability of a system. Utilizing the mixing enthalpy and configurational entropy, the Gibbs free energy at a specific temperature is calculated as follows:

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T * \Delta S_{mix} \tag{19}$$

Here, T is absolute temperature (K).

## 2.5.Calculations and Results

In this section, we will calculate various properties of the Ti(1-x)Al(x) alloy system for compositions ranging from x = 0 to x = 1 and analyze the results in detail. The calculations have been performed for x values at intervals of 0.1.

### 2.5.1.Lattice Parameter and Theorical Density

The lattice parameters calculated using Vegard's Law and the corresponding theoretical densities are shown in Table 1.

***Table 1:*** *This table presents the lattice parameters and densities of Ti-Al alloys at different compositions.*

| x | Lattice Parameter (Å) | Density (g/cm³) |
|---|---|---|
| **0** | 2.951 | 11.253 |
| **0.1** | 3.061 | 9.891 |
| **0.2** | 3.171 | 8.733 |
| **0.3** | 3.281 | 7.737 |
| **0.4** | 3.390 | 6.870 |
| **0.5** | 3.500 | 6.109 |
| **0.6** | 3.610 | 5.436 |
| **0.7** | 3.720 | 4.836 |
| **0.8** | 3.830 | 4.298 |
| **0.9** | 3.940 | 3.813 |
| **1** | 4.050 | 3.373 |

The lattice parameter increases linearly with increasing Al content. As x changes from 0 to 1, the lattice parameter increases from 2.951 Å to 4.050 Å. The reasons for this increase may include:

- Aluminum atoms have a larger atomic radius than titanium atoms. The larger atomic radius of aluminum requires a wider lattice parameter and, consequently, a larger unit cell volume. Thus, as the aluminum content in the alloy increases, the lattice parameter also increases (see Figure 1).
- Interactions between atoms in the alloy can cause an increase in the lattice parameter. The larger atomic radius of aluminum contributes to an increase in the lattice parameter of the alloy as the aluminum content increases.
- The FCC structure of aluminum has a lower density compared to the HCP structure. This leads to FCC structures having a larger lattice parameter. As the aluminum content in the alloy increases, the influence of the FCC structure grows, resulting in a wider lattice parameter.

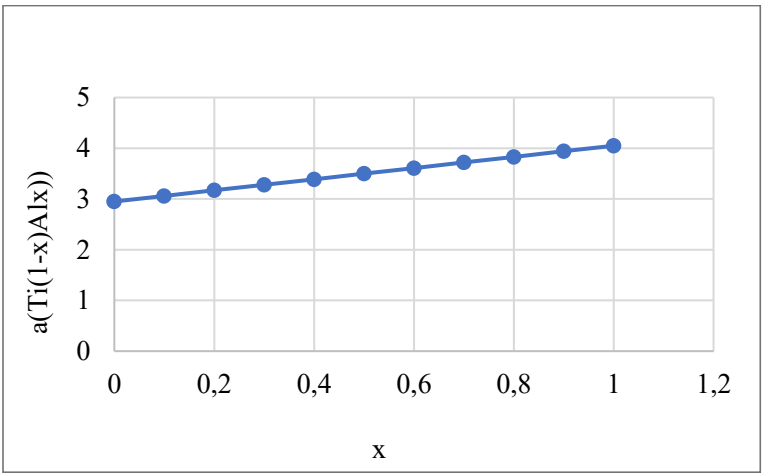



***Fig.1*** *This figure illustrates the relationship between aluminum content (x) and the lattice parameter of Ti-Al alloys.*

The density decreases significantly as the Al content increases (see Figure 2). While the density of pure Ti is 4.507 g/cm³, the density of pure Al is 2.7 g/cm³. This decrease is due to aluminum's lower atomic mass compared to titanium. The change in density significantly affects the alloy's weight, which is particularly critical for aerospace and space applications.

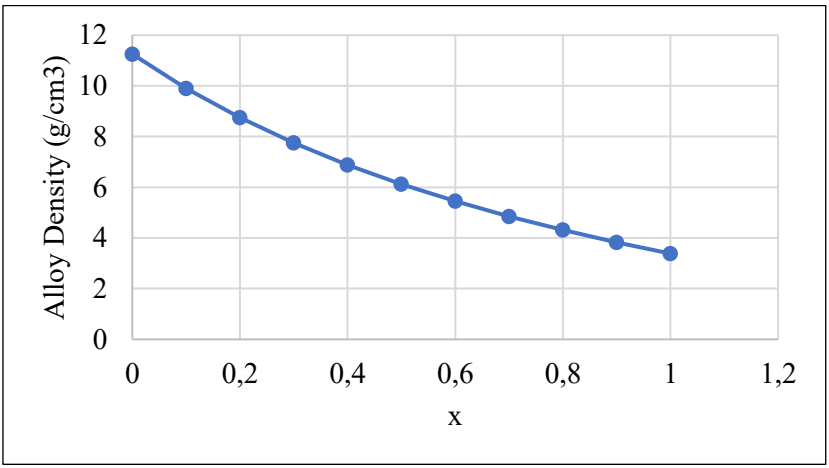



***Fig. 2*** *This figure illustrates the relationship between aluminum content (x) and the density of Ti-Al alloys.*

### 2.5.2.Elastic Properties

The elastic properties (Young's modulus, bulk modulus, shear modulus, and Poisson's ratio) calculated using the VRH (Voigt-Reuss-Hill) method are presented in Table 2.

In the calculations, the following values have been used: E(Ti) = 107 GPa, E(Al) = 69 GPa, K(Ti)=100 GPa, K(Al)=76 GPa, G(Ti)=45 GPa, and G(Al)=25 GPa (Callister, & Rethwisch, 2018).

***Table 2:*** *It presents Young's modulus, bulk modulus, shear modulus, and Poisson's ratio of Ti-Al alloys at different compositions.*

| x | $E_{VRH}$ (GPa) | $K_{VRH}$ (GPa) | $G_{VRH}$ (GPa) | Poisson Ratio (ν) |
|---|---|---|---|---|
| **0.0** | 107.000 | 110.000 | 45.000 | 0.320 |
| **0.1** | 102.307 | 105.945 | 42.333 | 0.324 |
| **0.2** | 97.892 | 102.083 | 39.897 | 0.327 |
| **0.3** | 93.714 | 98.392 | 37.645 | 0.330 |
| **0.4** | 89.742 | 94.852 | 35.545 | 0.333 |
| **0.5** | 85.949 | 91.446 | 33.571 | 0.336 |
| **0.6** | 82.312 | 88.161 | 31.703 | 0.339 |
| **0.7** | 78.814 | 84.984 | 29.923 | 0.342 |
| **0.8** | 75.438 | 81.904 | 28.220 | 0.345 |
| **0.9** | 72.170 | 78.912 | 26.581 | 0.349 |
| **1.0** | 69.000 | 76.000 | 25.000 | 0.352 |

Young's modulus represents the material's resistance to elastic deformation. It is observed that Young's modulus decreases with increasing Al content. Pure titanium has a higher Young's modulus (E) than pure aluminum, which can be attributed to aluminum being a softer metal compared to titanium.

The bulk modulus measures the material's resistance to volumetric compression, while the shear modulus reflects its resistance to shape changes. Both the bulk modulus (K) and the shear modulus (G) also decrease with increasing Al content. Specifically, the bulk modulus decreases from 110.0 GPa to 76 GPa, and the shear modulus falls from 45 GPa to 25 GPa. This decrease indicates that the alloy's compressibility and resistance to deformation reduce as the Al content increases.

Poisson's ratio describes the ratio of lateral contraction to longitudinal extension in a material. Poisson's ratio slightly increases with higher Al content, rising from 0.320 for Ti to 0.352 for Al. This increase suggests that the material's tendency to expand laterally grows with more Al content.

The overall decrease in all elastic properties (except Poisson's ratio) with increasing Al content indicates that the alloy becomes softer and more flexible. This trend is consistent with aluminum being softer than titanium. These results demonstrate how the mechanical properties of the alloy can be adjusted based on composition. For applications requiring high hardness and rigidity, low-Al alloys might be preferred, while high-Al alloys may be used for applications needing greater flexibility. Such data can play a crucial role in the design and optimization of Ti-Al alloys. For instance, selecting an alloy composition with the desired elastic properties for a specific application is possible. However, it is essential to validate these results with experimental data, as factors like microstructure, phase distribution, and production methods can also influence the elastic properties.

### 2.5.3.Thermodynamic Properties

The calculations for mixing enthalpy ($\Delta H_{mix}$), configurational entropy ($\Delta S_{mix}$), and Gibbs free energy ($\Delta G_{mix}$) have been performed at a temperature of 298 K (25°C), and the results are presented in Table 3.

***Table 3:*** *It presents the mixing enthalpy, configurational entropy and Gibbs free energy of Ti-Al alloys at different compositions.*

| $\Delta H_{mix}$ (J/mol) | $\Delta S_{mix}$ (J/ mol·K) | $\Delta G_{mix}$ (J/mol) |
|---|---|---|
| **0** | 0 | 0 |
| **1620** | 2.70 | 814.583 |
| **2880** | 4.16 | 1640.216 |
| **3780** | 5.08 | 2266.539 |
| **4320** | 5.60 | 2652.565 |
| **4500** | 5.76 | 2782.677 |
| **4320** | 5.60 | 2652.565 |
| **3780** | 5.08 | 2266.539 |
| **2880** | 4.16 | 1640.216 |
| **1620** | 2.70 | 814.583 |
| **0** | 0 | 0 |

The mixing enthalpy is positive for all compositions, indicating that the Ti-Al system is an endothermic mixture. The $\Delta H_{mix}$value reaches its maximum (4500 kJ/mol) at x = 0.5. This suggests that the formation of the alloy requires energy and that interatomic interactions are generally repulsive.

The configurational entropy ($\Delta S_{mix}$) reaches its maximum (5.76 J/mol·K) at x = 0.5, as expected. This shows that maximum disorder occurs at equal atom ratios. Positive entropy values indicate that the formation of the mixture increases disorder, making it thermodynamically favorable.

Gibbs free energy ($\Delta G_{mix}$) is positive for all compositions, but lower than $\Delta H_{mix}$ values. This indicates that while the entropy contribution reduces the Gibbs free energy, it does not make it entirely negative. This result suggests that the formation of Ti-Al alloys is not thermodynamically favorable at room temperature,

though alloy formation may still be possible due to kinetic factors and high temperatures.

The calculation results show that the properties of the Ti(1-x)Al(x) alloy system change significantly with composition. While structural properties such as lattice parameter and density show a linear variation according to Vegard's Law, elastic and thermodynamic properties exhibit more complex behavior.

The decrease in elastic properties with increasing Al content indicates reduced strength and hardness of the alloy. This suggests that low-Al alloys might be more suitable for applications requiring high strength, whereas high-Al alloys, being lighter, might be preferred in applications where weight is critical.

Thermodynamic calculations indicate that the Ti-Al system is not fully stable at room temperature. Positive mixing enthalpy and Gibbs free energy demonstrate that the formation of the alloy is endothermic and requires energy. This implies that high temperatures and special processes may be necessary during the production of the alloy.

**Calculations Using Python**

This study encompasses the calculation of various physical and mechanical properties of the Ti(1-x)Al(x) alloy system using Python. It includes calculations for a composition range from x = 0 to x = 1 and provides a basis for understanding the alloy's behavior at different Al contents. The main calculations used in the Python code are as follows:

Firstly, the variable x used for the composition of the Ti-Al alloy takes values between 0 and 1 in increments of 0.1. Various

constants (such as the lattice parameters, atomic masses, and elastic moduli of Ti and Al) are defined.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.constants import N_A
import pandas as pd

# Constants
a_Ti = 2.951  # Ti lattice parameter (Å)
c_Ti = 4.683  # Ti c parameter (Å)
a_Al = 4.045  # Al lattice parameter (Å)

A_Ti = 47.867 # Ti atomic mass (g/mol)
A_Al = 26.982 # Al atomic mass (g/mol)

E_Ti = 107e9 # Ti Young's modulus (GPa)
E_Al = 69e9   # Al Young's modulus (GPa)

K_Ti = 110e9 # Ti Bulk modulus (GPa)
K_Al = 76e9   # Al Bulk modulus (GPa)

G_Ti = 45e9   # Ti Shear modulus (GPa)
G_Al = 25e9   # Al Shear modulus (GPa)

R = 8.314     # Gas constant (J/mol·K)
omega = 18000 # Interaction parameter (J/mol)
T = 298.15    # Temperature (K)
```

Using Vegard's Law, the lattice parameter of the alloy is calculated. Density is determined by considering the volumes of HCP and FCC structures for Ti and Al.

```
import numpy as np
# Composition range
x = np.linspace(0, 1, 11)  # From 0 to 1 with intervals of 0.1
```

```
def calculate_lattice_parameter(x):
    return (1 - x) * a_Ti + x * a_Al
def calculate_volume(x):
    V_HCP = np.sqrt(3) / 2 * a_Ti**2 * c_Ti  # Volume for HCP structure
    V_FCC = a_Al**3  # Volume for FCC structure
    return (1 - x) * V_HCP + x * V_FCC
def calculate_density(x):
    M_alloy = (1 - x) * A_Ti + x * A_Al  # Average atomic mass of the alloy
    Z = 5  # Average number of atoms per unit cell
    V_alloy = calculate_volume(x)  # Get the volume of the alloy
    return (M_alloy * Z) / (N_A * V_alloy * 1e-30)  # Density in g/cm³
```

Elastic properties (Young's modulus, bulk modulus, shear modulus, and Poisson's ratio) are calculated according to the Voigt-Reuss-Hill (VRH) method.

```
def calculate_elastic_moduli(x):
    # Young modulus
    E_V = (1-x) * E_Ti + x * E_Al
    E_R = 1 / ((1-x)/E_Ti + x/E_Al)
    E_VRH = (E_V + E_R) / 2
    # Bulk modulus
    K_V = (1-x) * K_Ti + x * K_Al
    K_R = 1 / ((1-x)/K_Ti + x/K_Al)
    K_VRH = (K_V + K_R) / 2
    # Shear modulus
```

```
    G_V = (1-x) * G_Ti + x * G_Al
    G_R = 1 / ((1-x)/G_Ti + x/G_Al)
    G_VRH = (G_V + G_R) / 2
    # Poisson ratio
    v = (3*K_VRH - 2*G_VRH) / (6*K_VRH + 2*G_VRH)
    return E_VRH/1e9, K_VRH/1e9, G_VRH/1e9, v  # GPa
```

Mixing enthalpy, configurational entropy, and Gibbs free energy are calculated.

```
def calculate_thermodynamic_properties(x):
    # Mixing Enthalpy
    dH_mix = omega * x * (1-x)
    # Config. Entropy
    dS_mix = -R * (x * np.log(x + 1e-10) + (1-x) * np.log(1-x + 1e-
10))
    # Gibbs Free Energy
    dG_mix = dH_mix - T * dS_mix
    return dH_mix, dS_mix, dG_mix
results = {
```

The obtained results are as follows:

Lattice Parameter and Density: As the aluminum content increases, the lattice parameter of the alloy increases while the density decreases (see Figure 3). This is due to the substitution of Ti atoms with larger Al atoms in the lattice.

Elastic Properties: With increasing aluminum content, Young's modulus, bulk modulus, and shear modulus decrease (see

Figure 4). This is attributed to the lower elastic moduli of Al atoms compared to Ti atoms. The Poisson ratio behavior of Ti-Al alloys with different compositions is shown in Figure 5.

Thermodynamic Properties: As the aluminum content increases, the mixing enthalpy and Gibbs free energy increase, while the configurational entropy decreases (see Figure 6). This reflects the impact of Al atoms on the thermodynamic stability of the alloy.

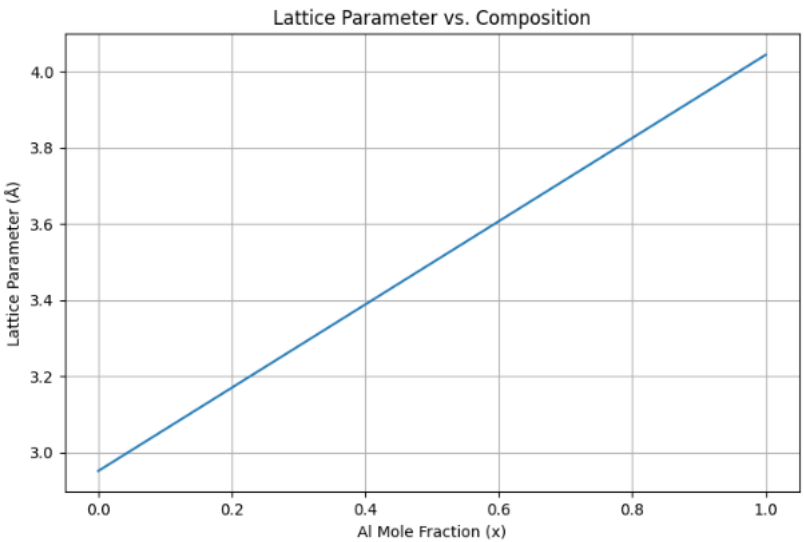



***Fig. 3*** *It presents the lattice parameter of Ti-Al alloys at different compositions.*

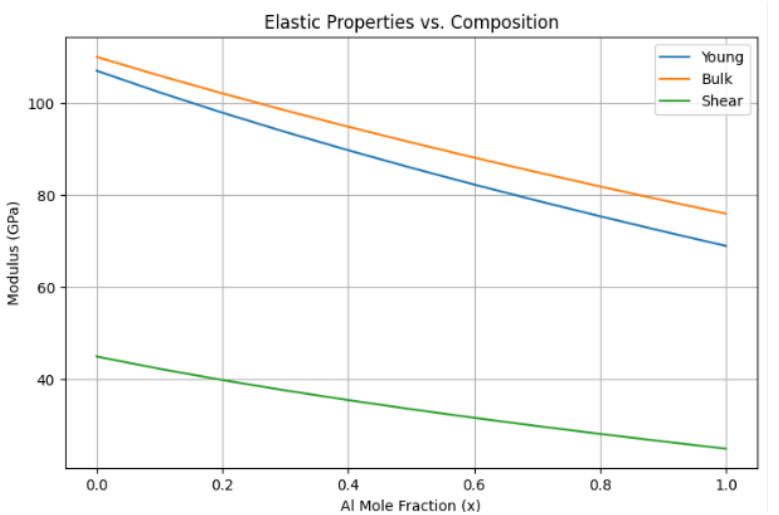



***Fig. 4*** *It presents the young's modulus, bulk modulus, shear modulus of Ti-Al alloys at different compositions.*

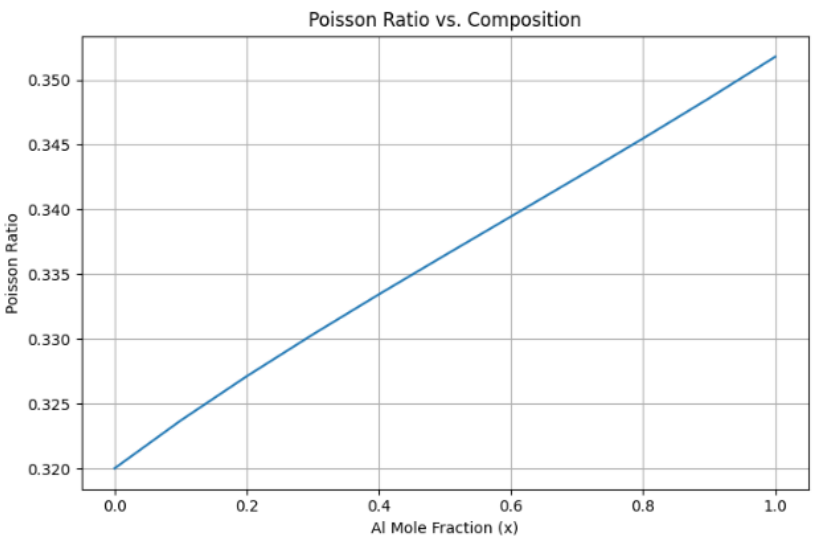



***Fig.5*** *It presents the Poisson's ratio of Ti-Al alloys at different compositions.*

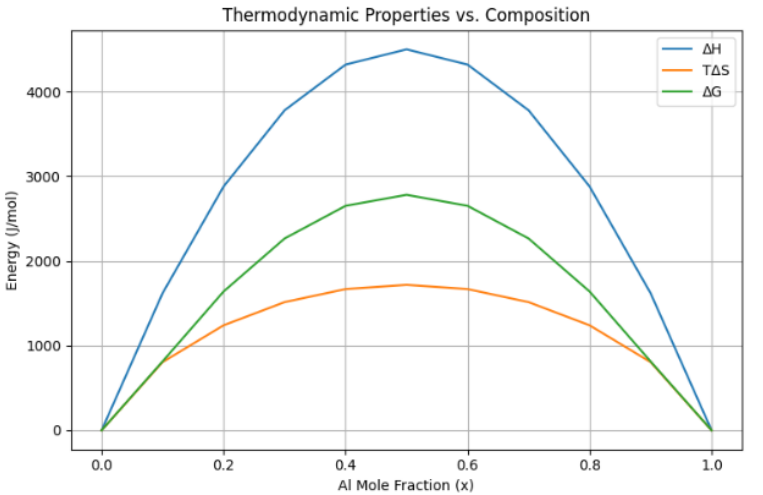



***Fig. 6*** *It presents the mixing enthalpy, configurational entropy, and Gibbs free energy of Ti-Al alloys at different compositions.*

**Industrial Applications**

Titanium-based alloys are known for their exceptional mechanical properties, making them essential in various industries. Their unique combination of strength, lightweight nature, and resistance to corrosion enables their use in demanding applications across multiple sectors.

In aerospace, titanium alloys, especially Ti-6Al-4V, are widely used for structural elements like airframes and landing gear. Their high strength-to-weight ratio allows for significant reductions in overall aircraft weight, which is crucial for improving fuel efficiency and performance.

These alloys are critical in jet engines due to their ability to endure high temperatures and harsh operational conditions. They are often employed in turbine blades, compressor discs, and casings,

enhancing both efficiency and reliability while prolonging service life and minimizing maintenance.

Fasteners crafted from titanium alloys are favored for their strength and lightweight properties. They secure various components while reducing overall weight, essential for enhancing fuel efficiency. The corrosion resistance of titanium ensures long-lasting performance, leading to decreased maintenance requirements.

These alloys play a vital role in spacecraft and satellite construction. Their lightweight and durable nature ensures reliability under extreme space conditions, making them suitable for structural elements, thermal shields, and frames that require resilience against temperature fluctuations and radiation.

In the biomedical realm, titanium's compatibility with human tissue makes it ideal for implants and surgical tools. Its various grades are utilized based on specific strength and corrosion resistance requirements, such as dental implants and orthopedic devices.

The automotive sector increasingly incorporates titanium alloys to produce lightweight parts that enhance vehicle performance. Applications include exhaust systems, suspension components, and engine parts, where reducing weight leads to improved acceleration and fuel economy.

Titanium alloys are particularly beneficial in marine environments due to their resistance to corrosion from seawater. They are utilized in shipbuilding for components like propellers and heat exchangers, ensuring long service life and minimizing maintenance costs in commercial and military vessels.

In chemical processing, titanium alloys are preferred for their resistance to aggressive environments and high temperatures. They find use in reactors, heat exchangers, and pressure vessels, where durability and reliability are essential for efficient operations.

In the energy sector, titanium alloys are vital, particularly for offshore drilling and subsea components. Their strength and corrosion resistance are crucial in extreme pressures and harsh conditions, enhancing safety and operational efficiency in these applications.

Titanium-based alloys showcase remarkable versatility and performance across multiple sectors, including aerospace, biomedical, automotive, marine, chemical processing, and energy. Their unique properties not only drive advancements in material science but also facilitate innovations in engineering and design, establishing them as crucial materials for future applications. Ongoing research and development promise to expand their uses, further enhancing efficiency and sustainability across industries.

**Conclusion**

In this study, the structural, mechanical, and thermodynamic properties of the Ti(1-x)Al(x) alloy system were theoretically investigated across a wide composition range ($0 \leq x \leq 1$). The variations of fundamental material properties such as lattice parameter, theoretical density, elastic properties, and thermodynamic functions with composition were analyzed. Additionally, these findings were verified through computational analysis in Python, ensuring consistency with theoretical predictions and enhancing the reliability of the study results.

The findings indicate the following:

- The lattice parameter increases linearly with increasing Al content, showing compliance with Vegard's Law.
- The theoretical density decreases linearly with increasing Al content, indicating that the alloy becomes lighter.
- The elastic properties (Young's modulus, bulk modulus, shear modulus) generally show a decreasing trend with increasing Al content.
- Thermodynamic calculations reveal that the mixture enthalpy and configurational entropy reach their maximum values at the composition x = 0.5.

This study provides a comprehensive theoretical framework for understanding the composition-dependent properties of the Ti-Al alloy system. The obtained results can serve as a valuable guide in material design and optimization processes. However, it is important that theoretical predictions are validated and supported by further experimental studies.

For future work, it is recommended to improve calculations using more complex theoretical models and to investigate properties over a broader temperature range. Additionally, a more detailed examination of the effects of microstructural features and phase transformations on alloy properties would contribute to a better understanding of the Ti-Al alloy system.

The calculated properties reveal a strong dependence of Ti-Al alloys on composition. While the lattice parameter and density

exhibit linear behavior, elastic properties show a more complex relationship (Banerjee, & Williams, 2013).

The major advantage of theoretical models is their ability to make rapid predictions over a wide composition range. However, due to factors such as the complexity of interatomic interactions and local structural changes, results may deviate from actual values (Miracle, & Senkov, 2017).

This study demonstrates that the properties of Ti-Al alloys can be predicted theoretically. The calculated values confirm the combination of lightness and high elastic modulus of the alloy. In future work, the accuracy of these predictions can be improved using more advanced theoretical models and ab initio calculations.

## References


Appel, F., Paul, J. D., & Oehring, M. (2011). Gamma titanium aluminide alloys: science and technology. John Wiley & Sons.

Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). Perspectives on titanium science and technology. Acta Materialia, 61(3), 844-879.

Bewlay, B. P., Nag, S., Suzuki, A., & Weimer, M. J. (2016). TiAl alloys in commercial aircraft engines. Materials at High Temperatures, 33(4–5), 549–559. https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: an introduction (9th ed.). Wiley.

Clemens, H., & Mayer, S. (2013). Design, processing, microstructure, properties, and applications of advanced intermetallic TiAl alloys. Advanced Engineering Materials, 15(4), 191-215. https://doi.org/10.1002/adem.201200231

Ghosh, G., & Olson, G. B. (2007). Integrated design of Nb-based superalloys: Ab initio calculations, computational thermodynamics and kinetics, and experimental results. Acta Materialia, 55(10), 3281-3303. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.01.036

Hao, Y. L., Yang, R., Niinomi, M., Kuroda, D., Zhou, Y. L., Fukunaga, K., & Suzuki, A. (2002). Young's modulus and mechanical properties of Ti-29Nb-13Ta-4.6 Zr in relation to α″ martensite. Metallurgical and Materials Transactions A, 33(10), 3137-3144. https://doi.org/10.1007/s11661-002-0299-7

Jacob, K., Raj, S. & Rannesh, L. (2007). Vegard's law: a fundamental relation or an approximation? International Journal of Materials Research, 98(9), 776-779. https://doi.org/10.3139/146.101545

Kim, Y. W., & Kim, S. L. (2018). Advances in gammalloy materials–processes–application technology: successes, dilemmas, and future. JOM, 70(4), 553-560. https://doi.org/10.1007/s11837-018-2747-x

Lapin, J. (2009). TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. In Conference proceedings METAL, 19, 21.

Miedema, A. R., de Châtel, P. F., & de Boer, F. R. (1980). Cohesion in alloys — Fundamentals of a semi-empirical model. Physica B+C, 100(1), 1-28. https://doi.org/10.1016/0378-4363(80)90054-6

Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. Acta Materialia, 122, 448-511.

Peters, M., Kumpfert, J., Ward, C.H. and Leyens, C. (2003), Titanium Alloys for Aerospace Applications. Adv. Eng. Mater., 5: 419-427. https://doi.org/10.1002/adem.200310095

Ramanujan, R. V. (2000). Phase transformations in γ based titanium aluminides. International Materials Reviews, 45(6), 217–240. https://doi.org/10.1179/095066000101528377

Srivastav, A. (2011). An overview of metallic biomaterials for bone support and replacement. In A. Laskovski (Ed.), InTech. Moradabad: InTech.

Straumanis, M.E. and Woodward, C.L. (1971), Lattice parameters and thermal expansion coefficients of Al, Ag and Mo at low temperatures. Comparison with dilatometric data. Acta Cryst. A, 27: 549-551. https://doi.org/10.1107/S0567739471001220

Sundman, B., Jansson, B., & Andersson, J.-O. (1985). The Thermo-Calc databank system. Calphad, 9(2), 153-190. https://doi.org/10.1016/0364-5916(85)90021-5

Wang, Y., Liu, Z. K., & Chen, L. Q. (2004). Thermodynamic properties of Al, Ni, NiAl, and Ni3Al from first-principles calculations. Acta Materialia, 52(9), 2665-2671. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.02.014

Wu, X. (2006). Review of alloy and process development of TiAl alloys. Intermetallics, 14(10-11), 1114-1122. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.10.019

# BÖLÜM V

# Basit Karbonlu ve Düşük Alaşımlı Çeliklerde Sertleşebilirlik ve Optimizasyonu

**Aysel YAZICI[1]**

## 1.Giriş

Sertleşebilirlik, bir çeliğin ısıl işlemle sertleştirilebilme yeteneğini ifade eder. Krauss'un tanımına göre sertleşebilirlik, bir demir esaslı alaşıma, östenitleme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktan su verildiğinde (hızlı soğutma) martenzit oluşturma yeteneğidir (Krauss, 1990). Martenzit oluşumunun derecesi; östenitlenmiş çeliği martenzit başlangıç sıcaklığının altına, östenitin perlite veya diğer dönüşüm ürünlerine önemli bir dönüşümü olmadan hızla soğutmak için gereken soğutma hızına bağlıdır. Bu nedenle, derin sertleşme (martenzit oluşumu) gösteren çelikler yüksek sertleşebilirliğe sahip kabul edilirken, sığ martenzitik sertleşme gösterenler düşük sertleşebilirliğe sahip kabul edilir (Burrier, 1990).

[1] Prof. Dr. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Turgutlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Turgutlu Manisa/Türkiye, Orcıd: 0000-0003-1290-7104, aysel.yazici@cbu.edu.tr

Sertleşebilirlik, sertlik veya su vermeden sonra oluşan martenzitin maksimum sertliği ile karıştırılmamalıdır. Sertlik, yalnızca çelikteki karbon (C) içeriğine bağlıdır; oysa sertleşebilirlik, belirli bir derinlikte belirli bir sertliği elde etme yeteneği olup hem karbon içeriğine hem de alaşım elementlerinin varlığı ve miktarına bağlıdır. Alaşımlama karbon difüzyonunu yavaşlatabilir (perlit oluşumu için gereklidir), böylece daha yavaş soğuma hızlarında (ve dolayısıyla daha büyük sertleşme derinliklerinde) martenzit oluşumunu teşvik ederek sertleşebilirliği arttırabilir. Örneğin, östenitlemeden sonra %1 C içeren bir çeliği hızla soğutmak, yalnızca %0.3 C içeren %3 Ni çeliğinden çok daha yüksek bir sertlik geliştirmesine neden olur, ancak nikel çeliği daha büyük bir kesitte tamamen sertleşeceği için daha fazla sertleşebilirliğe sahip olur (Burrier, 1990).

Alaşımsız basit (yalın) karbon çelikleri en yaygın kullanılan çeliktir. Çeliklere alaşımsız demek onun sadece demir elementinden ibaret olduğu anlamına gelmez; karbonun yanı sıra refakat elementleri, %0.5 Si, %0.8 Mn, %0.1 Al, %0.1 Ti, %0.25 Cu fazlasını ihtiva etmezse alaşımsız sayılır (DIN 17100). Düşük/hafif alaşımlı çeliklerde, alaşım elementlerinin toplamı %5’ i geçmez. Alaşım elementlerinin düşük alaşımlı çeliklerdeki birincil işlevi, ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri ve tokluğu optimize etmek amacıyla sertleşebilirliği artırmaktır.

Çelikler karbon içeriklerine göre; düşük karbonlu, orta karbonlu, yüksek karbonlu, ve ultra yüksek karbonlu çelikler olarak sınıflandırılabilir. Düşük karbonlu çelikler ağırlıkça %0.25'e kadar C; orta karbonlu çelikler ağırlıkça %0.25 - %0.60 C; yüksek karbonlu çelikler ağırlıkça %0.60 - %1.0 C; ultra yüksek karbonlu çelikler yaklaşık ağırlıkça %1.25 - %2.0 C içerir. Karbon, çeliğin sertliğini ve mekanik özelliklerini etkileyen ana elementtir. Karbon içeriği, en yüksek sertliğe sahip martenzitik mikro yapılar olmak üzere, her türlü mikro yapının sertliğini/direncini artırır (Dossett & Totten, 2014).

Düşük karbonlu çeliklerde ısıl işlemler; malzemeyi sonraki işlemlere hazırlamak (işlenebilirliği iyileştirmek), bitmiş parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek ve özellikle karbürleme veya karbonitrasyon yoluyla yüzey sertleştirme amacıyla yapılır. Yeniden kristalleştirme tavlaması ve normalleştirme tavlaması bu çeliklere başarıyla kullanılır. Karbon içeriği %0.25'e yaklaşan çelikler hariç, martenzit oluşumu çok azdır veya hiç yoktur ve parçaların temperlenmesine gerek yoktur (Dossett & Totten, 2014).

Orta karbonlu çelikler; karbon çeliklerinin en çok yönlü olanlarıdır, çünkü sertleşebilirlikleri uygun kontrollerle geniş bir aralıkta değiştirilebilir. Orta karbonlu çelikler geleneksel olarak sertleştirilmiş ve temperlenmiş olarak kullanılır. Sertleşebilirlik, kimyasal bileşimdeki değişikliklere, özellikle manganez, silikon ve kalıntı elementlerin içeriğine ve tane boyutuna karşı çok hassastır. Bu çelikler ayrıca kesit boyutundaki değişikliklere karşı da çok hassastır. Orta karbonlu çeliklerin; alev, lazer, ve indüksiyon teknikleriyle yüzeyleri sertleştirilebilir.

Yüksek karbonlu çeliklerde; tavlamalar, sertleştirme ve östemperleme ısıl işlemleri kullanılır. Bu gruptaki çeliklerin; alev, lazer, ve indüksiyon teknikleriyle yüzeyleri sertleştirilebilir.

Çeliklerin sertleşebilirliği; temel olarak karbon içeriği, diğer alaşım elementlerinin varlığı, ve östenit tane boyutuna bağlıdır. Bu çalışmada, basit karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerde sertleşebilirliği etkileyen parametreler ve bunların optimizasyonu incelenmiştir.

## 2. Sertleşebilirliği etkileyen parametreler

### 2.1. Alaşım elementlerinin sertleşebilirlik üzerindeki etkisi

Sertleşebilirlik açısından, çeliği alaşımlamanın iki temel işlevi vardır. Birincisi ve muhtemelen en önemlisi, belirli bir uygulama için daha düşük karbon içeriğinin kullanılmasına izin verme kapasitesidir. Karbon içeriğindeki azalmaya eşlik eden sertleşebilirlikteki azalma, eklenen alaşım elementlerinin sertleşebilirlik etkisiyle kolayca telafi edilebilir. Alaşımlamadan

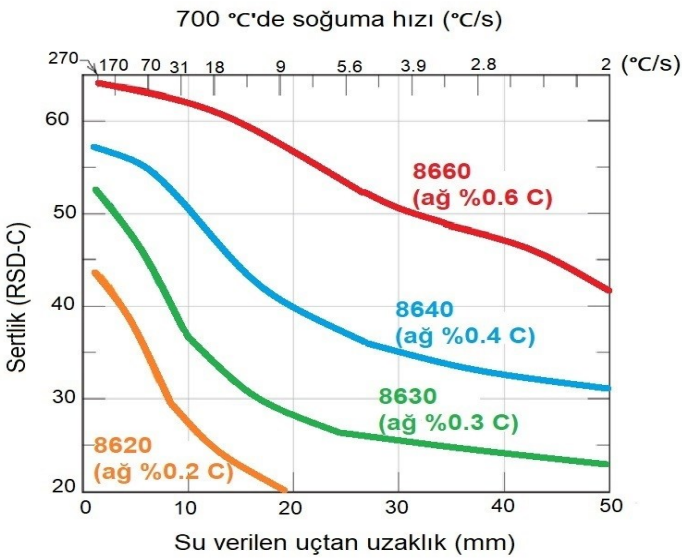
kaynaklanan artan sertleşebilirliğin ikinci işlevi; belirli bir kesit için daha yavaş soğuma hızlarına izin vermek, böylece genellikle termal gradyanı ve dolayısıyla soğuma gerilimini azaltmaktır (Dossett & Totten, 2014).

Düşük sertleşebilme kapasitesine sahip sade karbon çeliklerinde, alaşım elementlerinin varlığı genellikle gerekli olan hızlı su verme soğutmasına olan ihtiyacı azaltır, yani kritik soğuma hızını düşürür. Kritik soğutma hızı, yalnızca martenzitik dönüşümle sonuçlanan minimum soğuma hızıdır ve bu nedenle önemlidir. İstenilen sertliği elde etmek için gerekli soğuma hızının azaltılması, aynı zamanda deformasyon ve çatlama olasılığını da azaltır. Ayrıca, alaşım elementlerinin varlığı tipik olarak sertleşme derinliğini artırır, böylece kalın kesit boyutlarının tamamen sertleşme potansiyeli artar (Canale & ark., 2014).

Çeşitli alaşım elementlerinin göreli önemi ve etkisi, çeliğin eşdeğer karbon içeriğinin belirlenmesiyle hesaplanır. Çeliğin karbon içeriği sertleşebilirliği önemli ölçüde etkiler. Ötektoid altı (ağırlıkça %0.76'nın altında karbon içeren) çeliklerde; C içeriğindeki artış kritik soğuma sıcaklığını düşürerek, yani östenitin ferrit ve sementite dönüşüm sıcaklığını düşürerek sertleşebilirliği artırır. Buna karşılık, ötektoid üstü (ağırlıkça %0.76'nın üstünde karbon içeren) çeliklerde; C içeriğindeki artış dönüşüm sıcaklığını ve faz dönüşümü için gerekli kuvveti artırarak, daha yüksek bir kritik soğuma sıcaklığına ve azalan sertleşebilirliğe neden olur (Maity & Sharma, 2022). C içeriği farklı 8600 serisi dört farklı çeliğe ait sertleşebilme eğrileri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çelikte bulunan alaşım elementleri, çelik östenitik bölgeye ısıtıldığında östenit (γ-Fe) içinde neredeyse homojen olarak dağılır. Soğuma sırasında östenit, ferrit ve karbür karışımına ayrılma eğilimindedir. Alaşım elementlerinin bu yeniden dağılım süreci difüzyonu yoluyla olur, alaşım elementlerinin yayınma gücü demirdeki karbonunkinden çok daha düşüktür. Bu nedenle, alaşım elementlerinin varlığı östenitin perlite dönüşümünü zorlaştırır ve zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramlarındaki dönüşüm

başlangıç eğrilerini daha uzun zamanlara kaydırır. Başka bir deyişle, kritik soğuma hızı, bu elementler östenit içinde tamamen çözünmüş olduğunda alaşım elementleri tarafından azaltılır. Dolayısıyla, TTT eğrilerini sağa kaydıran alaşım elementleri sertleşebilirliği artırır (Bhargava & Banerjee, 2017).




*Şekil 1. C içeriği farklı 8600 serisi dört farklı çeliğe ait sertleşebilme eğrileri*
*Kaynak: Callister & Rethwisch, 2009*

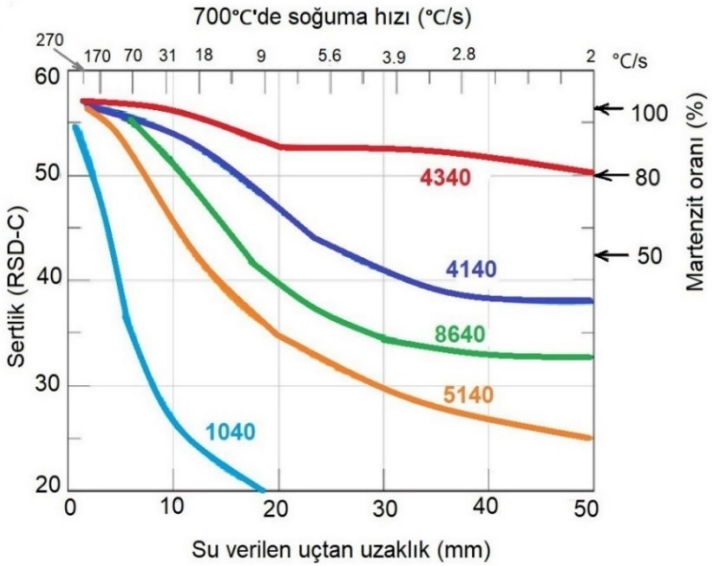
Manganez, krom, molibden, ve çok küçük miktarlarda bor eklenmesi, çeliğin sertleşebilirliğini önemli ölçüde artırır. Buna karşılık, nikel ve silikonun sertleşebilirliği artırma üzerinde hafif bir etkisi vardır. Kobalt, çeliğin sertleşebilirliğini azaltan bir elementtir. Çelikteki kobalt varlığı, perlitin çekirdeklenme hızını ve büyüme hızını artırır. Bu yüzden kobalt içeren çelikler, martenzit yerine perlit dönüşümüne uğrarlar. Çok küçük miktarlarda bor, çeliklerin

sertleşebilirliğini büyük ölçüde artırsa da miktarı o kadar küçüktür ki, sertleşebilirliği artırma açısından çelikte bir alaşım elementi olarak kabul edilmez. Bor ve molibdenin birlikte eklenmesi, sertleşebilirliği artırırken sinerji etkisi gösterir (Bhargava & Banerjee, 2017).

Bor, demir ile arayer katı çözelti oluşturur. Borun demirdeki katı çözünürlüğü, boyutu nedeniyle oldukça sınırlıdır (atom çapı 0.188 nm) ve arayer katı çözelti oluşturan elementler arasında en büyük olanıdır. Borun, γ-Fe'deki katı çözünürlüğü 910°C'de yaklaşık %0.001, α-Fe'deki çözünürlüğü ise esasen sıfırdır. Borun sertleşebilirlik üzerindeki etkisi, düşük karbonlu çeliklerde yüksek karbonlu çeliklere göre çok daha fazladır. Borun sertleşebilirlik üzerindeki etkisi, östenit tane boyutunun küçülmesiyle artar; yüksek sıcaklık işlemi, borun etkisini azaltır. Borun maliyeti çok düşük olduğundan, sertleşebilirliği artırma açısından güçlü ve ekonomik bir alaşım elementi olarak kabul edilir. Ticari çelikler %0.0005–0.005 bor içerir (Bhargava & Banerjee, 2017).

Yaklaşık olarak %0.001 oranında bor, sertleşebilirlik üzerinde önemli ve optimum bir etkiye sahiptir. Çeliklerde yaklaşık %0.003'ten fazla bor içeriği, sertleşebilirliği azaltır. Fazla bor, östenit tane sınırlarında $M_{23}(C,B)_6$ borokarbürleri oluşturma eğilimindedir. Kritik bir boyutu aştığında, bu borokarbürler proötektoid ferrit ve perlitin çekirdeklenme bölgeleri olarak işlev görür. Bor dağılımının çözeltideki atomlar olarak mı yoksa $M_{23}(C,B)_6$ olarak östenit tane sınırlarında mı bulunduğu soğuma hızından etkilenir. Bor, östenitleme sıcaklığından soğuma sırasında ferrit oluşumunu geciktirir (Dong & ark., 2012).

Ağırlıkça %0.4 C içeren beş farklı çeliğe ait sertleşebilme eğrileri Şekil 2’de gösterilmiştir. Beş farklı çeliğin sertleşebilme davranışında görülen farklılık, düşük alaşımlı çeliklerin bileşiminde bulunan krom, molibden ve nikel elementlerinin varlığıyla açıklanabilir.




*Şekil 2. Ağırlıkça %0.4 C içeren beş farklı çeliğe ait sertleşebilme eğrileri*
*Kaynak: Callister & Rethwisch, 2009*

## 2.2. Östenitleme sıcaklığı ve östenitleme süresinin sertleşebilirlik üzerindeki etkisi

Oda sıcaklığında demir atomları, alfa (α) demir veya ferrit olarak adlandırılan hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapıya sahiptir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise demir atomları, östenit veya gama (γ) demir olarak adlandırılan yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapıyı oluşturur. Bu iki fazın varlığı, karbon ile birlikte çeliğin ısıl işleminde temel rol oynar.

Östenit fazında demir atomları, ferrite göre daha geniş aralıklıdır. Bu durum, östenitin kristal yapısındaki ara boşluk bölgelerine daha fazla karbon atomu sığdırabilmesini sağlar (karbon atomu, demir atomunun sadece 1/30'u büyüklüğündedir ve demir atomlarının arasındaki boşluklara sığabilir). Katı çözünürlük, ne

kadar çözeltinin ana kafeste çözünebildiğinin (veya yerleşebildiğinin) bir ölçüsüdür. Sıcaklık, çözünürlüğün derecesini etkiler; daha yüksek sıcaklıklar ana kafesi genişletir ve böylece çözeltinin kafese sığması için daha iyi bir fırsat sunar. Karbon, α-demirde neredeyse çözünmez; oda sıcaklığında bu değer yaklaşık %0.008 ağırlık oranında iken, maksimum çözünürlük limiti 727 °C'de %0.02 ağırlık oranına ulaşır. Östenitte karbonun maksimum çözünürlüğü, 1147 °C'de yaklaşık %2 ağırlık oranındadır.

Östenitleme, östenit faz alanına ısıtmayı ifade eder ve bu süreç sırasında östenit yapısı oluşur. Östenit oluşumu, kristal yapı ve bileşimde bir değişikliği içerir. Kristal yapı değişikliği, arayüzeydeki kısa menzilli atom yeniden düzenlemeleri ile gerçekleştirilir; hacim merkezli kübik ferrit yüzey merkezli kübik östenite dönüşür. Östenit çekirdeklenmesinin, genellikle perlit koloni arayüzeylerinde veya ferrit/karbür arayüzeylerinde heterojen olarak gerçekleşmesi muhtemeldir; ancak, bazı koşullar altında (örneğin, saf demir veya yüksek sıcaklıklarda) ferrit tane sınırları da uygun çekirdeklenme bölgeleri olabilir (Dossett & Totten, 2013).

Uygun ısıl işlem uygulamalarını tasarlamak için, kritik sıcaklıkları bilmek önemlidir. $Ac_1$ sıcaklığı: ötektoid reaksiyon sıcaklığı (östenit oluşumunun başlangıcı); $Ac_3$ sıcaklığı: ötektoid altı çeliklerde tam östenit alanına geçiş yani östenit oluşumunun tamamlanma sıcaklığı; Acm sıcaklığı: ötektoid üstü çeliklerde tam östenit alanına geçiş sıcaklığıdır.

Çok bileşenli çeliklerde; ikili faz diyagramları, diğer alaşım elementlerinin varlığı nedeniyle kritik sıcaklıklar ve faz kararlılığı hakkında doğru bilgi vermeyebilir. Kinetik etkileri değerlendirmek için dilatometre kullanan deneysel ölçümler kullanılır. Hesaplamalı termodinamik veri tabanlarını kullanarak bu tür bilgileri elde etmek için, ticari yazılım paketleri de mevcuttur. Alaşım bileşimine dayalı olarak kritik sıcaklıkları tahmin etmek için, ampirik denklemler de mevcut olup, bunlar düşük alaşımlı çelikler için yararlı bir kılavuz sağlayabilir (örneğin: denklem 1-4).

Andrews (1965) göre:

$$A_{C3}\ (°C) = 910 - 203\sqrt{C} + 44.7\,Si - 15.2Ni + 31.5Mo + 104.4V + 13.1W \quad (1)$$

$$A_{c1}(°C) = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 290As + 6.38\,W \quad (2)$$

Hougardy (1984) göre:

$$A_{c3}(°C) = 902 - 255C + 19Si - 11Mn - 5Cr + 13Mo - 20Ni + 55V \quad (3)$$

Trzaska & Dobrzaski (2007) göre:

$$A_{c3}(°C) = 973 - 224.5\sqrt{C} - 17Mn + 34Si - 14Ni + 21.6Mo + 41.8V - 20Cu \quad (4)$$

Östenitleme sırasında meydana gelen mikroyapı dönüşüm mekanizmalarının difüzyonel olması nedeniyle, östenitleme sıcaklığı ve süresi önemlidir. Östenit tane boyutunun östenitleme süresi ve sıcaklığıyla artması beklenir. Alaşımlarda, östenit tane irileşme/kabalaşma davranışı farklı olabilir, çünkü çözeltideki veya çökelti halindeki alaşım elementleri çökelti tutma etkileri ile tane büyümesini geciktirebilir.

Birçok çelikte, tutma çökeltileri alüminyum nitrürler olup; normalleştirme, karbürleme gibi ısıl işlemler sırasında östenit faz alanında düşük sıcaklıklarda etkili tane inceltme sağlar. Alüminyum içermeyen iri taneli çelikte, östenit tane boyutu sıcaklıkla birlikte sürekli olarak artar. Alüminyum eklenmiş ince taneli çelikte, östenit taneleri alüminyum nitrürler tarafından sabitlenir ve tane boyutu, tane kabalaşma sıcaklığına kadar küçük kalır. Vanadyum nitrür veya niyobyum karbür gibi diğer çökeltiler de östenitleme sırasında tane irileşmesini baskılamada etkili olabilir (Gladman, 1997; Alogab & ark., 2007).

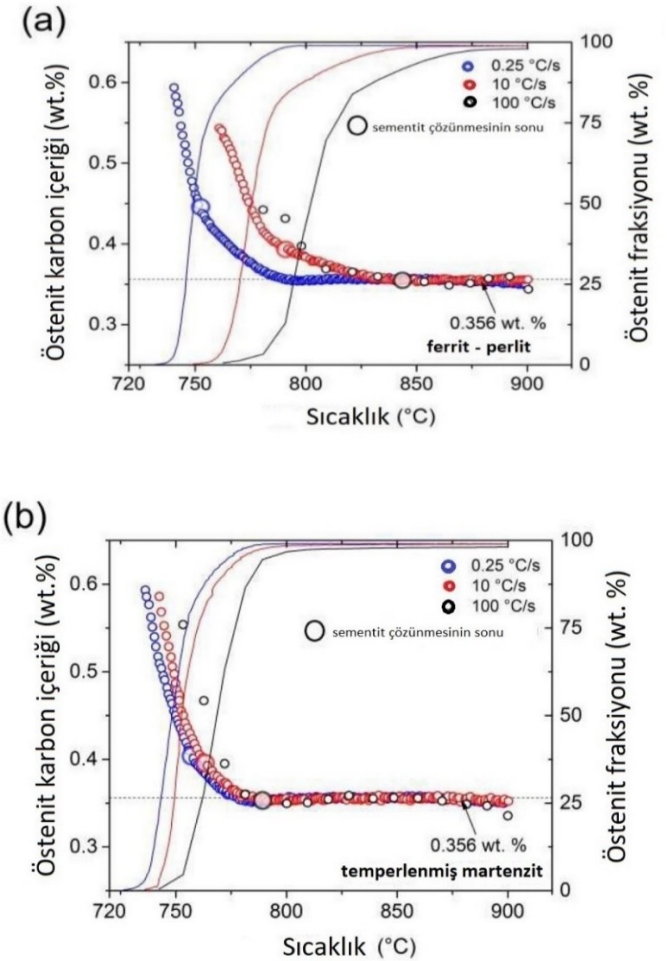
Östenitleme sıcaklığı sertleşebilirliği etkiler; yüksek sıcaklıkların tane boyutunu artırması, bileşimi homojenleştirmesi, karbürlerin ayrışmasını ve östenit içinde çözünmelerini kolaylaştırması nedeniyle sertleşebilirliği iyileştirebilir (Wang & ark., 2024). Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıkla artan östenit tane boyutu ile birim hacim başına düşen tane sınırı alanı azalır. Buda ferrit ve perlit çekirdeklenme alanlarının sayıca azaldığı, sonuç olarak bu dönüşümlerin yavaşladığı ve dolayısıyla sertleşebilirliğin arttığı anlamına gelir (Bain, 1932). Kaba/iri östenit taneleri

sertleşebilirliği arttırır, ancak pratikte alaşımlama kullanılarak sertleşebilirlik kazandırma tercih edilir, çünkü daha ince östenit; son mikro yapıyı rafine etmek, mukavemeti ve tokluğu artırmak için genellikle tercih edilir. Östenit tane boyutunun son mikroyapı ve özellikler üzerinde önemli bir etkisi vardır; artan tane boyutu mukavemeti ve tokluğu düşürür. Ayrıca, tane boyutundaki artışlar su vermede çatlak oluşumu olasılığını da artırır.

Östenitleme süresi uzatıldıkça; karbürler tamamen çözünür, östenitleme daha tamamlanmış hale gelir ve sertleşebilirlik artar. Ancak diğer yandan, aşırı uzun östenitleme süresi; tane büyümesine, alaşım elementi fazlarının aşırı çökelmesine, katı çözeltideki element içeriğinde azalmaya ve dolayısıyla sertleşebilirlikte azalmaya yol açabilir (Cryderman & Ballard, 2018). Ek olarak, östenitleme süresinin gereğinden fazla uzatılması maliyetlerin artmasına neden olur.

Zheng & ark. (2017), 25CrMoNbB çeliğinde, östenitleme süresinin sertleşebilirlik üzerindeki etkisini Jominy uçtan su verme testleri ile ortaya koyduğu çalışmasında; sertleşebilirliği maksimize etmek için optimal bir bekleme süresinin mevcut olduğunu, bu sürenin ötesinde ise aşırı tane büyümesi ve faz çökelmesi gibi zararlı etkilerin faydaları aşmaya başladığını bildirmektedir.

Denand & ark. (2020), 37MnCr4-3 çeliğinde, östenit oluşumunu başlangıç mikroyapısı ve ısıtma hızına bağlı olarak inceledikleri çalışmalarında; dikkate alınan başlangıç mikro yapısı ve ısıtma hızı ne olursa olsun, östenitlemenin sonuna kadar östenitteki ortalama karbon içeriğinde sürekli bir azalma meydana geldiğini, daha sonra karbon içeriğinin sabitlendiğini ve daha sonraki ısıtma süresince sabit kaldığını bildirmektedir. Östenitlemenin ilk aşamasında (ferrit ve sementitin eş zamanlı çözünmesi) östenitteki karbon içeriğinde hızlı bir azalma ve ardından kalan ferritin dönüşümü sırasında hafif bir azalma gözlenmiştir. Östenitleme tamamlandıktan sonra, östenitteki karbon içeriği sabit kalır ve incelenen çeliğin ortalama karbon içeriğine eşit olur (Şekil 3).




*Şekil 3. 37MnCr4-3 çeliğinde, farklı ısıtma hızları ve iki başlangıç mikroyapısı için, östenitleme sıcaklığına bağlı olarak östenit ortalama % karbon içeriği: a) ferrit-perlit başlangıç mikroyapısında, b) temperlenmiş martenzit başlangıç mikroyapısında*
*Kaynak: Denand & ark., 2020*

Çeliğin ısıl iletkenliği, fırın atmosferinin doğası, kesitin kalınlığı, yükleme yöntemi (aralıklı veya istiflenmiş), ve fırın atmosferinin sirkülasyon derecesi çelik parçasının gerekli östenitleme sıcaklığına ısıtılma hızını etkiler. Farklı kesitlere sahip ürünlerin kalın ve ince kesitlerinde sıcaklık artışındaki farklılık, pratik ısıl işlem operasyonlarında önemli bir sorundur. Isıtma döngüsünün nihai hedefi sıcaklık homojenliği olduğunda, bu hızlı ısıtmadan ziyade yavaş ısıtma ile daha güvenli bir şekilde elde edilir. Önemli kesit değişikliklerinde ısıtma yapılırken, termal gerilimleri ve bozulmaları en aza indirmek için daha yavaş ısıtmaya yönelik tedbirler alınmalıdır (Dossett & Totten, 2014). Östenitlemede, yüksek ısıtma hızları ve kısa bekleme süreleri heterojen östenitin varlığına (örneğin, indüksiyonla sertleştirme gibi durumlarda meydana gelebilir) neden olabilir.

## 2.3. Soğuma hızının sertleşebilirlik üzerindeki etkisi

Östenitin soğuma hızı, çeliğin sertleşebilirliği ile doğrudan ilgili gibi görünmese de sertleşebilme kabiliyetinin östenitin martenzit oluşturabilme kabiliyetini tanımlayan bir kavram olması nedeniyle bu başlıkta ele alınmıştır. Östenit soğuma hızına bağlı olarak; perlit (yavaş soğuma), beynit (orta hızda soğuma), martenzit (hızlı soğuma) mikro yapılarına dönüşür. Östenit dönüşümünden kaynaklanan bu bileşenler, sürekli soğuma veya daha düşük bir sıcaklıkta hızlı soğuma ve izotermal dönüşüm ile oluşabilir. Çeliklerde soğuma hızına bağlı olarak görülen mikroyapılar çeliğin mekanik özelliklerini etkiler.

Sıcak çeliğin soğuma hızı; soğuma başlamadan önceki sıcak çeliğin ilk sıcaklığına, soğutulan parçanın boyutu, şekli, ve kesit boyutuna, hem soğutucu hem de çeliğin termofiziksel özelliklerine, özel ısı kapasitesi, termal difüzyon, ve termal iletkenlik dahil soğutucunun sıcaklığına bağlı viskozitesine ve soğutucu sıcaklığına bağlıdır. Russell, soğuma hızının nesnenin yüzeyi ile çevresi (soğutucu) arasındaki sıcaklık farkı ile orantılı olduğunu varsayan Newton'un soğuma yasasına dayanan sayısal bir soğutma süreci

yöntemi geliştirmiştir (denklem 5-6) (Russell, 1936; Tensi & Liščić, 1992).

$$dQ = \alpha A\,(T_S - T_M)\,dt \qquad (5)$$

Bu denklem silindir için şu şekilde ifade edilir:

$$dQ = \frac{\lambda}{r}\,A\,(T_C - T_S)dt \qquad (6)$$

*Denklemlerde:*

*Q: sıcak çelikten daha soğuk soğutucuya aktarılan ısı (J); a: arayüzey ısı transfer katsayısı (Wm² K); A: yüzey alanı (m²); $T_S$: çelik cismin yüzey sıcaklığı (K); $T_M$: soğutucunun sıcaklığı (K); $T_C$: silindirik cismin merkezindeki sıcaklık (K); r: silindirin yarıçapı (m); λ: çeliğin termal iletkenliği ($Wm^{-1}$ K); t: soğuma süresi (s)*

Östenitin dönüşüm süreci üzerinde sıcaklık ve zamanın etkisini gösteren dönüşüm diyagramları; TTT (zaman sıcaklık dönüşüm) ve CCT (sürekli soğumada dönüşüm) diyagramları, ısıl işlem süreçlerinin optimizasyonu ve çeliklerin özelliklerinin daha iyi kullanılması için çok önemli bir temel oluşturur.

TTT izotermal dönüşüm diyagramları, zamana bağlı olarak herhangi bir sıcaklıkta faz dönüşümünün başlaması ve bitmesi için gerekli süreyi tanımlar. Ötektoid üzeri sıcaklıktaki alaşımı belirli bir sıcaklığa hızla soğutma ve bu sıcaklıkta tutma işleminin zorluğu nedeniyle, izotermal işlemlerin pratik olarak kontrol edilmesi güçtür. Çoğu ısıl işlem süreci, numunelerin yüksek sıcaklıklardan oda sıcaklığına sürekli olarak soğutulmasıyla gerçekleştirilir ve bu nedenle CCT diyagramları pratikte daha büyük öneme sahiptir. CCT eğrileri reaksiyonun başlama ve bitişini gösteren eğrilerdir (Callister & Rethwisch, 2009). CCT diyagramları, genellikle fiziksel yöntemler kullanılarak çizilir ve en yaygın kullanılan yöntemlerden biri dilatometrik analizdir (Kawulok & ark., 2018). Diğer çizim olanakları; JMatPro, EWI, veya QTSteel yazılımı gibi bilgisayar programlarının kullanımını içermektedir (Trzaska & ark., 2009; Kawulok & ark., 2018).

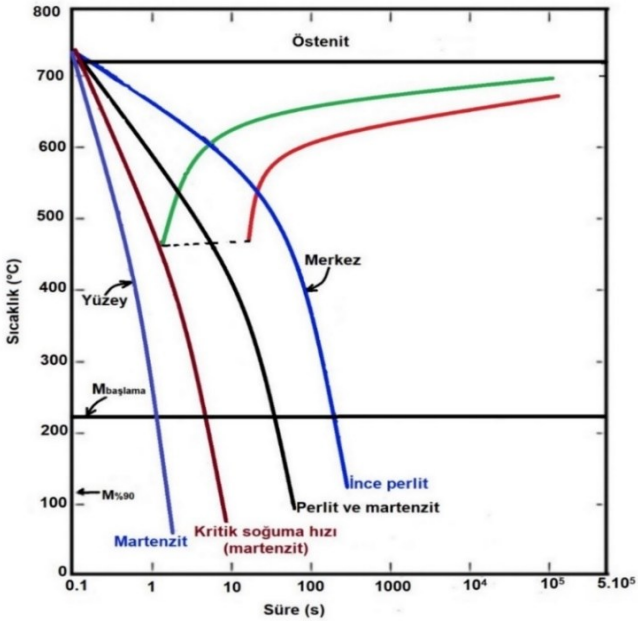
Sertleşebilirlik, martenzitik bir yapı elde etmek için gerekli kritik soğuma hızını belirlemede önemli bir rol oynar. Çeliğin kritik

soğuma hızı, yalnızca martenzitik dönüşümle sonuçlanan minimum soğuma hızı olup, sertleşebilirliği değerlendirmek için hayati bir kriterdir. Çeliğin element bileşimi ve su verme öncesi ısıl işlem geçmişi, kritik soğuma hızını önemli ölçüde etkiler ve su verme sırasındaki soğuma hızı sertleşebilirliğin tam olarak gerçekleşmesini belirler (Paczkowska & ark., 2018).

Ötektoid çelikten yapılmış silindirik bir çubuğun, yüzeyi ile merkezi arasındaki soğuma hızı farkının oluşan mikroyapılar üzerindeki etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Östenitlenmiş çelik hızla soğutulduğunda (su verme), farklı bir faz dönüşüm mekanizması meydana gelir. Östenitin (γ-Fe) hızla soğutulması sırasında, karbon atomlarının yayınması ve ferrit ile birlikte sementit oluşturması için yeterli zaman yoktur. γ-Fe kristal kafesinin, karbon atomlarının yer değiştirmesine meydan verilmeden dönüşmesi neticesinde martenzit fazı teşekkül eder. Şekil 4'ten de görüldüğü üzere, silindirik çubuğun merkezine doğru soğuma hızının azalmasıyla karbon yayınması için zaman sağlanır ve perlitik yapılar teşekkül eder.

Jominy (uçtan su verme) deney numunesinde, su verilen uçtan uzaklık ile sürekli soğumadaki dönüşüm arasında bir ilişki kurulabilir. Jominy deney numunesinin su verilen ucu en hızlı soğuduğu için, burada neredeyse %100 martenzit dönüşüm sağlanabilir. Su verilen uçtan uzaklaştıkça soğuma hızı azalır, bu da martenzit oranının azalmasına neden olur. Soğuma hızının azalmasıyla karbon yayınması için zaman sağlanır ve daha yumuşak olan perlitin meydana gelmesi için imkân tanınmış olur. Şekil 2'de verilen sertleşebilme eğrileri aynı zamanda soğuma hızının mikroyapı olumundaki etkisinin göstergesidir; soğuma hızı azaldıkça % martenzit oranının azaldığı görülmektedir.

Çeliğin bileşimine dayanarak, çeşitli mikroyapıları elde etmek için kritik soğuma hızını belirlemek amacıyla regresyon denklemleri (denklem 7-14) geliştirilmiştir (Maynier & ark., 1978; Blondeau &ark., 1975'e atfen Trzaska & ark., 2009).




*Şekil 4. Ötektoid çelikten yapılmış silindirik bir çubuğun, yüzeyi ile merkezi arasındaki soğuma hızı farkının oluşan mikroyapılar üzerindeki etkisi*
*Kaynak: Reed-Hill, 1966*

$$logV_M = 9.81 - (4.62 * C + 1.05 * Mn + 0.5 * Cr + 0.66 * Mo + 0.54 * Ni + 0.00183 * P_A) \quad (7)$$

$$logV_{M90} = 8.76 - (4.04 * C + 0.96 * Mn + 0.58 * Cr + 0.97 * Mo + 0.49 * Ni + 0.001 * P_A) \quad (8)$$

$$logV_{M50} = 8.50 - (4.13 * C + 0.86 * Mn + 0.41 * Cr + 0.94 * Mo + 0.57 * Ni + 0012 * P_A) \quad (9)$$

$$LogV_B = 10.17 - (3.8 * C + 1.07 * Mn + 0.57 * Cr + 1.58 * Mo + 0.7 * Ni + 0.0032 * P_A) \quad (10)$$

$$logV_{B50} = 8.74 - (2.23 * C + 0.86 * Mn + 0.59 * Cr + 1.60 * Mo + 0.56 * Ni + 0.0032 * P_A) \quad (11)$$

$$logV_{B90} = 10.55 - (3.65 * C + 1.08 * Mn + 0.61 * Cr + 1.49 * Mo + 0.77 * Ni + 0.0032 * P_A) \quad (12)$$

$$logV_{FP} = 6.36 - (0.43 * C + 0.49 * Mn + 0.26 * Cr + 0.38 * Mo + 2.Mo^{0.5} + 0.78 * Ni + 0.0019P_A) \quad (13)$$

$$logV_{FP90} = 7.51 - (1.38 * C + 0.35 * Mn + 0.11 * Cr + 2.31 * Mo + 0.93 * Ni + 0.0033 * P_A) \quad (14)$$

*Denklemlerde:*

*C, Mn, Cr, Ni, Mo – alaşım elementlerinin kütle konsantrasyonu; V (°C/h) – 700°C'deki kritik soğuma hızları şu şekilde ifade edilir:* $V_M$ *– martenzit için;* $V_{M90}$ *– %90 martenzit ve %10 diğer bileşenler;* $V_{M50}$ *– %50 martenzit ve %50 diğer bileşenler;* $V_B$ *– beynit için;* $V_{B90}$ *– %90 beynit ve %10 diğer bileşenler;* $V_{B50}$ *– %50 beynit ve %50 diğer bileşenler;* $V_{FP}$ *– ferrit-perlit için;* $V_{FP90}$ *– %90 ferrit-perlit ve %10 beynit; PA, °C/h cinsinden bir östenitleştirme parametresidir.*

Östenit fazındaki çeliğe su verilmesinde kullanılan ortam soğuma hızını doğrudan etkiler. Tuzlu su ve su gibi sıvılar, hava ve yağa göre çok daha yüksek soğutma hızı kapasitesine sahiptir. Ayrıca, sıvı çalkalandığında soğutma hızı kapasitesi oldukça önemli ölçüde artar. Su vermede soğutma ortamının seçimi; çelik bileşimine, parçanın tasarımına, çeliğin sertleşebilirliği, ve bitmiş parçada istenen sertliğe göre değişir. Su, en sık kullanılan soğutma ortamıdır. Tuz çözeltileri (tuzlu su) sıklıkla başarılı bir şekilde kullanılır, ancak demir veya çelik parçalar veya ekipmanlar üzerindeki aşındırıcı etkileri potansiyel olarak ciddi olabilir. Görece daha yavaş soğutma ortamı olarak yağlar kullanılır (Dossett & Totten, 2013).

Genel olarak, soğutma ortamının şiddeti arttıkça ve su verilen parçanın simetrisi azaldıkça, su verme işleminden kaynaklanan boyut ve şekil değişiklikleri ile su verme çatlağı riski artar. Uygun soğutma ortamının seçilmesi ve parça özelliklerine göre optimizasyon yapılması önemlidir. Soğutma ortamı, soğutma hızını ve sonrasındaki mikroyapı oluşumunu kontrol ederek çeliğin sertleşebilirliğini etkiler. Su verilen parçanın geometrisi de soğuma hızını etkiler. Çap/kalınlık arttıkça; aynı su verme koşulları altında, çeliğin merkezindeki soğuma hızı azalır ve sonuçta perlit içeren

yumuşak bir çekirdek oluşur ve bunun bir sonucu olarak çekirdekteki sertlik azalır.

## 3. Sertleşebilirliği ölçme yöntemleri

Düşük ve orta karbonlu çeliklerde, sertleşebilirliği ölçmede en yaygın kabul gören kriterlerden biri, su verme işlemi sonrasında %50 martenzit yapının oluştuğu çaptır. Grossmann, sertleşebilirliği ideal kritik çap ($D_I$) cinsinden ifade etmiştir. İdeal bir ortamda (yani, çubuğun yüzey sıcaklığını anında ortam sıcaklığına düşürebilecek bir ortamda) su verildiğinde, %50 martenzit yapının bulunduğu çap ideal kritik çap olarak adlandırılır (Grossmann, 1942). İdeal kritik çap; çeliğin karbon içeriğine, östenit tane boyutuna, ve çelikte bulunan yaygın alaşım elementleri için çarpan faktörlerine ($F_X$) dayalı temel sertleşebilirliktir (denklem 15). $D_{IC}$: belirli bir karbon içeriğine karşılık gelen ideal kritik çap olup östenit tane boyutuna bağlı olarak belirlenir. Çeliğe alaşım elementleri eklendiğinde, sertleşebilirlik düzeyi ve buna bağlı olarak ideal kritik çap değişir.

$$D_I = D_{IC} + F_{Mn} + F_{Si} + F_{Cr} + F_{Mo} + F_V + F_{Cu} + F_{Ni} + F_X \qquad (15)$$

Grossmann yöntemi, sertleşebilirliğin ideal kritik çap cinsinden kantitatif ölçümünde oldukça faydalı olup, sertleşebilirlik kavramını açıklamada ve tekrarlanabilirlikte oldukça kullanışlıdır. Ancak bu yöntem, çelikten yapılmış bir dizi yuvarlak çubuğun su verilmesi, kesitlere ayrılması ve test edilmesi gerektiğinden oldukça zaman alıcı, karmaşık ve pahalıdır (Dossett & Totten, 2013). Bununla beraber, Umemoto & ark. (1981)'e göre bu yöntemde hesaplama hatası büyüktü ve yalnızca orta ve düşük sertleşebilirlikli çelikler için uygundu, bu da pratikte uygulanmasını engelledi (Geng, & ark., 2022a).

Yüksek karbonlu (karbürlenmiş) çeliklerin sertleşebilirliğinin hesaplanmasında; $D_I$ değerinin ideal bir ortamda su verildiğinde, merkezinde %90 martenzit elde edilecek çubuğun çapına eşit olduğu kabul edilir (Grange, 1973). Bu nedenle, farklı $D_I$ kriterleri bazen $D_I$-%50 veya $D_I$-%90 olarak not edilir.

Jominy (uçtan su verme) testleri, karbon ve alaşım çeliklerinin sertleşebilirliğini değerlendirmede basit, genel olarak kabul edilen ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Jominy testi, EN ISO 642: 1999, ASTM A255, ve JIS G 0561 gibi birçok standardın bir parçasıdır. Bu test, imalatçılar ve tasarımcılara çok faydalı bilgiler sağlar. Bu deneyde, standart boyutta yuvarlak bir metal çubuk, %100 östenite dönüşene kadar bir fırında ısıtılır ve ardından hızla oda sıcaklığındaki su ile bir ucundan su verildiği Jominy su verme tankına aktarılır. Soğuma hızının, su verilen uçta en yüksek olması ve oda sıcaklığındaki havaya maruz kalan uçlara doğru mesafe arttıkça azalması beklenir. Sertleşebilirlik, çubuk boyunca 1.6 mm (1/16 inç) adımlarla sertlik ölçülerek belirlenir ve su verilen uçtan ne kadar uzaklaşıldıkça sertliğin arttığı gözlemlenirse, çalışılan alaşımın sertleşebilirliğinin o kadar yüksek olduğu söylenir. Sertlik ve mesafe (su verilen uçtan uzaklık) eğrisi üzerindeki kritik nokta, genellikle %50 martenzit ile ilişkilidir ve çeliklerin sertleşebilirliğini ölçmek için kullanılır. Bu mesafe kritik Jominy mesafesidir.

Hem Jominy testinden elde edilen Jominy mesafesi (J) hem de Grossmann yöntemiyle belirlenen ideal kritik çap ($D_I$) çeliğin sertleşebilirliğinin bir ölçüsüdür. J ile $D_I$ arasında bir korelasyon kurulabilir; bu korelasyon, sertlik ve soğuma hızı arasındaki temel ilişkiye dayanır.

Çelik üreticisinin, müşterinin belirttiği tam kompozisyona sahip bir çelik üretemeyeceği iyi bilinmektedir. Çelik üreticisi, müşterinin belirlediği aralık içerisinde bir kompozisyona sahip bir çelik üretebilir. Verilen çelik için bu kompozisyon aralığı, iki Jominy sertleşebilirlik eğrisi oluşturur; çelik bileşimindeki elementlerin üst sınırıyla elde edilen en yüksek ve çelik bileşimindeki elementlerin alt sınırıyla elde edilen en düşük sertlik sınırlarını gösteren sertleşebilme bandı oluşturulur.

## 4. Sertleşebilirliği modelleme yaklaşımları ve optimizasyonu

Çeliklerde sertleşebilirliği tahmin etmek oldukça karmaşık bir süreçtir. Isıl işlemlerin sayısal modellemesi, faz dönüşümleri, ısı

transferi ve malzeme mekaniği gibi çok ölçekli süreçlerin ve sayısal yöntemlerin araştırılmasını içerir.

Çeliğin sertleşebilirliği genellikle bir sertleşebilirlik eğrisi olarak ifade edilir. Deneyler yoluyla sertleşebilirlik eğrilerini elde etmek oldukça zahmetli ve maliyetlidir. Bu nedenle, hesaplama yöntemlerine sıklıkla başvurulduğu görülmektedir. Sertleşebilirlik eğrilerini hesaplamak için deneysel verilere dayalı ampirik formüller ve faz geçiş dinamiklerine dayalı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Son yıllarda, çeliklerin sertleşebilirlik eğrilerini tahmin etmek için makine öğrenimi modelleri kullanılmaktadır. Bilgisayar teknolojisi, veri toplama sistemleri ve yazılımlar alanındaki gelişmeler, sertleşebilirliği tahmin ve hesaplamayı büyük ölçüde kolaylaştırmakta ve güvenilirliğini arttırmaktadır.

Dossett & Totten (2013) göre, hesaplamalı sertleşebilirliğin bir avantajı, sınırlı miktardaki deneysel veri (Jominy testi, tane boyutu ve kimyasal bileşim verilerine dayalı olarak) kullanılarak, çeşitli çeliklerin sertleşebilirlik davranışını tahmin edebilme yeteneğidir. Hesaplamalı sertleşebilirliğin pratik bir avantajı ise, belirli müşteri taleplerine uygun, istenen sertlik profillerine sahip bir ısıl işlem sürecinin özelleştirilme potansiyelidir.

Siebert & ark. (1977), Jominy çubuğunun çeşitli noktalarındaki soğuma hızlarını belirleyerek CCT eğrileri ile ilişkilendirdiler. Kritik soğuma hızı, sertliğin düşmeye başladığı nokta olarak kabul edildi. Her bir soğuma hızına karşılık gelen perlit hacim fraksiyonu, martenzit yüzdesine ve ardından karşılık gelen sertliğe dönüştürüldü. SAE 4068 çeliği için yapılan çalışmada deneysel sonuçların tahmin edilen sonuçlarla çok iyi uyumlu olduğu bildirilmektedir.

Just (1969), deneysel verilere dayalı olarak uçtan su verme eğrisini hesaplamak için regresyon denklemleri kurmuştur. Ancak, Geng & ark. (2022a) ye göre, bu yöntemlerin evrenselliği, doğruluğu ve rasyonelliği büyük ölçüde sınırlıdır. Bunun başlıca nedeni, lineer matematiksel modelin, eğrinin gerçek şekli ve değişim eğilimine uyum sağlayamamasıdır.

Kirkaldy & ark. (1983) ile Honeycombe & ark. (1980), faz dönüşüm kinetiği ve termodinamiği temelinde, Jominy çelik çubukların sürekli soğuma dönüşüm diyagramı aracılığıyla sertleşebilirliğini hesaplamış ve bu yöntem JMatPro ticari yazılımına entegre edilmiştir. Kirkaldy & ark. faz dönüşüm reaksiyon hızının bükülme noktasının TTT diyagramındaki ile aynı ve CCT diyagramı ile orantılı olduğuna inanmıştır.

Gao & ark. (2010), dişli çeliklerinde sertleşebilirliği tahmin etmek için polinom regresyonu ve yapay sinir ağlarını kullanmıştır. Yapay sinir ağları tahmin değerlerinin gerçek verilerle iyi bir şekilde örtüştüğü rapor edilmektedir.

Dong & ark. (2020), yapay sinir ağı, rastgele orman gibi altı makine öğrenimi yöntemi kullanarak aşınmaya dayanıklı çelikler için bir kimyasal bileşim-sertleşebilirlik modeli oluşturdukları çalışmalarında; yapay sinir ağı yönteminin altı makine öğrenimi arasında en yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Lu & ark. (2020), çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağlarını (MLFFNN) termodinamik bilgi ile birleştirerek, çeliğin martenzit başlangıç sıcaklığı için bir tahmin modeli oluşturmuştur. MLFFNN tahminleri ile JmatPro hesaplamaları karşılaştırıldığında; özellikle yüksek oranlarda güçlü karbür oluşturan elementler içeren alt grupta, MLFFNN'nin tahmin doğruluğundaki üstünlüğü görülmektedir. Ayrıca, MLFFNN'nin performansının; ısıya dayanıklı çelikler, sıcak iş takım çelikleri ve yüksek hız çelikleri gibi belirli çelik sınıflarındaki veri setlerinin genişletilmesiyle daha da iyileştirilebileceği rapor edilmektedir.

Geng & ark. (2022b), bor çeliğinin sertleşebilirlik eğrisini tahmin etmek için, kimyasal bileşim ve Jominy test numunesi boyunca mesafe gibi ilgili malzeme tanımlayıcılarını kullanarak yeni bir veri odaklı makine öğrenimi (ML) modeli oluşturmuştur. Farklı makine öğrenimi yöntemlerinin eğitim ve test setlerindeki tahmin sonuçları değerlendirilerek karşılaştırıldığında; yüksek korelasyon katsayısı ve düşük hata ile en uygun modelin rastgele orman modeli

olduğu saptanmıştır. Bu modelin, sertleşebilirlik eğrisini tahmin doğruluğu ve değişim trendi açısından JMatPro ve ampirik formülden daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Makine öğreniminin, bor çeliğinin sertleşebilirlik eğrisini doğru ve verimli bir şekilde tahmin edebileceği ve ileri bir bor çelik tasarımı ve ısıl işlem sürecine rehberlik edebileceği düşünülmektedir.

Geng & ark. (2022a), kimyasal bileşime dayalı olarak bor içermeyen çeliklerin sertleşebilirlik eğrilerini tahmin etmek için, k-en yakın komşu ve rastgele ormanı içeren bir kombine makine öğrenimi (CML) modeli oluşturmuştur. CML modelinin, JMatPro ve ideal kritik çap yöntemi ile değiştirilmiş doğrusal olmayan denklem dahil olmak üzere ampirik formüllerden daha iyi performans gösterdiği rapor edilmektedir.

Tomaši´c & ark. (2024), Jominy eğrisi ile kimyasal bileşim arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapay sinir ağlarını kullanmıştır. Tomaši´c & ark. oluşturulan yapay sinir ağı modellerinin, çeliğin kimyasal bileşiminin tasarımı için kabul edilebilir sonuçlar verdiğini; yedi kimyasal elementin tamamı için tahmin edilen değerlerin, deneysel değerlere yakın ve çelik sınıfları tarafından tanımlanan sınırlar içerisinde olduğunu bildirmektedir. Herhangi bir yapay sinir ağı tasarlamak için; nispeten çok sayıda deneysel veriye ihtiyaç olduğu, özellikle nikel ve molibden çelikleri için sinir ağlarını öğrenmek ve test etmek için kullanılan ek deneysel verilerle, önerilen modellerin daha da geliştirilebilir olduğu vurgulanmaktadır.

Gemechu & ark. (2024), sertleşebilirliği tahmin etmede regresyon sinir ağı (fitrnet) modellerini araştırdıkları çalışmalarında; yaklaşık 40 çelik kalitesi için farklı veri setleriyle eğitilen modelin, sertleşebilirlik eğrilerini tahmin etmeyi mümkün kıldığını, ancak eğitim veri setinin kapsamı ile sınırlı kaldığını bildirmektedir. Çalışma, belirli bir çelik kalitesi için sertleşebilirlik bandını belirlemede geliştirilen modelin, ısıl işlem sonuçlarını tahmin etme ve optimize etmedeki etkinliğini göstermektedir.

Çeliğin kimyasal bileşiminin optimize edilmesi yoluyla, maliyet ve gereken sertleşebilirlik arasındaki denge sağlanabilir.

Makine parçaları veya aletler için gerekli olan sertleşebilirliği bilmek, optimal kimyasal bileşime sahip bir çeliğin tasarlanmasını sağlar. Öte yandan, aşırı sertleşebilirlik fazla alaşım elementlerinin kullanımını gösterir ve bu da maliyeti artırır (Tomaši´c & ark., 2024).

İhtiyaç duyulan sertleşebilirliğe sahip çelik tasarımı modeli, makine mühendisliği ve imalat sanayisinde büyük fayda sağlayabilir. Veri odaklı makine öğrenimi tekniklerinin çeliklerin tasarımında kullanılması, geleneksel deneysel süreçlerde karşılaşılan zaman alıcı ve yüksek maliyetin azaltılmasına imkân sağlar.

**Sonuç**

Çeliğin sertleştirilmesi ve sertleşme derinliği, malzeme ve proses tasarımı açısından kritik bir öneme sahiptir. Sertleşebilirlik, çeliğin sertleşme yeteneğini tanımlayan bir kavram olup, çeliğin bileşimi (karbon içeriği ve diğer alaşım elementlerinin varlığı) ve östenit tane boyutu ile ilişkilidir.

Ötektoid altı çeliklerde, karbon içeriğindeki artış kritik soğuma sıcaklığını düşürerek sertleşebilirliği artırır. Buna karşılık, ötektoid üstü çeliklerde, karbon içeriğindeki artış daha yüksek bir kritik soğuma sıcaklığına dolayısıyla azalan sertleşebilirliğe neden olur. Düşük alaşımlı çeliklerin bileşiminde bulunan krom, molibden ve nikel gibi elementler, kritik soğuma hızını düşürerek martenzit oluşumunu arttırır ve sertleşme derinliğinin artmasına katkı sağlar.

Yüksek östenitleme sıcaklıkları; östenit tane boyutunu artırarak, bileşimi homojenleştirerek, karbürlerin ayrışmasını ve östenit içinde çözünmesini kolaylaştırarak sertleşebilirliği arttırır. Kaba/iri östenit taneleri sertleşebilirliği artırır, ancak diğer yandan kaba tanelerin mukavemeti ve tokluğu olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle, pratikte çeliklere sertleşebilirlik kazandırmak için genellikle alaşımlama tercih edilir.

Sertleşebilirliğin tahmininde yapay zekâ kullanımı; çok sayıda ve değişken parametreler arasındaki ilişkilerin/nedenselliğin belirlenmesine olanak tanıyarak, verimli ve makul bir maliyetle sertleşebilirliğin tahminine imkân sağlayabilir.

**Kaynaklar**

Alogab, K.A., Matlock, D.K., Speer, J.G. & Kleebe, H.J. (2007). The influence of niobium microalloying on austenite grain coarsening behavior of Ti-modified SAE 8620 steel. ISIJ Int. 47, 307–316.

Andrews, K. W. (1965). Empirical Formula for the calculation of some transformation temperatures investigation on the morphology of martensite in carbon steels. J. Iron Steel Inst. 203, 721 p.

Bain, E. C. (1932). Factors affecting the inherent hardenability of steel. Trans. Am. Soc. Steel Treat. 20, 385–428.

Bhargava, A.K & Banerjee, M.K. (2017). Hardenability of steel. Comprehensive Materials Finishing, 2, 50-70.

Burrier, H. (1990). Hardenability of Carbon and Low-Alloy Steels, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Vol 1, ASM Handbook, ASM International, p 464–484.

Callister, W.D., Rethwisch, D.G., (2009). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.

Canale, LCF., Albano, L., Totten, G.E & Meekisho, L. (2014). Hardenability of Steel. Comprehensive Materials Processing. Elsevier, Pages 39-97.

Chen, T.Y., He, L.F., Cullison, M.H., Hay, C., Burns, J., Wu, Y., Tan, L. (2020). The correlation between microstructure and nanoindentation property of neutron-irradiated austenitic alloy D9. Acta Mater., 195, 433.

Cryderman, R. & Ballard, T. (2018). Short time austenitizing effects on the hardenability of 0.55 wt. pct. carbon steels. Metall. Res. Technol. 115, 4.

Denand, B., Esin, V.A., Dehmas, M., Geandier, G., Denis, S., Sourmail, T., Aeby-Gautier, E. (2020). Carbon content evolution in austenite during austenitization studied by in situ synchrotron X-ray diffraction of a hypoeutectoid steel. Materialia, 10, pp.100664.

Dong, G., Li, X., Zhao, J., Su, S., Misra, R., Xiao, R., Shang, C. (2020). Machine learning guided methods in building chemical composition hardenability model for wear-resistant steel. Mater. Today Commun. 24, 101332.

Dossett, J. L& Totten, G.E. (2014). Heat Treating of Iron and Steels. ASM International, Materials Park, OH, USA.

Dossett, J.L. & Totten, G.E. (2013). Steel heat treating fundamentals and processes, ASM International, Materials Park, OH, USA.

Gao, X.H., Deng, T.Y., Wang, H.R., Qiu, C.L., Qi, K.M., Zhou, P. (2010). Prediction of hardenability of gear steel using stepwise polynomial regression and artificial neural network. Adv. Mater. Res. 118–120, 332–335.

Gemechu, W. F., Sitek, W., & Batalha, G. F. (2024). Improving hardenability modeling: a Bayesian optimization approach to tuning hyperparameters for neural network regression. Appl. Sci. 14(6), 2554.

Geng, X., Wang, S., Ullah, A., Wu, G., & Wang, H. (2022a). Prediction of hardenability curves for non-boron steels via a combined machine learning model. Materials, 15(9), 3127.

Geng, X.X., Cheng, Z., Wang, S.Z., Peng, C., Ullah, A., Wang, H., Wu, G. (2022b). A data-driven machine learning approach to predict the hardenability curve of boron steels and assist alloy design. J. Mater. Sci. 57, 23, p. 10755.

Gladman, T. (1997). The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Materials.

Grange, R. A. (1973). Estimating the hardenability of carbon steels. Metall. Trans. Oct 1973, 4, 2231–2244.

Grossmann, M. A. (1942). Hardenability calculated from chemical composition. AIME Trans. 150, 227–259.

Guo, Z., Sha, W. & Vaumousse, D. (2003) Microstructural evolution in a PH13-8 stainless steel after ageing. Acta Mater. 51, 1, p. 101.

Honeycombe, R.W.K. (1980). Steels: Microstructure and Properties; Edward Arnmold: London, UK.

Hougardy, H. P. (1984). WerkstoffkundeStahl. Grundlagen Springer. VerlagStahleisen, Düsseldorf, 1, 229.

Just, E. (1969). New formulas for calculating hardenability curves. Met. Prog. 96, 87–88.

Kawulok, P., Schindler, I., Mizera, J., Kawulok, R., Rusz, S., Opěla, P., Olszar, M., Čmiel, K.M. (2018). The influence of a

cooling rate on the evolution of microstructure and hardness of the steel 27MnCrB5. Arch. Metall. Mater. 63, 2, 907-914

Kirkaldy, J.S.; Venugopolan, D. (1983). Phase Transformations in Ferrous Alloys; AIME: Englewood, CO, USA.

Krauss, G. 81990) Steels: Heat Treatment and Processing Principles, ASM International.

Li, M. V., Nieuhr, D. V., Meekisho, L. L., Atteridge, D. G. A. (1998). Computational model for the prediction of steel hardenability. Metall. Mater. Trans. 29B, 627.

Lu, Q., Liu, S., Li, W. & Jin, X. (2020). Combination of thermodynamic knowledge and multilayer feedforward neural networks for accurate prediction of MS temperature in steels. Mater. Des.192, p 108696.

Maity, J., & Sharma, A. (2022). A novel analytical approach to ascertain hardenability of plain carbon steel. Phil. Mag. 103(5), 407–434.

Maynier, P., Dollet, J., Bastien, P (1978). Prediction of microstructure via empirical formulae based on CCT diagrams, hardenability concepts with applications to Steel. The Metallurgical Society of AIME, 163-178.

Mun, D. J., Shin. E. J., Choi. Y. W., Lee. J. S., Koo, Y. M. (2012). Effects of cooling rate, austenitizing temperature and austenite deformation on the transformation behavior of high-strength boron steel. Mater. Sci. Eng. A. 545, 214–224.

Paczkowska, M., Makuch, N., Kulka M. (2018). The influence of various cooling rates during laser alloying on nodular iron surface layer. Opt. Laser Technol.102, 60-67.

Reed-Hill, R. E. (1966). Physical Metallurgy Principles; D. Van Nostrand Co., Inc: NewYork, NY.

Russell, T. F. (1936). Some mathematical considerations on the heating and cooling of steel. Special Report No. 14; Iron and Steel Institute, 149–187.

Siebert, C.A., Doane, D.V. & Breen, D.H. (1977). Recent Contributions to Hardenability Predictions, The Hardenability of Steels—Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications, American Society for Metals.

Tensi, H.M., Liščić, B. (1992). Determination of Quenching Power of Various Fluids. In: Liščić, B., Tensi, H.M., Luty, W. (eds) Theory and Technology of Quenching. Springer, Berlin, Heidelberg.

Tomaši´c, N., Sitek, W., Iljki´c, D., Gemechu, W.F. (2024). Designing the chemical composition of steel with required hardenability using computational methods. Metals.14, 1076.

Trzaska, J &., Dobrzański, L.A. (2007). Prediction of Ac3 and martensite start temperatures by a data-driven model selection approach. J. Mater. Process. Technol. 192, 504.

Trzaska, J., Jagiello, A., Dobrzański, L.A. (2009). The calculation of CCT diagrams for engineering steels. Arch. Mater. Sci. Eng. 29 (1), 13-20.

Umemoto, M., Nishioka, N., Tamura, I. (1981). Prediction of hardenability from isothermal transformation diagrams. J. Heat Treat. 2, 130–138.

Zeng, Q.Y. & Xu, K.Y. (1988). Predicting the hardenability of steel using the critical cooling rate. Mémoires et Études Scientifiques Revue de Métallurgie, 105-110.

Zheng, Y., Wang, F., Li, C., He, Y. (2017). Dissolution and precipitation behaviors of boron bearing phase and their effects on hardenability and toughness of 25CrMoNbB steel. Mater. Sci. Eng. A. 701, 45-55.

# BÖLÜM VI

# Boronizing Techniques for Surface Hardening and Wear Resistance

**Mete Han BOZTEPE[1]**

## Introduction

Boron and its compounds have diverse applications in daily life, ranging from kitchen tools and cleaning products to the pharmaceutical sector. They are widely utilized in glass production, insulation, fireproof materials, detergents, automotive and aerospace, agriculture, metallurgy, nuclear applications, construction, and textiles. However, their most significant usage is in the metal industry, where boron is a deoxidizer and gas remover in reactions. Boron is also employed in specialized applications such as alloy production, semiconductor manufacturing, and as a catalyst. It strengthens metals, ceramics, and composites and is crucial in constructing nuclear reactors. In this context, boron is added to high-

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şırnak/Türkiye Orcid: 0000-0001-8418-1352, metehanboztepe@sirnak.edu.tr

density concrete and used as a neutron-absorbing control material in uranium-graphite batteries. Numerous boron compounds are manufactured for use across various sectors. Boronizing, a thermochemical surface hardening process, can be applied to both ferrous and non-ferrous materials, as well as powder metallurgy products. During the process, the interaction between iron and boron atoms under heat forms iron borides (FeB and Fe2B) on the material's surface, enhancing its wear resistance and durability (Boztepe, 2014)

The coating on metal material is a method of improving its properties such as wear, corrosion, and fatigue. There are various coating techniques used in industrial applications. One of these techniques is the boronizing method. With the boronizing method, boron atoms penetrate the metal by diffusion. This method is a thermochemical surface treatment. In this way, a hard boride layer is formed on the surface of the metal. In addition to wear resistance, properties such as high mechanical strength, corrosion resistance in acids, and high oxidation resistance are improved. This technique can be applied to many metals. These include carbon steels, low alloy steels, tool steel, stainless steel, nickel-based alloys, and transition metals (Vangaveti, 2005).

The most commonly used techniques in the boronizing method are Solid-state, Case Depth, Paste, Liquid Boronizing, Gas, Plasma, Multi-Component, Fluidized Bed boronizing and some of them are explained below.

**Solid-State Boronizing**

One of the boronizing techniques is solid-state. This method is easier and more economical than other methods. In addition, other methods require complex equipment and it isn't easy to borid these parts. The solid-state boronizing technique can be applied to materials with complex geometries without requiring complex equipment. Thus, it is one of the best methods to eliminate the disadvantages of other methods. Solid-state boronizing is performed by surrounding the material with boron-doped powder. During this process, heat is given from outside. This process is a thermal diffusion process. During this process, boron atoms diffuse into the material under the influence of temperature (Kara et al., 2017).

In the solid-state boronizing technique, the sample is heated in a furnace to the boronizing temperature. This furnace is carried out in a controlled atmosphere using inert or vacuum or both to prevent oxidation at high temperatures. This boronizing technique is safer than others. It can be performed even with limited equipment and is therefore economical. In addition, different parameters can be obtained by changing the chemical ratio of the powder component. The solid boron-producing component can be boron carbide, iron boron or amorphous boron etc. The activator usually activates boron atoms at high temperatures and allows them to diffuse into the metal. The most commonly used activators are $NaBF_4$, $KBF_4$, $(NH_4)BF_4$, $NH_4Cl$, $Na_2CO_3$ and $BaF_2$. Silicon carbide and alumina are often used to prevent the powder from clumping during boronizing. If the boronizing process is to be repeated, 20-50% of the new powder can be mixed into the existing powder mixture and used 5-6 more times

(Vangaveti, 2005). Figure 1 shows a typical electric furnace used in pack boronizing (Łukaszewicz et al., 2023).

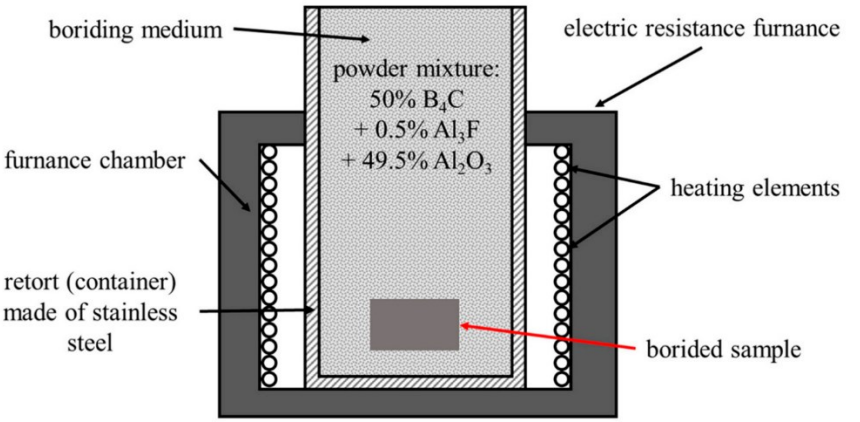



*Figure 1. A typical electric furnace used in pack boronizing*

Boronizing is a thermochemical surface hardening process designed to enhance wear, oxidation, and corrosion resistance in engineering components. It can be applied to a wide range of materials, including ferrous metals, non-ferrous metals, and superalloys, typically at temperatures between 840-1050°C. During boronizing, boron atoms diffuse into the substrate, forming iron borides such as FeB and $Fe_2B$. The thickness of the boride layer depends on the temperature and duration of the process. While $Fe_2B$ provides tribological advantages due to its gradually declining hardness profile and lower brittleness, the FeB layer, though harder, is brittle and prone to cracking and spalling under stress. Consequently, a single-phase $Fe_2B$ layer is often preferred over a dual-phase FeB-$Fe_2B$ layer for better mechanical and tribological performance (Ipek et al., 2012). The temperature and time-

dependent FeB/Fe2B morphological structures are given in the SEM image in Figure 2.

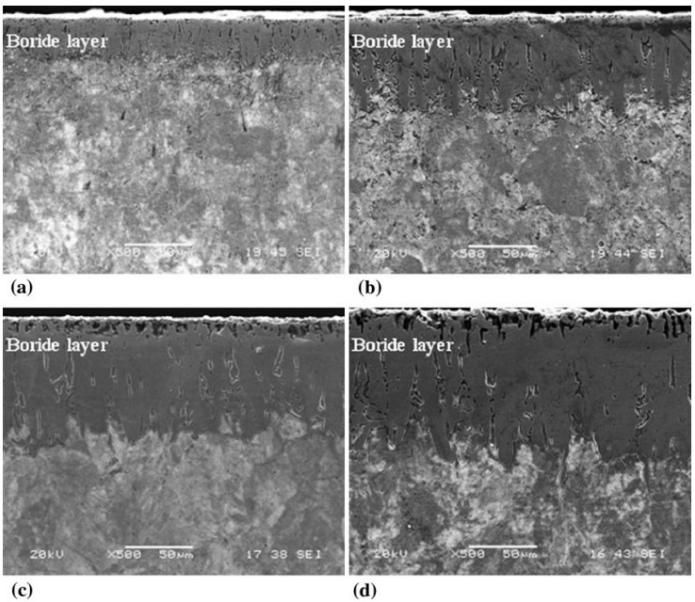



*Figure 2. SEM images of borinized steel at 850 C for (a) 2 h, (b) 8 h and at 950 C for (c) 2 h, (d) 8 h (Ipek et al., 2012)*

A group of researchers boronized SAE 1020 steel at 850 °C for 4 hours using the solid-state technique. They used H3BO3 or Na2B8O13 as boron source, $KBF_4$ or $NaBF_4$ as activator, and SiC as diluent. They measured microhardness values from three different places on the sample. They determined the average of the measured hardness value as 1475 HV (Türkmen & Yalamaç, 2022). Similar researchers used SAE 1020 steel in another study. In this study, they used boric acid as boron and carried out the boronizing processes at temperatures of 850, 900, and 950 °C for 4, 8, and 12 hours. As a result of the test, they obtained a boride layer consisting of only $Fe_2B$

phase on the surface of the samples and having a sawtooth morphology. They stated that the average microhardness values were between 1200 and 2000 $HV_{0.1}$ (Türkmen et al., 2019).

The researchers produced samples from pre-alloyed NiTi powders by powder metallurgy method. The powder metallurgy process was carried out at 300 °C and 700 Mpa pressure. Then, to sinter the samples, they kept them in a high purity Argon atmosphere at 1200 °C for 2 hours. Finally, they boronized the samples at 1000 °C for 6 and 12 hours. When they examined the surface hardness and layer thickness of the obtained samples, they obtained the highest hardness from the sample boronized at 1000 °C for 12 hours. The obtained surface hardness result was 2074.9 HV and the layer thickness was 50 µm (Kaplan et al., 2021).

Researchers who subjected AISI 1045 steel to boronizing process to increase the surface hardness, performed boronizing in liquid and solid environments for this purpose. They reported that the surface hardness and layer thickness changed according to the boron chemical composition used. For the hardest and thickest boron layer of AISI 1045 steel, they determined the composition of 70% Borax (Na2B4O7) in a liquid medium. They also determined the most suitable combination as 5% B4C + 90% SiC + 5% KBF4 for solid medium boronizing (Kul et al., 2020).

With the solid-state boronizing technique, a boron layer is formed on the surface of metals such as titanium and steel, where high surface hardness is required, and wear resistance is provided. Structures with these features are often preferred in industrial applications (Sarma et al., 2012) (Boztepe & Bayramoglu, 2016).

Boronizing of titanium alloys such as Ti6Al4V and Ti-45Nb creates TiB2 and TiB layers on the surface that provide wear resistance (Bin, 2006; Kara & Purcek, 2018). Figure 3 shows SEM micrographs of CP-Ti samples boronized at 950 °C for 3 and 24 hours. TiB and TiB2 structures formed in the samples were observed

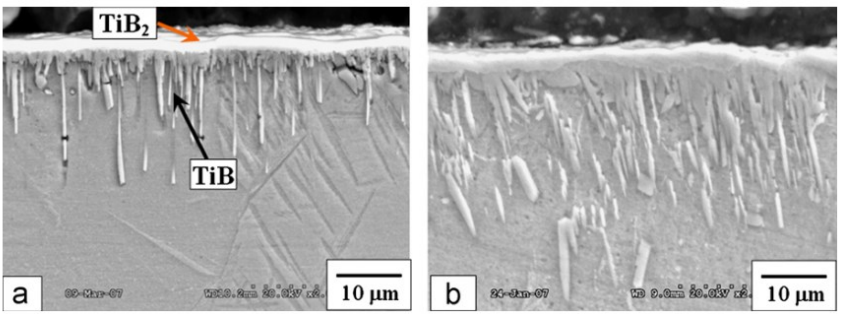



*Figure 3. SEM micrographs of boronized CP-Ti at 950 °C for (a) 3 h, and (b) 24 h.*

**Gas Boronizing**

Gas boronizing is another type of boronizing in which the boron source is in the gas phase. In this technique, boronizing is done at high temperature and a hard boron layer is formed by the spreading of boron gas on the metal surface. Boron sources generally used in gas boronizing are boron chloride ($BCl_3$) and diborane ($B_2H_6$). This technique is not a widely used method due to toxicity release problems. This toxicity and the explosion risks of the gas are the problems that limit this method. $BCl_3$-$H_2$ gas mixture has been tried to boronize steel before, but high $BCl_3$ concentration causes corrosion of the substrate and results in weak adhesive layers. For this purpose, $BCl_3$-$H_2$ gas mixture, which is a diluted solution at 1:15 ratio, is preferred at 700-900 °C and approximately 67 kPa pressure.

This method can be used for titanium and its alloys (Vangaveti, 2005).

The gas boronizing technique is similar to nitriding or carburizing methods and the process is thermochemical. Diborane and boron halides are not used commercially due to their toxicity and corrosion. As alternatives, organic boron precursors trimethyl borate, triethyl borane, borane triethylamine complex have been tested for gas boronizing and plasma boronizing, respectively. The process is usually carried out at low pressures (100-10,000 Pa) and high temperatures (700-850°C). Parameters such as boronizing time, total pressure, precursor gas flow rate and hydrogen flow rate affect the thickness and properties of the boride layer formed. A schematic view of the gas boronizing process is shown in Figure 4 (Küper et al., 2000).

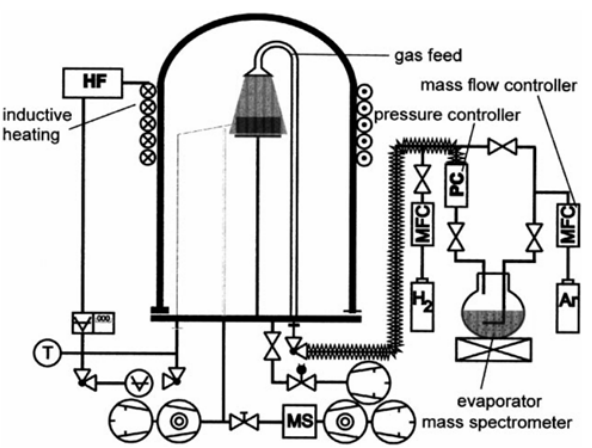



*Figure 4. A schematic view of the gas boronizing process*

**Fluidized Bed Boronizing**

The thermal treatment of alloys within a fluidized bed reactor has been conducted for a duration exceeding twenty-five years. Recently, this methodology has undergone significant advancements for the purpose of boronizing. The boronizing process is executed in an environment devoid of oxygen, utilizing coarse-grained silicon carbide as the bed medium. This approach facilitates accelerated heating rates within reduced time intervals. A prominent limitation of this technique is the incessant purging of the boronizing agent from the retort by the inert gas. The boride coatings produced through the fluidized bed boronizing process have been documented to possess an exceptional amalgamation of attributes, including elevated fatigue strength and resistance to wear. Nevertheless, fluidized bed boronizing presents numerous beneficial attributes, including (Vangaveti, 2005):

- High levels of thermal flow, in conjunction with the direct extraction of components, facilitate abbreviated operational cycles.
- The maintenance of temperature uniformity, coupled with minimal capital investment and adaptability, is assured.
- Typically, the fluidized bed furnace exhibits a high degree of compaction due to the upward gas pressure, thereby guaranteeing an inert environment within the furnace.
- The application of this methodology enables the continuous fabrication of boronized components.

To enhance the operational longevity of dies, their surfaces are subjected to hardening through various methodologies. Boronizing is an established technique recognized for augmenting the wear resistance characteristics of dies. The implementation of boronizing can be achieved through several approaches, including the utilization of pastes or powders. However, all these methodologies share inherent drawbacks, namely, extended processing times and the resultant formation of a diffusion layer characterized by diminished ductility. The wear resistance of the die surfaces is notably improved through the boronizing process. The brittleness associated with the boronized layer can be mitigated by concurrent saturation with boron and supplementary elements such as nitrogen, copper, or nickel. Furthermore, the diffusion processes can be significantly accelerated by the application of a fluidized bed technique. Nonetheless, there exists a dearth of literature about boronitriding conducted within a fluidized bed environment (Balandin, 2004).

Fluidized bed technology facilitates the application of boron coatings that markedly improve the hardness, wear resistance, and corrosion resistance of steel surfaces. The resulting coatings show improved tribological properties as well as superior adhesion and homogeneity under dry wear conditions (Anthymidis et al., 2019).

The operational dynamics of fluidized bed boronizing are governed by reaction mechanisms largely determined by the intrinsic chemical interactions occurring at the substrate interface. The generation of microporous architectures throughout the procedure promotes the rapid entry of reactive gases, thus enhancing the overall effectiveness of boronizing. The schematic representation of the

fluidized bed boronizing reduction system is given in Figure 5 (Li et al., 2024).

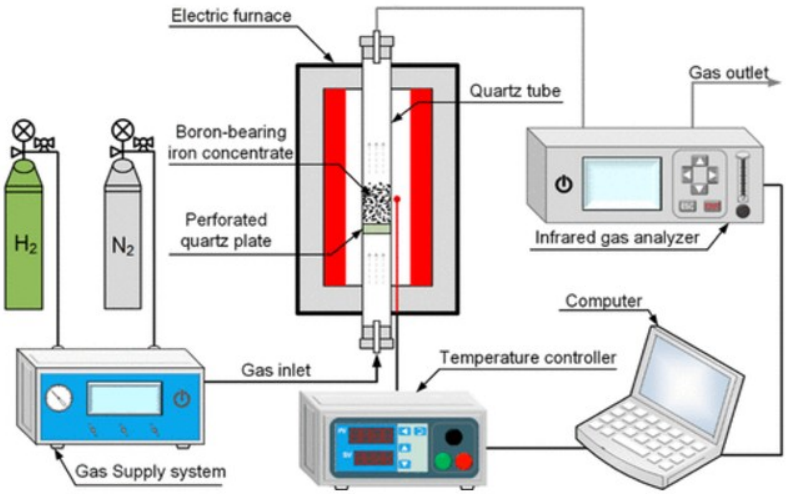



*Figure 5. Schematic of fluidized bed boronizing reduction system*

**Multi-Component Boronizing**

Boronizing in conjunction with various coating methodologies is designated as multicomponent boronizing. Numerous alternative surface coating methods exist, including carburizing, nitriding, chromizing, and aluminizing, among others. When boron constitutes one of the coating constituents in these multicomponent coatings, it is classified as multicomponent boronizing. This methodology may entail the simultaneous application of both elements or the sequential application of one element followed by another. Several metals that exhibit compatibility with boron in these multicomponent coatings include aluminum, chromium, vanadium, and silicon, among others (Vangaveti, 2005).

Multi-component boronizing constitutes a thermo-chemical surface hardening technique that integrates both boronizing and metalizing processes. Through this methodology, boron along with one or more metallic constituents permeates the metallic substrate, resulting in the formation of boride phases and/or solid solution metallic boride layers. The boron-based coating is capable of imparting elevated wear resistance, corrosion resistance, and resistance to high-temperature oxidation on metallic substrates. Nevertheless, the nuanced properties of the boron-based coating remain insufficiently characterized, thereby necessitating further exploration into the development of multi-component boronizing. In the field of multicomponent boron systems, the incorporation of complex boron phases (M-Fe-B; where M represents Al, Cr, Cu, Ni, etc.) has been shown to improve microhardness, corrosion resistance, wear resistance and high-temperature oxidation capabilities compared to conventional iron-boron phases. Numerous contemporary scientific investigations have elucidated these enhanced properties associated with borocopperizing, borochromizing, boronickeling borovanadizing and boroniobizing, and boroaluminizing (Suwattananont & Petrova, 2012).

As shown in Figure 6, the single component of the Fe-B system served as a benchmark for comparison with the multi-component systems of Cr-Fe-B, Mo-Fe-B, and W-Fe-B. The formation of needle-like or sawtooth morphology as coatings on low-carbon steel substrates was observed for both single-component and multicomponent samples. In the case of the Fe-B single-component system, a deboronisation phenomenon was recorded as shown in Figure 6(a). This phenomenon resulted in a reduction of

the coating thickness on the substrate as well as a decrease in the microhardness within the deboronized coating zone (Suwattananont & Petrova, 2012).

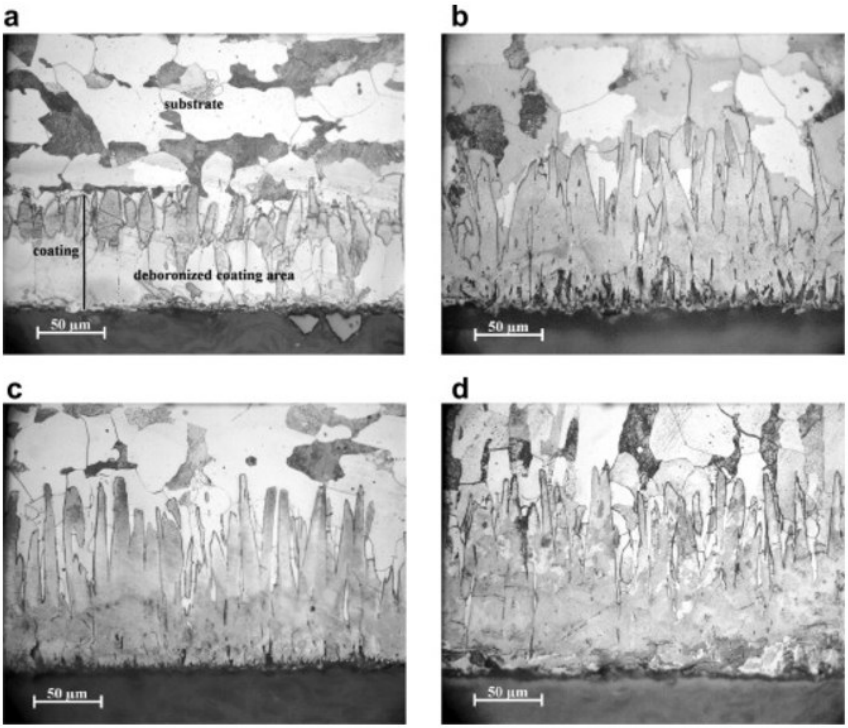



*Figure 6. Needle-shaped formations of (a) single-component Fe–B, (b) multi-component Cr–Fe–B, (c) multi-component Mo–Fe–B and (d) multi-component W–Fe–B.*

Multicomponent coatings containing niobium and boron exhibit improved properties over conventional boron coatings. These coatings are deposited on high-speed steel M2, resulting in an enhanced boron diffusion layer combined with a substrate layer with increased mechanical strength. The hardness of these coatings can

reach values of 3000 $HV_{0.025}$, while optimum wear resistance is provided in the context of pipe coating (Franco et al., 2020).

The thickness and hardness of coatings obtained through multi-component boronizing vary depending on the transition metals used. Coatings containing elements like Cr, Mo, and W exhibit distinct hardness and wear resistance characteristics. These coatings enhance the surface properties of materials by offering superior hardness and wear resistance, thereby ensuring long-lasting performance in industrial applications (Franco et al., 2020; Suwattananont & Petrova, 2012).

## Conclusion

The boronizing technique is used in many industrial applications to improve the mechanical properties of the material. With this technique, a boride layer is formed on the surface of the material, increasing the hardness. On the other hand, wear resistance and corrosion resistance also significantly increase. In this way, it is a method frequently used in aerospace, automotive, and tools. This technique is a thermochemical surface treatment and provides an effective solution to extend the service life of components even in harsh environments.

Among the various boronizing methods, solid-state boronizing is an accessible and cost-effective method widely used due to its simplicity and ability to process components with complex geometries. While gas boronizing offers control over parameters, fluidized bed boronizing is a highly efficient technique. Fluidized bed boronizing provides improved diffusion control and faster processing times. Its ability to process large volumes and deliver

consistent results makes it particularly suitable for industrial-scale applications. Developments in multicomponent boronizing are a method that integrates boron with other elements to achieve improved mechanical and tribological properties. Despite its advantages, the boronizing method has some difficulties. It has problems such as the brittleness of FeB phases, the need for high processing temperatures, long processing times, and optimizing parameters. For example, fluidized bed boronizing, although efficient, requires advanced system setups and precise control of parameters to achieve optimum results.

With future developments in boronizing, it may become possible to further increase its capabilities and capacity. Incorporating alternative heat sources such as laser-assisted boronizing or plasma techniques can reduce energy consumption while maintaining high performance.

In summary, the boronizing technique offers a reliable way to meet the increasing demands for durability, efficiency and performance in engineering applications. As technology continues to evolve, the boronizing technique will continue to play an important role in materials science and industrial innovation.

## References

Anthymidis, K., Trakali, A., & Tsipas, D. (2019). Production and Characterization of Boride Coatings on Steels. *Key Engineering Materials*, *827*, 61-66. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.827.61

Balandin, Y. A. (2004). Boronitriding of Die Steels in Fluidized Bed. *Metal Science and Heat Treatment*, *46*(9), 385-387. https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000049811.73745.93

Bin, T. (2006). Plasma boronizing of Ti6AlV4 using solid precursors by double glow plasma alloying technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*.

Boztepe, M., & Bayramoglu, M. (2016). *The Effect of Processes Parameters on the Abrasive Wear Resistance of Boronized AISI 1050 Steel*. https://doi.org/10.1115/IMECE2016-65354

Boztepe, M. H. (2014). *Effect of Boronizing Temperature and Time on Abrasion and Corrosion Resistance of AISI 1050 Steel* [M.Sc., Cukurova University].

Franco, E., da Costa, C. E., Milan, J. C. G., Tsipas, S. A., & Gordo, E. (2020). Multi-component boron and niobium coating on M2 high speed steel processed by powder metallurgy. *Surface and Coatings Technology*, *384*, 125306. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125306

Ipek, M., Celebi Efe, G., Ozbek, I., Zeytin, S., & Bindal, C. (2012). Investigation of Boronizing Kinetics of AISI 51100 Steel.

*Journal of Materials Engineering and Performance*, *21*(5), 733-738. https://doi.org/10.1007/s11665-012-0192-5

Kaplan, Y., Aksöz, S., & Bostan, B. (2021). Borlama İşleminin T/M Tekniği ile Üretilmiş NiTi Alaşımının Mikroyapı Ve Mikrosertliğine Etkilerinin İncelenmesi [An Investigation on the Effects of Boronizing Process on Microstructure and Microhardness of NiTi Alloy Produced by P/M Technique]. *Politeknik Dergisi*, *24*(2), 539-544. https://doi.org/10.2339/politeknik.717251

Kara, G., & Purcek, G. (2018). Growth kinetics and mechanical characterization of boride layers formed on β-type Ti-45Nb alloy. *Surface and Coatings Technology*.

Kara, G., Purcek, G., & Yanar, H. (2017). Improvement of wear behaviour of titanium by boriding. *Industrial Lubrication and Tribology*, *69*(1), 65-70. https://doi.org/10.1108/ilt-11-2015-0174

Kul, M., Danacı, I., Gezer, Ş., & Karaca, B. (2020). Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel. *Materials Letters*, *279*, 128510. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128510

Küper, A., Qiao, X., Stock, H. R., & Mayr, P. (2000). A novel approach to gas boronizing. *Surface and Coatings Technology*, *130*(1), 87-94. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00682-4

Li, P., Yu, J., Li, Y., Gao, P., & Han, Y. (2024). Fluidized Reduction Kinetics of Boron-Bearing Iron Concentrate by Hydrogen at Low Temperatures Based on Model-Fitting and Model-Free

Methods. *ACS Omega*, *9*(17), 19679-19689. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02041

Łukaszewicz, G., Tacikowski, M., Kulka, M., Chmielarz, K., Węsierska-Hinca, M., & Świątnicki, W. A. (2023). Effect of Prior Boriding on Microstructure and Mechanical Properties of Nanobainitic X37CrMoV5-1 Hot-Work Tool Steel. *Materials*, *16*(12), 4237. https://www.mdpi.com/1996-1944/16/12/4237

Sarma, B., Tikekar, N. M., & Ravi Chandran, K. S. (2012). Kinetics of growth of superhard boride layers during solid state diffusion of boron into titanium. *Ceramics International*, *38*(8), 6795-6805. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.05.077

Suwattananont, N., & Petrova, R. (2012). Formation of multi-component boronization by adding transition metal group VIB. *Solid State Sciences*, *14*(11), 1669-1672. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2012.06.008

Türkmen, İ., & Yalamaç, E. (2022). Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel. *Metals and Materials International*, *28*(5), 1114-1128. https://doi.org/10.1007/s12540-021-00987-8

Türkmen, İ., Yalamaç, E., & Keddam, M. (2019). Investigation of tribological behaviour and diffusion model of Fe2B layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel. *Surface and Coatings Technology*, *377*, 124888. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.08.017

Vangaveti, R. (2005). Boron induced surface modification of transition metals.

## BÖLÜM VII

# Termoplastik Kompozit Malzemelerden Rod Üretimi ve Güncel Uygulamaları

**Kamran SAMET**[1]
**Harun KOÇAK**[2]
**Çetin KARATAŞ**[3]

## 1. Giriş

Çalışma, birçok sanayi sektöründe mekanizma parçası olarak kullanılan ve rod (itme-çekme çubuğu) olarak adlandırılan parçanın termoplastik kompozit malzeme ile üretimi ile ilgilidir. Rod, Şekil 1'de gösterildiği gibi mekanizmalarda hareket aktarımı için sıklıkla kullanılan ve eksenel yük taşıyan parçadır. Havacılık sektöründe, kontrol mekanizmaları çok sayıda rod parçası içermektedir ve kullanım yerine göre farklı metal malzemeler tercih edilebilmektedir. Ağırlığın önemli bir parametre olduğu havacılık standartlarında termoplastik kompozit malzeme ile üretim

[1] Doktora Öğrencisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği / Lider Tasarım Mühendisi, TUSAŞ, Ankara/Türkiye, Orcid: 0000-0002-4159-3610, kamran.samet1@gazi.edu.tr
[2] Doç.Dr., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Ankara/Türkiye, Orcid: 0000-0002-0625-5261, harunkocak@gazi.edu.tr
[3] Prof.Dr., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Ankara/Türkiye, Orcid: 0000-0003-0005-3068, cetink@gazi.edu.tr

gerçekleştirilerek rod ağırlıklarının azaltılması amaçlanmaktadır. Böylece hava araçlarındaki faydalı yük arttırılabilecektir. Rodun diğer bir özelliği ise boyunun ayarlanabilir olmasıdır. Boyunun ayarlanabilir olması, montaj esnasında kolaylık sağlamaktadır.

*Şekil 1: Rod örnekleri*
*Kaynak: Ro-Ra, 2024*

Rodlar, uçak ve helikopter gibi hava araçlarında kontrol yüzeyleri ve mekanizmalar arasında bağlantı sağlayan birincil bileşenlerdir. Rodların hava araçlarında kullanımına ait aşağıdaki örnekler verilebilir: 1) Kanat ve kumanda yüzeyleri: Aileron, flap gibi kontrol yüzeylerinin hareketini sağlamak. 2) Gövde ve motor bağlantıları: Motorun doğru hizalanmasını ve titreşimlerin sönümlenmesini sağlamak. 3) Kokpit bağlantıları: Pilot tarafından verilen kumandaların doğru bir şekilde kontrol yüzeylerine aktarılmasını temin etmek.

Termoplastik kompozit malzemelerle üretilen rodların başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için bazı önemli hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Öncelikle, kullanılan elyaf (fiber) türü (karbon, cam, aramid, vb.) ve matris malzemesi, hedeflenen performansa uygun olarak özenle seçilmelidir. Üretim maliyetleri, geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek olabileceğinden, bu maliyetlerin düşürülmesi için otomasyon teknolojilerinden yararlanılmalı ve üretim süreçleri optimize edilmelidir. Ayrıca, havacılık sektöründe uygulanacak ürünlerin belirli standartlara uygun olması gerekliliği göz önüne alındığında, uygun test prosedürleri ve sertifikasyon süreçleri geliştirilmelidir. Termoplastik kompozitlerin uzun vadeli performansını değerlendirmek amacıyla mekanik, termal ve çevresel koşullar altındaki dayanıklılık testleri detaylı bir şekilde yapılmalıdır. Tüm bu hususlar dikkate alındığında, termoplastik kompozit malzemelerin kullanımı, rodların ağırlığını azaltarak havacılık sektörüne önemli katkılar sağlayabilir.

Bu malzemelerin üretim yöntemleri ve uygulama alanlarına dair yapılacak detaylı araştırmalar, bu teknolojinin daha geniş bir kullanım alanına yayılmasına olanak tanıyacaktır (Costa & ark., 2012).

Çalışma kapsamında termoplastik kompozit malzemeler ve güncel uygulamaları, termoplastik kompozit rod üretim yöntemleri ve termoplastik kompozit rodun güncel uygulamaları anlatılmıştır.

## 2. Termoplastik kompozit malzemeler ve güncel uygulamaları

Hava araçlarının performansını arttırma ihtiyacı, yüksek performanslı yapısal malzemelerin gelişimini tetiklemektedir. Kompozit malzemelerin havacılık ve uzay endüstrisini cezbetmelerinin en önemli nedeni yüksek mukavemet/yoğunluk oranları ve üstün fiziksel özellikleridir. Havacılık endüstrisinde termoset kompozitler metal malzemelere göre üstün özellikleri, ticarileşmiş fiyatları, belli bir olgunluğa ulaşmış üretim teknikleri ve iyi kurulmuş tedarik zincirlerinin bulunması nedenleri ile "Original Equipment Manufacturer, OEM" firmaları tarafından öncelikli termoset kompozit malzeme olarak tercih edilmekteyken; termoplastik kompozitler daha maliyetli olduğu değerlendirilerek sadece klip ve braket gibi hava aracı ikincil yapı parçalarında kullanılmıştır. Termoplastik kompozitlerin bugüne kadar sadece ikincil yapılarda kullanılmalarının en önemli nedeni yüksek proses sıcaklıkları ve büyük ölçekli yapısal parçaların üretim teknolojilerinin yeterince olgunlaşmamış olmasıdır. Fakat bu bakış açısı son zamanlarda değişmiş, dayanma profilleri (stringer), güçlendiriciler (stiffener), kanat kutusu ve hatta gövde gibi hava aracı yapısalları da termoplastik kompozitler ile tasarlanmaya ve üretilmeye başlanmıştır. Otomatik elyaf serme (AFP) teknolojisi ve insitu konsolidasyon işleminin olgunlaşması ile uçak gövdesi ve kanat kabuğu gibi büyük ölçekli, yapısal hava aracı parçalarının termoplastik kompozitler ile üretilmesi mümkün olacağı belirtilmektedir (Bellamkonda, Dwivedy & Addanki, 2024).

Termoplastik kompozitlerin oda sıcaklığında ömürsüz olması, yeniden şekillendirilebilmesi, kaynaklanabilme özelliği, geri

dönüştürülebilir olması ve daha yüksek tokluk ve darbe dayanımı özellikleri bu değişimde etkili olmuştur. Bu avantajlarının yanı sıra hızlı üretim teknolojileri ve düşük maliyetli olmaları sayesinde termoplastik kompozitlerin geleceğin malzemeleri olacağı değerlendirilmektedir.

Termoplastiklerin termoset malzemelere göre önemli avantajları şu şekilde ifade edilebilir. Termoplastik kompozitleri termosetlerden ayıran en temel özellik eriyebilir olmasıdır. Bu sayede, önceden, belli serim açıları ile yüksek sıcaklık ve basınç altında konsolide edilmiş plakaların ısıtılıp tekrar şekil verildiği termoforming gibi yöntemler ile çok kısa sürede karmaşık şekilli parçaların üretilmesi mümkündür (Jin & ark., 2022; Biron, 2013). Termoplastik kompozitler hızlı, esnek ve düşük maliyetli üretim imkânı sağlamakla beraber termoset kompozitler ile eş değer ya da daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Tablo 1'de termoset ve termoplastik reçine malzemelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

*Tablo 1: Termoset ve termoplastik reçine malzemelerinin karşılaştırılması*

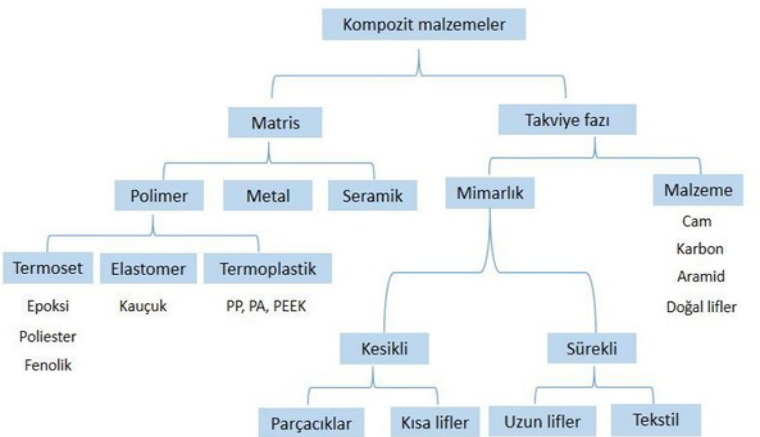
| Özellik | Birim | Epoksi/AS-4 | PEEK/AS-4 |
|---|---|---|---|
| Çekme Mukavemeti (˚0) | MPa | 2207 | 2280 |
| Çekme Modülü (˚0) | GPa | 141 | 130 |
| Çekme Mukavemeti (˚90) | MPa | 81 | 76 |
| Çekme Modülü (˚90) | GPa | 10 | 10 |
| Basma Mukavemeti (˚0) | MPa | 1531 | 1579 |
| Basma Modülü (˚0) | GPa | 128 | 142 |
| Düzlemsel Kesme Mukavemeti | MPa | 114 | 83.4 |
| Darbe Sonrası Basma Dayanımı (CAI) (25/50/25) | MPa | 160 | 279 |

Bununla birlikte, nem alma seviyeleri çok düşük olduğundan sıcak/nemli ortam koşulunda mekanik özelliklerini termoset kompozitlere göre çok daha iyi korurlar.

Bu bölümün devamında önce kompozit malzemeler, sonra termoplastik kompozit malzemeler, literatürdeki ilgili çalışmalar, kullanılan testler ve son olarak da değerlendirmeler yapılacaktır.

## 2.1. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler (karma malzemeler); metal, seramik ve polimerlerden iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi ile oluşan malzemelerdir. Yani en az 2 farklı malzemenin birbiri içerisinde karıştırılmasıyla elde edilen yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzeme tasarımında, bir malzemenin tek başına sergileyemeyeceği özelliklere ve de kendisini oluşturan malzemelerin en iyi özelliklerine sahip olan bir malzemenin üretilmesi amaçlanır. Küçük boyutlu cam elyafın bir polimer (genellikle, epoksi ya da poliester) matris içinde bulunduğu cam-elyaf, yaygın olarak kullanılan kompozitlerden biridir. Teknolojik olarak diğer önemli bir malzeme de karbon elyafın bir polimer matris içinde bulundukları karbon elyaf takviyeli kompozitlerdir. Bu kompozitler, bazı uçak ve uzay uygulamalarında, yüksek teknolojili spor ekipmanlarında (örneğin, bisiklet, golf sopası, tenis raketi ve kayak) ve otomobil tamponlarında kullanılmaktadır. Şekil 2'de kompozit malzemelerin sınıflandırılması verilmektedir.




*Şekil 2: Kompozitlerin sınıflandırılması*

*Kaynak: Gebrehiwet & ark., 2023*

Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları Tablo 2'de açıklanmaktadır. Malzemeler genel olarak beş ana gruba ayrılır: metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve yarı iletkenler. Her biri, uygulamaya bağlı olarak bazı üstün ve zayıf özellikler taşır. Kompozit malzemeler, bu malzemelerin ikisinin veya daha fazlasının üstün özelliklerini birleştirerek, güçlü korozyon direnci, ısıl direnç, düşük ağırlık gibi özelliklere sahip olabilmek için üretilir.

*Tablo 2: Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları*

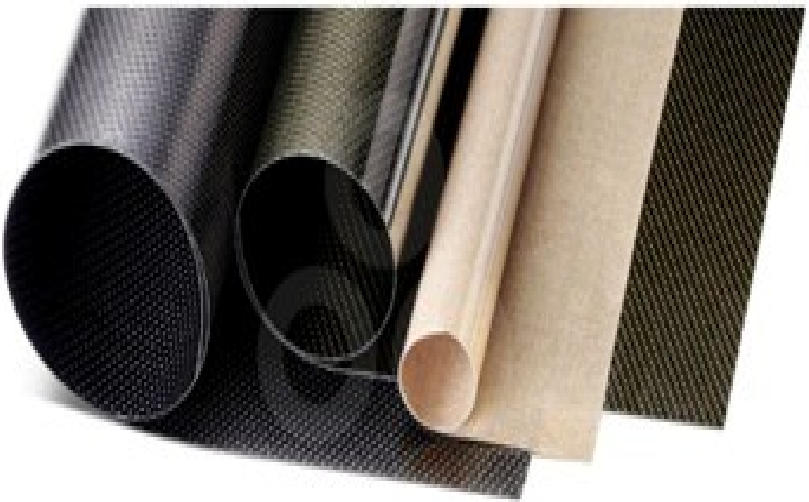
| Avantajlar | Dezavantajlar |
|---|---|
| Hafif | Malzeme maliyeti |
| Yüksek spesifik sertlik | Belirlenmiş tasarım kurallarının eksikliği |
| Yüksek spesifik dayanım | Metal ve kompozit tasarımları nadiren değiştirilebilir |
| İstenilen özellikler (anizotropik) | Uzun geliştirme süreleri |
| Karmaşık (net) şekillerde üretilebilme kolaylığı | Birleştirici, vida/cıvata vb. varlığı/maliyeti |
| Parçalı üretim ile sistem maliyetinin düşürülmesi | Düşük süneklik |
| Kolay bağlanabilirlik | Solvent/nem etkisi |
| İyi kırılma direnci | Kullanılabildiği sıcaklık limitleri |
| Düşük termal genleşme | Darbelere karşı hassasiyet |
| Düşük elektrik iletkenliği | Gizli hasarlar (iç çatlak vb.) |

Matris, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin temel fazını oluşturarak, kompozit yapının bütünleşik bir yapı sergilemesini sağlar. Elyaflar arasındaki yük transferini gerçekleştiren matris, elyafların konumlarını sabit tutarak yapışma ve bütünleşme özelliklerini ortaya çıkarır. Bunun yanı sıra, matris, kompozit yapıyı mekanik bozulmalara, nemin veya çevresel koşulların olumsuz etkilerine karşı koruyarak yapının uzun ömürlü olmasına katkıda bulunur. Matris aynı zamanda kompozitin katı formda kalmasını sağlayarak, elastik olmayan davranışlar sergiler ve böylece gerilme yoğunluklarını önemli ölçüde azaltır. İç gerilmeler, düşük mekanik özelliklere sahip kırılma bölgelerinden yeniden dağıtılarak yapının genel dayanıklılığı artırılır. Matris ile elyaaflar arasındaki etkileşim, yüksek mukavemet, düşük ısıl genleşme katsayısı, istenen düzeyde ısıl direnç, yüksek rijitlik ve uzun yorgunluk ömrü gibi üstün

özelliklerin ortaya çıkmasını sağlar.

### 2.2. Termoplastik kompozit malzemeler

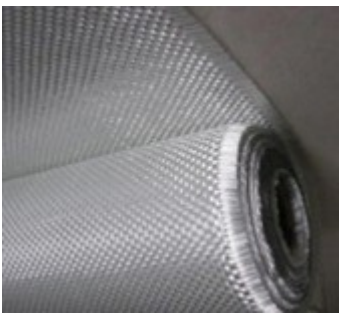
Termoplastik kompozit malzemeler bir termoplastik matris ile güçlendirilmiş bir kompozit malzemedir (Şekil 3). Bu tür malzemeler, termoplastik polimerlerin (örneğin, polipropilen, polietilen, poliamid gibi) (Şekil 4) çeşitli güçlendirme elemanları (genellikle cam elyafı, karbon elyafı veya aramid elyafı gibi) (Şekil 5) ile birleştirilmesiyle üretilir.



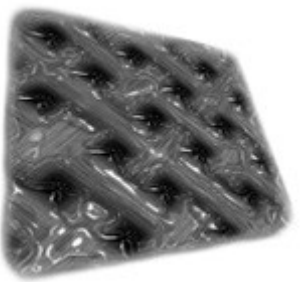
*Şekil 3: Termoplastik kompozit malzeme örnekleri*

*Şekil 4: Termoplastik polimer örnekleri*

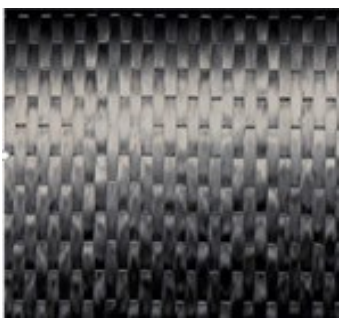
*Cam elyaf (Glass fiber)*



*Cam elyaf dokuma*



*Karbon elyaf (Carbon fiber)*



*Karbon elyaf dokuma*

*Şekil 5: Güçlendirme elemanları örnekleri*

Termoplastik kompozitlerin özellikleri:

1) Yüksek Dayanım ve Hafiflik: Güçlendirilmiş lifler, malzemenin mekanik özelliklerini artırarak yüksek dayanım ve sertlik sağlar. Bu sayede, metal malzemelere göre daha hafif bir yapı elde edilir.
2) Isı ile Şekil Değiştirme: Termoplastik polimerler, belirli sıcaklıklarda yumuşayarak şekil alabilirler. Bu, üretim süreçlerinde (örneğin, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon) avantaj sağlar.
3) Yeniden İşlenebilirlik: Termoplastik kompozitler, ısıtıldıklarında yeniden şekil verilebilirler. Bu, malzemelerin geri dönüşümünü veya yeniden kullanımını mümkün kılar.
4) Korozyon Direnci: Bu kompozit malzemeler, metallerin aksine paslanma veya korozyona uğramazlar, bu da onları dış mekân uygulamalarına uygun hale getirir.

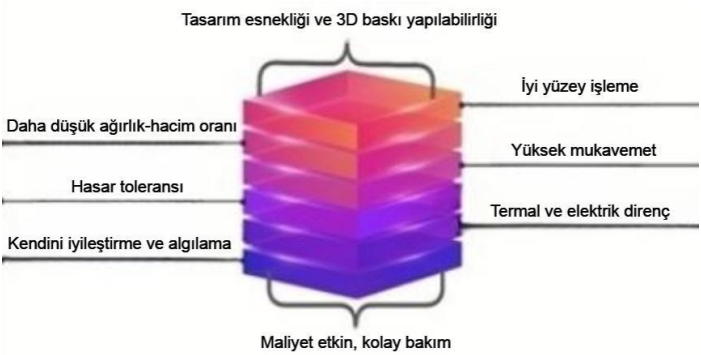
Termoplastik kompozitlerin avantajları**:**
1) Hafiflik ve yüksek mukavemet;
2) Yüksek sıcaklık dayanımı;
3) İyi elektriksel yalıtım özellikleri;
4) Kolay üretim ve şekillendirme;
5) Korozyona karşı dayanıklılık.

Termoplastik kompozitlerin kullanım alanları:
1) Otomotiv Sanayi: Araba parçaları, iç döşemeler, motor kapakları gibi ürünlerde yaygın olarak kullanılır.
2) Havacılık ve Uzay: Hafifliği ve dayanıklılığı nedeniyle uçak ve uzay aracı bileşenlerinde tercih edilir.
3) İnşaat ve Yapı: Bina yapılarında, boru hatlarında ve prefabrik yapılarda kullanılır.
4) Elektronik ve Elektrik: Yalıtım malzemeleri ve çeşitli elektrikli ekipmanlarda kullanılır.

Termoplastik kompozit malzemeler, modern endüstrilerde malzeme tasarımının ön plana çıktığı alanlarda, geleneksel malzemelere göre önemli avantajlar sunmaktadır. Termoplastik kompozit malzemelerle ilgili gelişen trendler, bu malzemelerin sürdürülebilirlik ve performans açısından daha da iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Sürdürülebilirlik alanında, biyo-temelli

termoplastikler ve tamamen geri dönüştürülebilir kompozitler geliştirilerek çevre dostu çözümler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. 3D baskı teknolojisi, hızlı prototipleme ve özel parça üretimi için termoplastik kompozitlerin katkılı üretimde kullanılmasını sağlamaktadır. Hibrit kompozitler, termoplastiklerin metaller veya seramiklerle birleştirilerek malzeme özelliklerinin geliştirilmesiyle dikkat çekmektedir. Ayrıca, gelişmiş takviye lifleri kullanılarak, karbon nanotüpler gibi nano liflerle performansın artırılması hedeflenmektedir. Bu yenilikler, termoplastik kompozitlerin kullanım alanlarını genişletmekte ve farklı sektörlerde daha verimli çözümler sunmaktadır (Siegl & ark., 2024).

Şekil 6, kompozit malzemelerin özelliklerini göstermektedir. Kompozit malzemeler birden fazla katmandan oluştuğu için, her biri farklı özellikleri taşıyan birleşik bir yapı sunmaktadır. Diğer geleneksel malzemelere kıyasla, kompozit malzemeler, ihtiyaçlara göre şekillendirilebilen bazı benzersiz özellikler sergiler. Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre 15 kat daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Bu da düşük yakıt ekonomisi sağlar. Termal ve korozyon direnci açısından, bu çok amaçlı malzeme genel maliyet açısından ekonomiktir. Bu çevre dostu malzeme, yolcu güvenliğini sağlamak için yüksek hasar toleransı özellikleri gösterir. Kompozit malzemeler, geri dönüşüm üzerindeki etkileri nedeniyle yeşil teknoloji için oldukça uygun ve çevre güvenliği açısından genellikle yeterlidir. Yüksek kaliteli yüzey işlemleri almak, düşük maliyetle zor olsa da, üretim, tasarım, onarım, hafiflik, birleşim, geri dönüşüm ve güvenlik sorunlarında faydalar sunmaktadır. Performans ve kullanım açısından, kompozitlerin genel maliyeti oldukça düşüktür. Kompozitlerin fabrikasyon maliyetlerini düşürmek için kalıplama, döşeme, sarma gibi kolay fabrikasyon teknikleri uygulanmalıdır (Khan & ark., 2024).




*Şekil 6: Kompozit malzemelerin katmanları ve özellikleri*
*Kaynak: Khan & ark., 2024*

Havacılık endüstrisinde, kompozitler yalnızca yapısal malzemeler olarak değil, aynı zamanda elektriksel yalıtım amaçları için de kullanılır. Ayrıca, elyaf takviyeli kompozitlerin istenen dielektrik özellikleri, radomlar gibi yapılar için de kullanışlıdır. Ancak, termoset malzemeler higroskopiktir, yani havadan nem emerler, bu da dielektrik davranışta kademeli bir kaymaya yol açar, oysa termoplastikler bu sorundan etkilenmezler. Termoplastiklerin kullanımı, olağanüstü özellikler sayesinde her gün ilerlemektedir.

Birçok termoplastik türü olmasına rağmen, son on yılda araştırmalar özellikle elyaf demetinin polietereterketon (PEEK), polieterketonketon (PEKK), polieterimid (PEI), polifenilen sülfit (PPS) ve poliamidmid (PAI) üzerine yoğunlaşmıştır. PEEK, mekanik özellikleri ve kimyasal ve aşındırıcı direnci, aşınma direnci ve yüksek çatlama dayanıklılığı gibi özellikleri nedeniyle ilk kez 1980'lerde havacılık endüstrisinde kompozitlerde kullanılmıştır. Polieterarileterketon (PAEK) polimer ailesinin bir üyesi olan PEKK, PEEK'e alternatif olarak büyük ilgi görmüştür. PEKK, yüksek performanslı mühendislik yarı kristalin termoplastik olarak yaygın olarak kullanılır ve kimyasal olarak iki keton ve bir eterin tekrarlanan gruplarından oluşur. Uygun termoplastik kompozitler arasında karbon elyafı takviyeli PEKK, mükemmel termal stabilite, düşük nem emilimi, mükemmel alev geciktirici direnç, yüksek dayanıklılık ve gerilme modülünü içeren özellikler açısından olumlu

bir denge sergiler. PEKK, yaklaşık 165°C'lik bir cam geçiş sıcaklığına ve 330°C'lik bir erime noktasına sahiptir. Dikkat çekici bir şekilde, PEEK ve PEKK matris malzemeleri, üstün mekanik özellikleri sayesinde birincil uçak yapılarında kullanılabilir. PPS, yüksek ısıl ve mükemmel kimyasal direnç gösteren bir başka yarı kristalin termoplastiktir. Günümüzde, kompozit malzemelerin vazgeçilmezliği, yaygın uygulanabilirlikleri ve avantajlı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Son gelişmeler, güç, elastik modül ve yorgunluk ömrü gibi özellikleri sürekli olarak geliştirmektedir. Elyaf takviyeli polimer (FRP), uzun veya kısa elyaf takviyeleriyle takviye edilmiş polimerlerden oluşan bir kompozit olup, genellikle mekanik özellikleri ve erişilebilirliği nedeniyle epoksi matris olarak kullanılır. Gücü ve maliyet etkinliği ile değerli olan E-cam lifleri, takviye olarak sıkça kullanılır (Ozturk, Cobanoglu, & Ece, 2024). Farklı termoplastiklerin ve diğer malzemelerin performans özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 3'de sunulmaktadır.

İdeal olarak, mühendislik malzemelerinin öngörülebilir ve kesin özelliklere sahip olması gerekir. FRP kompozitlerinin mekanik özelliklerinin optimal olarak artırılması, elyaf yönelimi, katman kalınlığı ve elyaf hacim oranı gibi çeşitli kombinasyonlar ile deneme yapmayı gerektirir. Ancak, bu deneysel araştırma önemli derecede zaman ve finansal kaynaklar gerektirir. Bu özellikleri tahmin etmek çok önemlidir çünkü kompozit ilkelerinin başarılı bir şekilde uygulanması, malzeme kombinasyonlarını belirli taleplere uyacak şekilde özelleştirme esnekliğine dayanmaktadır.

*Tablo 3: Farklı malzemelerin mukavemet değerleri / performansı*

| Özellik | PEEK | PEKK | PEI | PPS | PAI | Çelik | Alüminyum | Termoset |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 90-100 | 90-120 | 70-100 | 40-80 | 120-150 | 400-800 | 150-300 | 50-100 |
| Basma Mukavemeti (MPa) | 150-200 | 160-220 | 120-160 | 100-150 | 180-250 | 900-1100 | 250-350 | 100-150 |
| Kayma Mukavemeti (MPa) | 50-80 | 60-90 | 40-70 | 30-50 | 80-120 | 300-500 | 100-200 | 40-70 |

*Kaynak: Ozturk, Cobanoglu, & Ece, 2024*

Matematiksel modeller, kompozitlerin bazı temel teknik özelliklerini doğru bir şekilde tahmin edebilse de birçoğu hala belirsizdir. Hesaplamalı modelleme, etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Sonlu elemanlar analizi (FEA) için, laminanın başlangıçtaki elastik özelliklerinin ve dayanımının elde edilmesi, homojenleştirilmiş özellik yaklaşımında önemli bir rol oynar. Bu değerleri türetmek için birçok yöntem bulunmaktadır ve bir laminanın özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Ancak, her seferinde farklı elyaf hacim oranları için deneyler yapmak önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Alternatif olarak, sayısal analiz için mikromekanik bir yaklaşım genellikle tercih edilmektedir. Ancak bu genellikle daha yüksek hesaplama maliyetlerine yol açar ve takviye ve matris geometrilerini içeren karmaşık kompozit malzeme modellerinin tasarımını gerektirir (Gebrehiwet & ark., 2023).

### 2.3. İlgili Çalışmalar

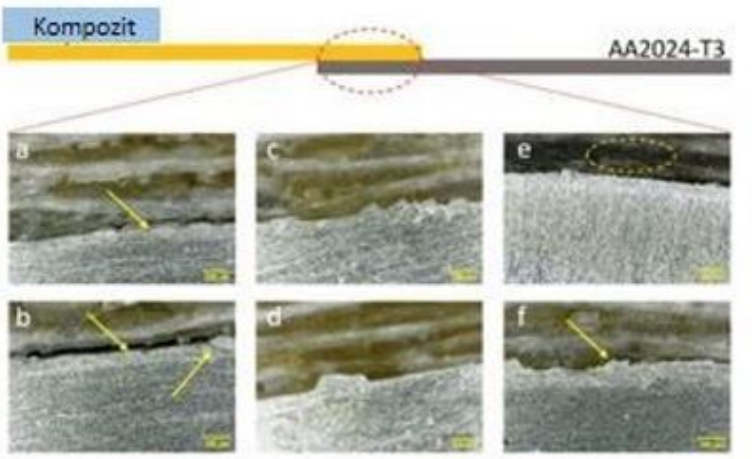
Havacılık sektörü, ağırlık, malzeme özellikleri ve ürün ömrü açısından katı gereksinimlere sahiptir, bu da kompozit malzemeleri ideal adaylar haline getirir. Bu bölümde, termoplastik kompozit

teknolojilerindeki en son gelişmeler, malzeme teknolojileri ve üretim yöntemleri ile ilgili akademik çalışmalar incelenmektedir.

Son yıllarda sürdürülebilir üretim yaklaşımları kapsamında termoplastik kompozitlerin yapışkan bağlantılı kullanımı öne çıkmıştır. Polipropilen matrisli cam elyaf kompozitlerin yapıştırıcı bağlama işleminin optimizasyonunun ele alındığı bir çalışmada düşük basınçlı plazma ön bağlama yüzey işlemi ile bağlantı performansı iyileştirilmiş ve deneysel tasarım yaklaşımıyla optimum koşullar belirlenmiştir. Sonuçlar, termoplastik kompozitlerin termoset kompozitlerle karşılaştırıldığında mekanik performans açısından benzer, ancak çevresel sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olduğunu göstermiştir (Mandolfino & ark., 2024).

Kullanım süresi geçmiş ve üretim atıkları elyaf takviyeli polimer kompozitlerin geri kazanımı önem arz etmektedir. Yeni ultrasonik geliştirilmiş ayırma ve yeniden konsolidasyon yaklaşımıyla kullanım süresi geçmiş ve üretim atıkları kompozitler geri kazanılabilir ve özellikleri korunabilir. Cam elyafı takviyeli termoplastik polipropilen kompozitlerin ultrasonik destekli yöntemle geri kazanımı sonucunda %96 esneklik ve %95 ara tabaka kayma dayanımı (ILSS) korunmuştur. Çalışma, mikroskopik incelemelerle desteklenmiş ve hibrit yapıların geliştirilmesiyle daha uygulanabilir bir yaklaşım sunmuştur (Ragupathi & Balle, 2024).

AA2024-T3 alaşımının, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) metodu ile işlenerek ve oksijen-yakıt kaynağı (OFW) metodu kullanılarak termoplastik kompozit ile hibrit birleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozit birleşiminin morfolojik özellikleri, kimyasal bileşimleri, elektrokimyasal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, birleşimin düzgün bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. PEO metodunun, kaplamada yüksek silikon içeriği nedeniyle arayüz kayma dayanımını azalttığı gözlemlenmiştir (Lucas & ark., 2024) (Şekil 7).



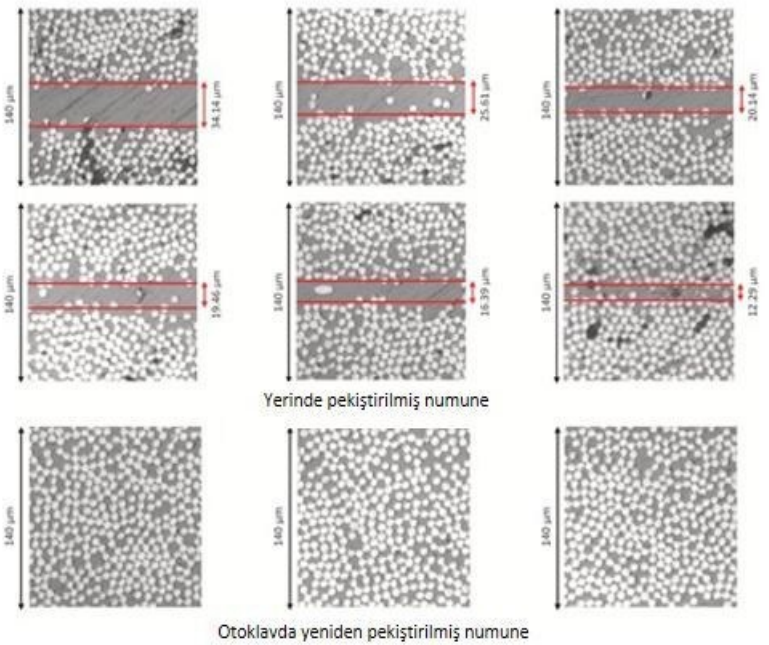

*Şekil 7: Hibrit birleştirme kaynak bölgesinin mikrografik görüntüsü*

*Kaynak: Lucas & ark., 2024*

Polimerlerin termal ayrışması yoluyla mekanik kesme işlemine tabi tutulan atık malzemelerle takviye edilmiş karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) ömrünü tahmin eden bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada poliamid ve epoksi bazlı CFRP kompozitler karşılaştırılmış, plazma ile yapışma iyileştirilmiştir. Stabilite 400°C'ye kadar incelenmiş ve ömür tahmini, Toop denklemi ve serbest kinetik model (MFK) ile yapılmıştır. %5 bozulma noktasında mekanik özelliklerin kaybı tahmin edilmiştir. Ayrıca, Otomatik Elyaf Yerleştirme (AFP) teknolojisi, geleneksel yöntemlere göre zaman ve maliyet tasarrufu sağlamıştır (Abenojar & ark., 2024).

Şekil 8'de AFP sürecinde oluşan elyaf hacim oranı, boşluk içeriği ve kristalizasyon derecesinin Karbon/PEEK termoplastik kompozitlerin rijitlik özelliklerine etkisinin incelenmesi sonuçları verilmektedir. AFP ve otoklav yöntemleriyle üretilen numuneler mikroskobik analiz ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ile değerlendirilmiştir. 2D Temsili Hacim Elemanları (RVE) kullanılarak, enine elastik modül, düzlem dışı Poisson oranı ve kayma modülü incelenmiştir. AFP'nin, enine elastik modülünü %10,

kayma modülünü %20 azalttığı, Poisson oranını ise etkilemediği tespit edilmiştir (Pourahmadi, Ganesan&Shadmehri, 2024).

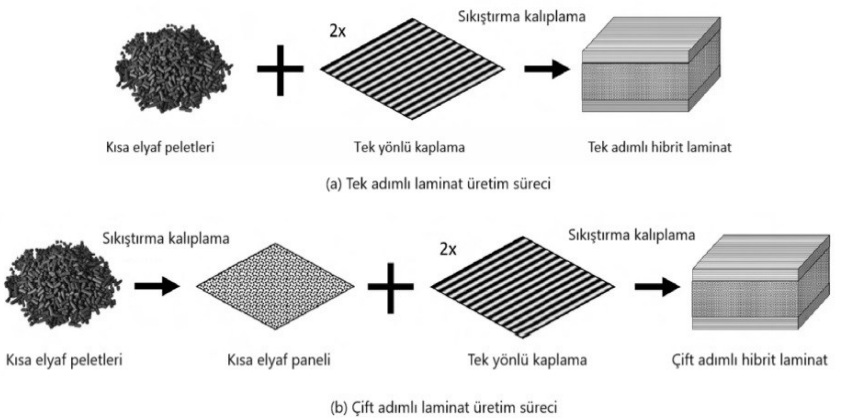



*Şekil 8: Mikrograflardan çıkarılan gerçek RVE örnekleri. Elyaf hacim oranı, boşluk içeriği ve katmanlar arası reçine cep yüzdesi ölçülmek için yerinde sağlamlaştırma ve otoklav yeniden sağlamlaştırma ile üretilen karbon/PEEK örnekleri*

*Kaynak: Pourahmadi, Ganesan & Shadmehri, 2024*

Şekil 9'da iki adımlı hibrit laminatların üretim süreci verilmektedir. İlk adımda kısa elyaf peletler tek yönlü kaplamalarla sandviç yapıda birleştirilerek sıkıştırma kalıplaması yapılır. İkinci adımda kısa elyaf peletler önce sıkıştırma kalıplama yoluyla kısa elyaf paneli halinde birleştirilir, sonra tek yönlü kaplamalarla sandviç yapıda birleştirilir ve son olarak ta sıkıştırma kalıplaması yapılır. Çalışma düşük konsolidasyon basınçlarının üretim sürecinde daha yüksek tekrarlanabilirlik sağladığını tespit etmiştir. Ayrıca, hibrit panellerin mekanik özelliklerde büyük oranda iyileşme olduğu

tespit edilmiş ve eğilme modülünde %330,4'lük olağanüstü bir artış sağlandığı kanıtlanmıştır (Pheysey, De Cola & Martinez-Hergueta, 2024).

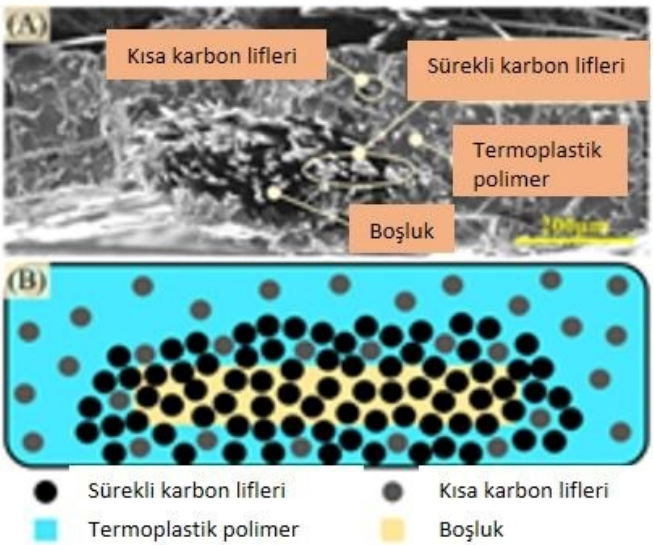



*Şekil 9: Hibrit laminatların üretim süreci. (a) Tek adımlı laminat üretim süreci; (b) Çift adımlı laminat üretim süreci.*
*Kaynak: Pheysey, De Cola & Martinez-Hergueta, 2024*

Şekil 10, 3D baskı sırasında sürekli karbon elyaf takviyeli termoplastiklerin (S/C-CFRTP) davranışlarını göstermektedir. Şekilde, kısa karbon elyafların malzemeye sağladığı takviye etkisi ve matrisin elyaflar arasındaki boşlukları doldurma süreci açıklanmaktadır. Sonuçlar, her iki davranışın iyileştirilmesinin mekanik performansı artırdığını göstermiştir. Kısa karbon elyaf içeriği arttıkça performans önce iyileşmiş, ardından yetersiz emprenye nedeniyle düşüş göstermiştir. Daha yüksek nozul sıcaklıkları, matrisin elyafları daha iyi sarmasını sağlayarak mekanik performansı artırmıştır (Wang & ark., 2024).

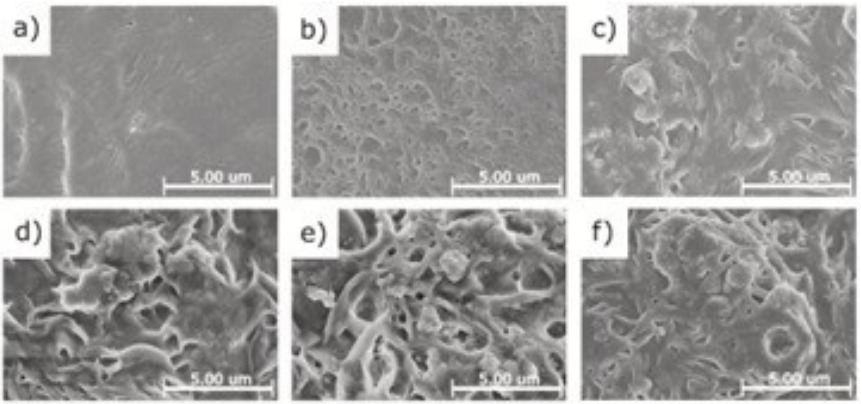
Şekil 11, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gözlemlenen poli(etilen oksit) (PEO) ve poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT) termoplastik kompozitlerin morfolojisini göstermektedir. PEDOT parçacıklarının polimerizasyon sıcaklığının kritik bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Maksimum iletkenlik sentezleme ortam sıcaklığında yapıldığında

elde edilmiştir. Çift vidalı ekstrüzyon için üretilen PEO/PEDOT termoplastiklerde PEDOT oranı artırılarak olağanüstü elektriksel iletkenlikler elde edilebileceği bulgusuna ulaşılmıştır (Karst & ark., 2024).




*Şekil 10: Kısa sürekli karbon elyaf takviyeli termoplastik (S/C-CFRTP) telin kesiti: (A) taramalı elektron mikroskobu resmi ve (B) şematik gösterimi*

*Kaynak: Wang & ark., 2024*




*Şekil 11: SEM ile gözlemlenen PEO/PEDOT termoplastik kompozitlerin morfolojisi: (a) saf PEO, (b) %10 PEDOT, (c) %20 PEDOT, (d) %30 PEDOT, (e) %40 PEDOT ve (d) %50 PEDOT*

*Kaynak: Karst & ark., 2024*

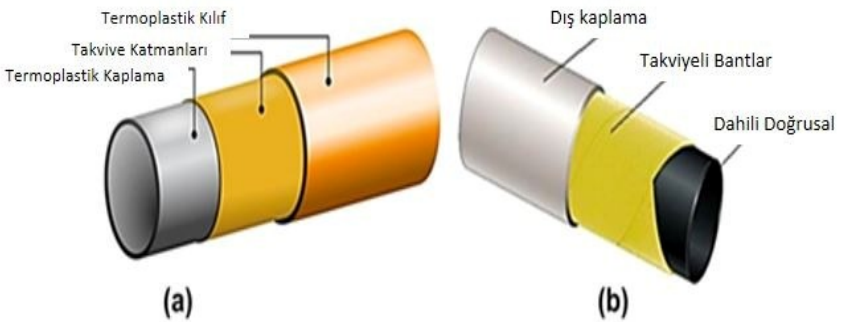
Şekil 12'de yüksek performanslı termoplastik kompozitlerin üretimi için geliştirilen yeni bir elyaf yayma düzeneği gösterilmektedir. Bu çalışmada bu düzeneğin etkinliği değerlendirmektedir. S2-cam elyafların yayılma durumu, PEEK tozlu reçine banyosuna daldırılmasının ardından yayma süreçlerinden geçirilerek ölçülmüştür. Hareket frekansı, genlik ve sabit veya döner makaraların elyaf yayılma üzerindeki etkileri incelenmiştir. 5 Hz'lik bir frekans ile 6 mm'lik hareket genliği, verimli ve etkili elyaf yayılması için ideal bir kombinasyon olarak bulunmuştur. Gözlemler, döner makaralar kullanıldığında başlangıç S2-cam elyaf demetinin genişliğinin 7 katına kadar, sabit makaralar kullanıldığında ise 10 katına kadar artırılabildiğini göstermiştir (Moradi & ark., 2023).

*Şekil 12: Statik silindirler kullanıldığında yayma silindirleri etrafında PEEK reçinesi birikmesi*
*Kaynak: Moradi & ark., 2023*

Başta termoplastikler olmak üzere polimerik malzemelerin yüzey özellikleri yapışma açısından oldukça zordur ve başarılı bir yapışma sağlamak için özel yüzey hazırlık işlemleri gerektiğini göstermektedir. CF/LM-PAEK termoplastik kompozitlere ıslak kumlama ve atmosferik plazma işlemleri uygulanarak yüzey özellikleri ve yapışma dayanımları incelenmiştir. Epoksi bazlı film yapıştırıcı kullanılarak yapılan lap kayma testlerinde her iki işlem de yapışma dayanımını artırmıştır. Atmosferik plazma, yüzey enerjisini %18,24 ve dayanımı %14,93 artırırken, ıslak kumlama %6,48 artış sağlamıştır (Avcı & ark., 2024).

Yapılan bir çalışma ile UD takviyeli şekilsiz termoplastik kompozit yüzeylerin kalitesini etkileyen termoform parametreleri ve katman dizilimlerinin etkileri incelenmiştir. Karbon elyaf ve polikarbonat matrisli kompozitler kullanılarak yapılan deneylerde, kalıp sıcaklığı, tutma süresi, sıkıştırma kuvveti ve soğutma sıcaklığı gibi parametreler test edilmiştir. Sonuçlar, kalıp sıcaklığı ve sıkıştırma kuvvetinin yüzey kalitesini en çok etkileyen faktörler olduğunu, ayrıca [0/0/90/0] S diziliminin daha iyi yüzey kalitesi sağladığını göstermiştir (Voltz, Zollner & Mitschang, 2024).

Termoplastik kompozit borular (TCP) (Şekil 13) üretiminde lazer ısıtmanın verimli bir ısı kaynağı olduğu ve üretim sırasında elyaf hizalama hataları, boşluklar ve tabakalanma gibi kusurların ortaya çıkabileceği belirtilmiştir. Bu kusurlar, dayanım, rijitlik ve tokluk gibi performans özelliklerini etkiler. Üretim hatalarının varlığının mukavemet ve sertliği, katmanlar arası kesme mukavemetini, tokluğu ve sürünme performansını etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, TCP için üretim hataları ile baş etmek için son teknolojik gelişmelerin dikkatle izlenmesi gerektiği vurgulanmıştır (Okolie & ark., 2024).

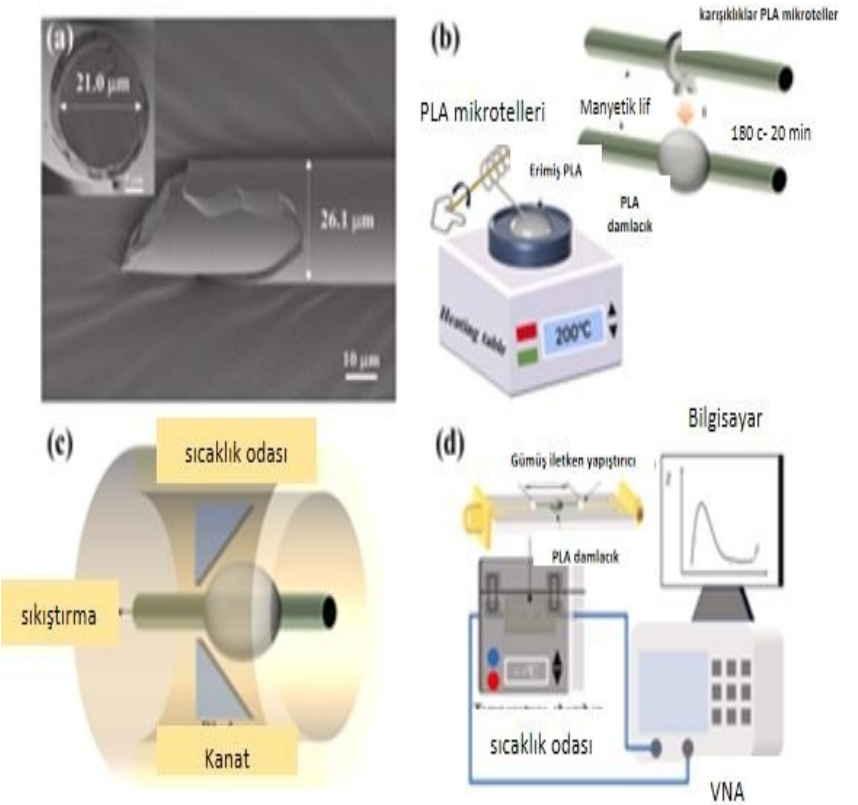



*Şekil 13: Termoplastik kompozit borunun şematik gösterimi*
*Kaynak: Okolie & ark., 2024*

Şekil 14, karbon elyaf ve PA12 ile doldurulmuş bir kompozit malzeme (Nis-CFRTP) üretim sürecini göstermektedir. Yapılan bir çalışmada indüksiyon ısıtma süreci, elektromanyetik-termal modellerle analiz edilmiş ve nikel içeriği, ısı kaynağının konumu, bobin akımı ve frekansının sıcaklık artışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmanın, Joule ısısının optimize edilmesine katkı sağlayarak, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin sıcaklık kontrolü ve düzenlemesindeki kullanım alanlarını genişletme potansiyeline sahiptir (Shi & ark., 2024).

*Şekil 14: Nis-CFRTP'nin hazırlanma süreci: (a) Şematik diyagram (b) Fiziksel diyagram*
*Kaynak: Shi & ark., 2024*

Şekil 15'de, manyetik elyafların (MF) empedans özelliklerine dayalı tahribatsız ve gerçek zamanlı bir sıcaklığa bağlı arayüz kayma mukavemeti (IFSS) tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Tavlama ve yüzey modifikasyonu ile optimize edilen MF'ler, empedans ve radyal sıkıştırma stresi arasındaki doğrusal ilişkiyi göstermiştir. Bu yöntem, empedans ölçümleriyle %95'in üzerinde doğrulukla sıcaklığa bağlı IFSS tahmini yapmaktadır ve geniş sıcaklık aralığında güvenilir bir çözüm sunmaktadır (Li & ark., 2023).

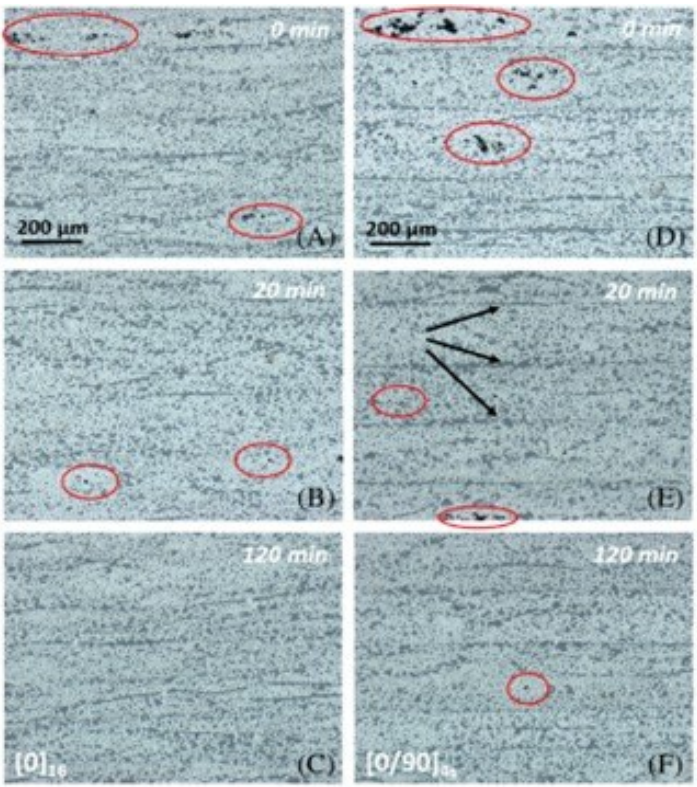



*Şekil 15: (a) Manyetik elyafların SEM görüntüsü, (b) PLA mikrotelleri ve mikrodamlacık örneklerinin hazırlama süreci, (c) mikrodamlacık ayırma testi, (d) değişken sıcaklık altındaki empedans testi düzeneği*

*Kaynak: Li & ark., 2023*

Şekil 16'de, düşük basınç altında konsolide edilen CF/PEKK örneklerinin mikro yapısının zamanla evrimi ve ara tabaka kayma dayanımı (ILSS) üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Sonuçlar, çapraz elyaflı örneklerde ILSS'nin 80-95 MPa, UD örneklerde ise 98-112 MPa arasında değiştiğini göstermektedir. Konsolidasyon kalitesinin, reçine açısından zengin ara tabakanın liflerle yeniden

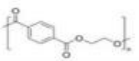
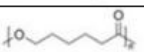
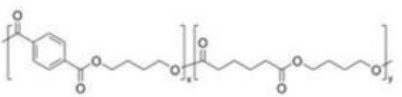
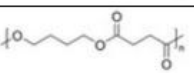
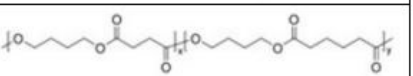
doldurulmasıyla ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Arquier & ark., 2023).




*Şekil 16: CF/PEKK kompozitlerin mikro yapısını gösteren optik mikroskop görüntüleri. Lifler parlak gri, matris gri ve boşluklar siyah (kırmızıyla daire içine alınmıştır) renklerle işaretlenmiştir.*
*Kaynak: Arquier & ark., 2023*

Doğada çözünebilen plastiklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek, sürdürülebilir malzeme kullanımını artırmak için kritik öneme sahiptir. Dolgu malzemeleri veya elyafla güçlendirme, bu plastiklerin dayanıklılığını artırabilir. Ancak, bu yöntemler geri dönüştürülebilirlik ve doğada çözünürlük açısından bazı sorunlara yol açabilir. Kendinden güçlendirilmiş polimer kompozitler (SRPC'ler) bu sorunları aşabilir, ancak biyobozunur termoplastiklerin SRPC'lerde kullanımı sınırlıdır. Yapılan bir

çalışmada ticari olarak temin edilebilen emtia plastik bazlı SRPC'lerin yerini alabilecek daha geniş bir yelpazede biyolojik olarak parçalanabilen termoplastiklerin potansiyeli değerlendirilmiştir (Şekil 17). Sonuçlar, PLA, PHA ve PGA termoplastiklerinin daha fazla potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir (Colwell & ark., 2024).

| Plastik Türü | Kimyasal Yapı |
|---|---|
| Polietilen (PE) | |
| Polipropilen (PP) | |
| Polietilen Tereftalat (PET) |  |
| **Biyolojik olarak parçalanabilir plastikler** | |
| Polilaktik Asit (PLA) | |
| Poliglikolik Asit (PGA) | |
| Polikaprolakton (PCL) |  |
| Polihidroksialkanoatlar (PHAs)<br>- Bütirat (R = $CH_3$)<br>- Valerat (R = $CH_2CH_3$)<br>- Hekzanoat (R = $CH_2CH_2CH_2CH_3$) | |
| Poli(bütilen Adipat Tereftalat) (PBAT) |  |
| Poli(bütilen Süksinat) (PBS) |  |
| Poli(bütilen Süksinat adipat)(PBSA) |  |

*Şekil 17: Ticari emtia plastiklerin ve biyolojik olarak parçalanabilir plastiklerin kimyasal yapıları*

*Kaynak: Colwell & ark., 2024*

Yapılan güncel literatür incelemeleri son yıllarda termoplastik kompozit malzemelerin seçimi, üretimi, performansı, maliyeti, etkileri vb. boyutlarda tartışıldığını göstermektedir. Örneğin; yapılan çalışmalarda termoplastik kompozitlerin termoset kompozitlerle karşılaştırıldığında mekanik performans açısından benzer, ancak çevresel sürdürülebilirlik açısından daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Diğer çalışmalarda kullanım süresi geçmiş ve üretim atıkları elyaf takviyeli polimer kompozitlerin geri kazanımının önemine vurgu yapılmıştır. Bazı çalışmalarda hibrit kompozit birleşimlerin morfolojik özellikleri, kimyasal bileşimleri, elektrokimyasal ve mekanik özellikleri açısından avantajlı oldukları vurgulanmıştır. Literatürde termoplastik kompozit malzemelerin hizmet ömrünün artırılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Kullanılan malzemelerin ve üretim süreçlerinin termoplastik kompozit malzemelerin mekanik performansını etkilediğine vurgu yapılmıştır. Termoplastik kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliklerini artırma yöntemlerine değinilmiştir. Polimerik malzemelerin yüzey özelliklerinin yapışma açısından önemli olduğu ve başarılı bir yapışma sağlamak için özel yüzey hazırlık işlemleri gerektiğine vurgu yapılmıştır. Biyolojik olarak parçalanabilen termoplastiklerin potansiyeli değerlendirilmiştir. Termoplastik kompozit malzemelerin performans testlerinin önemli olduğu vurgulanmıştır.

### 2.4. Kullanılan Metrikler ve Testler

Literatürde kullanılan metrikler ve testler detaylı olarak Tablo 4-9'da verilmiştir. Bu metrikler ve testler, genellikle termoplastik kompozit malzemeler ve ilgili uygulamaları üzerinde çalışmalarda kullanılmaktadır (Moghaddam, Kumru, Bergsma, 2024; Zhang & ark., 2024).

Tablolarda tanımlanan testler, malzemenin çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını ve performansını analiz etmek için kullanılmaktadır. Optik mikroskopi ile malzemenin mikro yapısal özellikleri (elyaf dağılımı, boşluklar, malzeme birleşimi vb.) incelenir. Bu testin formülü genellikle uygulanmaz çünkü görsel bir

inceleme yöntemidir. SEM, malzemenin yüzey yapısını yüksek çözünürlükle incelemek için kullanılır. Çoğunlukla mikroyapıdaki ayrıntılar (örneğin, elyaf dağılımı, boşluklar, çatlaklar) görselleştirilir ve sayısal analizler yapılabilir. SEM incelemelerinde görüntü işleme yazılımları kullanılarak hesaplamalar yapılır.

*Tablo 4: Mekanik testlerin türleri ve açıklaması*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Mekanik Testler | Çekme Mukavemeti | $\sigma = \frac{F}{A}$, Malzemenin kopma noktasına kadar dayanabildiği maksimum gerilme miktarı | MPa |
| | Çekme Modülü | $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$, Elastik bölgede gerilme ve şekil değiştirme oranı | GPa |
| | Basma Mukavemeti | $\sigma = \frac{F}{A}$, Malzemenin eksenel yük altında ezilmeden önce dayanabildiği maksimum stres | MPa |
| | Eğilme Mukavemeti | $\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2}$, Üç nokta eğme testinde kırılma anındaki mukavemet. | Pa |

*Kaynak: Moghaddam, Kumru, Bergsma, 2024*

*Tablo 5: Çatlama dayanıklılığı testleri ve açıklaması*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Çatlama Dayanıklılığı | Düzlemsel Kesme Mukavemeti | $\tau = \frac{F}{A}$, Malzemenin kayma kuvvetlerine karşı dayanıklılığı | MPa |
| | Mod I Çatlama Dayanıklılığı | $K_I = Y.\sigma.\sqrt{\pi a}$, Çatlak ucundaki enerji salınım hızı | MPa√m |

*Kaynak: Moghaddam, Kumru, Bergsma, 2024*

*Tablo 6: Termal ve yüzey testleri ve açıklamaları*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Termal ve Yüzey Testleri | Cam Geçiş Sıcaklığı (Tg) | $Ra = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert y_i \rvert$, Belirli bir formül yok, malzemenin sertlikten elastik hale geçtiği sıcaklık aralığı | °C |

*Kaynak: Moghaddam, Kumru, Bergsma, 2024*

*Tablo 7: Simülasyon ve modelleme testleri*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Simülasyon ve Modelleme | Von Mises Gerilmesi | $\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}}$, Çekme ve burkulma analizlerinde kullanılan hesaplama | MPa |
| | Darbe Sonrası Basma Dayanımı (CAI) | $\sigma_c = \frac{F_c}{A}$, Darbe sonucu kusurları olan malzemenin basma dayanımı | Pa |

*Kaynak: Zhang & ark., 2024*

*Tablo 8: Mikroyapı analizleri ve açıklamaları*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Mikroyapı Analizleri | Elyaf Hacim Oranı | $V_f = \frac{V_{fiber}}{V_{total}} \times 100,$ Numunede elyaf miktarının toplam hacme oranı | % |
| | Boşluk Oranı | $V_f = \frac{V_{por}}{V_{total}} \times 100,$ Malzemede bulunan boşluk | % |

*Kaynak: Zhang & ark., 2024*

*Tablo 9: Kimyasal ve çevresel direnç testleri*

| Test Kategorisi | Metrik | Formül ve Açıklama | Birim |
|---|---|---|---|
| Kimyasal ve Çevresel Direnç | Korozyon Hızı | $CR = \frac{K.\Delta W}{A.T},$ Malzemenin korozyon koşulları altında bozulma hızı | Mm/yıl |
| | Suya Dayanıklılık | $WA = \frac{M_{wet} - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100,$ Malzemenin su emme kapasitesi | % |
| | Kimyasal Dayanıklılık | $D = \frac{\Delta M}{M_0} \times 100,$ Malzemenin belirli bir kimyasal ortama karşı gösterdiği dirençle ölçülür | % |

*Kaynak: Zhang & ark., 2024*

## 2.5. Değerlendirme

Termoplastik kompozit malzemeler, günümüzde sürdürülebilirlik, geri dönüştürülebilirlik ve üstün performans özellikleriyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık, otomotiv, inşaat, denizcilik, spor ekipmanları ve yenilenebilir enerji gibi farklı endüstrilerde sağladıkları avantajlar,

bu malzemelerin teknolojik ilerlemenin önemli bir parçası olduğunu göstermektedir. Termoplastik matrislerin tekrar şekillendirilebilirliği, üretim süreçlerini hızlandırırken çevresel etkileri de azaltmaktadır. Bu durum, özellikle günümüz dünyasında çevreye duyarlı malzeme kullanımını ön plana çıkaran sürdürülebilirlik yaklaşımlarını desteklemektedir. Yapılan analizler, termoplastik kompozitlerin termoset kompozitlere kıyasla birçok avantaj sunduğunu göstermiştir. Özellikle darbe direnci, çatlama dayanıklılığı ve uzun ömürlü kullanım potansiyelleri ile dikkat çeken termoplastik kompozitler, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet kombinasyonu sayesinde yakıt tasarrufu ve emisyonun düşmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, biyobozunur termoplastiklerin ve kendinden güçlendirilmiş kompozitlerin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Son yıllarda, ileri üretim yöntemleri ve yeni yüzey işleme teknikleri ile termoplastik kompozitlerin mekanik ve kimyasal özellikleri optimize edilmiştir. Örneğin, plazma işleme ve mikroyapısal modifikasyon gibi yenilikçi yaklaşımlar, yapışma performansını artırmakta ve malzemenin dayanıklılığını güçlendirmektedir. Ayrıca, hibrit kompozit sistemler ve 3D yazıcı gibi yenilikçi üretim yöntemleri, malzeme israfını azaltırken özelleştirilebilir ve karmaşık yapıların üretimini mümkün kılmaktadır. Havacılık sektöründe, termoplastik kompozitlerin hafifliği ve yüksek mekanik dayanımı, uçak yapılarında daha güvenli ve verimli çözümler sunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde, termoplastik kompozitler yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir ulaşıma katkı sağlamaktadır. İnşaat sektöründe ise bu malzemeler, uzun ömürlü ve dayanıklı yapılar oluşturarak maliyet etkin çözümler sunmaktadır. Spor ekipmanları, tıbbi cihazlar ve yenilenebilir enerji uygulamaları gibi diğer sektörlerde de termoplastik kompozitlerin artan kullanımı, bu malzemelerin çok yönlülüğünü ve üstün performansını vurgulamaktadır.

Termoplastik kompozitlerin kullanımının artmasıyla birlikte, karşılaşılan bazı teknik ve üretim zorlukları da dikkat çekmektedir. Özellikle yüksek viskozite ve karmaşık birleşim süreçleri, bu malzemelerin işlenmesini zorlaştırabilmektedir. Ancak, gelişen teknolojiler ve yenilikçi mühendislik çözümleri, bu sorunların üstesinden gelmekte etkili olmaktadır. Gelecekte, termoplastik kompozitlerin daha geniş bir uygulama alanına yayılmasını sağlamak için yüzey işleme yöntemlerinin, hibrit malzeme sistemlerinin ve yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, termoplastik kompozit malzemeler, çevresel sürdürülebilirlik ve mühendislik uygulamalarındaki geniş potansiyelleri ile geleceğin malzemesi olarak kabul edilmektedir. Bu alandaki yenilikçi çalışmalar, termoplastik kompozitlerin performansını ve kullanım alanlarını daha da geliştirecek, endüstriyel ihtiyaçlara uygun çözümler sunarak teknolojik ilerlemeyi destekleyecektir.

## 3. Termoplastik Kompozit Rod Üretim Yöntemleri

Bu bölümde genel açıklama yapılacak, sonra termoplastik kompozit rod üretimi süreci açıklanacak, daha sonra literatürdeki ilgili çalışmalar incelenecek ve son olarak da bölümün değerlendirilmesi yapılacaktır.

Termoplastik kompozitlerden rod üretimi, genellikle elyaf takviyeli termoplastik malzemeler kullanılarak yapılan bir üretim sürecidir. Bu tür rodlar, özellikle dayanıklı, hafif, korozyona dayanıklı ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılır. Termoplastik kompozit rodları, cam elyafı, karbon elyafı veya aramid elyafı gibi güçlendirme malzemeleriyle takviye edilmiş termoplastik polimerlerden üretilir. Bu rodlar genellikle havacılık sektöründe, boru hatları, elektriksel yalıtım, otomotiv ve inşaat sektörlerinde kullanılır. Özellikle dokumalı termoplastik kompozitlerin boru üretiminde kullanımı, üretim sürecindeki karmaşıklık nedeniyle önemli bir zorluk oluşturur. Liflerin matrisle homojen bir şekilde birleşmesini sağlamak, yüksek kaliteli bir malzeme elde etmek için kritik öneme sahiptir. Bu tür kompozitlerin

üretiminde, liflerin düzgün yerleşimi ve matris ile yeterli bir bağ oluşturması, nihai ürünün mekanik dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bunun yanı sıra, dokumalı yapılar genellikle üretim sürecinde lif kırılması veya deformasyon gibi sorunlarla karşı karşıya kalabilir. Bu zorluklar, üretim maliyetlerini ve süreç optimizasyonunu etkileyebilir. Termoplastik kompozit rodları, hafiflik ve yüksek dayanıklılık özellikleri sayesinde havacılık sektöründe büyük önem taşır. Özellikle uçak kabin yapıları, yük taşıma bölümleri ve iç mekanlarda bu malzemelerin kullanımı yaygındır. Ayrıca, ısı dayanımı ve titreşim sönümleme özellikleri, uçak motorları gibi zorlu koşullarda kullanılmalarını mümkün kılar (Bhudolia & ark., 2020).

### 3.1. Termoplastik Kompozit Rod Üretimi Adımları

1) Malzeme Seçimi:
- Matris Malzemesi: Genellikle polipropilen (PP), poliamid (PA), polietilen (PE), polikarbonat (PC) veya polibütilen tereftalat (PBT) gibi termoplastik polimerler kullanılır. Bu malzemeler, esneklik, dayanıklılık ve yeniden şekillendirilebilirlik gibi özelliklere sahiptir.
- Takviye Edici Lifler: Cam elyafı, karbon elyafı veya aramid elyafı gibi güçlendirici lifler, malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Cam elyafı en yaygın kullanılan takviye elemanıdır ve termoplastik kompozitlerin mukavemetini artırır.

2) Liflerin Hazırlanması:
- Lifler genellikle kısa elyaf veya uzun elyaf şeklinde hazırlanır. Bu lifler, matris polimerine homojen bir şekilde dağılacak şekilde hazırlanır.
- Elyaf oranı (lif-polimer oranı) üretim sırasında dikkatle kontrol edilir çünkü lif oranı, malzemenin son özelliklerini etkiler.

3) Karıştırma:
- Takviye lifleri ve termoplastik matris, özel karıştırma makineleri (örn. twin-screw extruder) kullanılarak birleştirilir. Bu işlem sırasında, lifler ve polimer homojen bir şekilde karışarak kompozit granül haline getirilir.

- Bu granüller, rod üretimi için kullanılacak ana malzemeyi oluşturur.

4) Şekillendirme:
- Termoplastik kompozit malzeme, uygun şekil ve boyutta rod üretmek için çeşitli şekillendirme yöntemlerine tabi tutulur:
- Ekstrüzyon: Granül halindeki kompozit malzeme, bir ekstrüderden geçirilerek istenilen çapa ve şekle sahip bir boru veya rod formu elde edilir.
- Enjeksiyon Kalıplama: Daha karmaşık geometriler için enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılabilir.
- Pultrüzyon: Uzun, sürekli formdaki kompozitler için, elyaflar bir matris malzemesiyle birleştirilerek çekilir.

5) Soğutma ve Sertleşme:
- Şekillendirme işleminin ardından, termoplastik kompozit rodları soğutulur ve sertleşir. Soğutma işlemi, malzemenin stabil kalmasını sağlar.
- Soğutma süresi, kullanılan malzemeye ve üretim metoduna bağlı olarak değişebilir.

6) Son İşlemler ve Testler:
- Üretilen rodlar, genellikle son kalite kontrol testlerine tabi tutulur. Bu testler, mekanik özellikler (çekme dayanımı, esneklik), sıcaklık dayanıklılığı, kimyasal direnç ve korozyon testi gibi çeşitli parametreleri içerir.
- Ayrıca, yüzey işleme ve son şekillendirme işlemleri de uygulanabilir. Rod uçları düzgünleştirilebilir veya ek koruyucu kaplamalar eklenebilir (Talabi & ark., 2024).

Termoplastik kompozit rodların avantajları:
- Hafiflik: Metal rodlara göre çok daha hafif olup, hava araçlarında faydalı yük kapasitesine katkı yapar, taşıma ve montajda kolaylık sağlar.
- Yüksek Dayanıklılık: Kompozitlerin takviye lifleri, rodları yüksek çekme, basma ve darbeye karşı dayanıklı hale getirir.
- Korozyon Direnci: Metal olmayan yapıları sayesinde, korozyona karşı dirençlidir. Bu, özellikle su altı uygulamaları, denizcilik, kimyasal endüstriler ve inşaatta büyük avantaj sağlar.

- İyi Isı Direnci: Termoplastik kompozitler, yüksek sıcaklıklara dayanabilir, bu da onları otomotiv ve havacılık endüstrisi için uygun hale getirir.
- İzole Edici Özellikler: Elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle, elektrik hatlarında ve elektrikli ekipmanlarda kullanımı yaygındır.

Termoplastik kompozit rodların kullanım alanları:
- Otomotiv: Araçlarda motor parçaları, soğutma hatları, iç yapılar gibi uygulamalarda kullanılır.
- Elektriksel Uygulamalar: Elektrik kabloları, izolasyon hatları ve elektrikli ekipmanlarda tercih edilir.
- Boru Hatları ve Altyapı: Kimyasal, gaz, su taşıyan boru hatları ve kanalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.
- Havacılık ve Uzay: Hafiflik ve dayanıklılığı nedeniyle uçak bileşenlerinde, özellikle iç yapılarında yer alır.

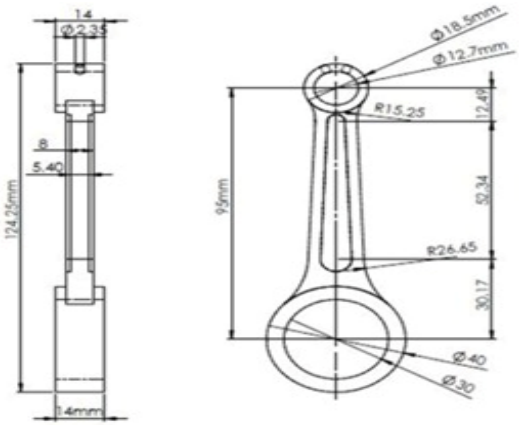
Termoplastik kompozit rod üretimi, bu malzemelerin hafifliği, dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci sayesinde özellikle zorlu koşullarda ve endüstriyel uygulamalarda yüksek talep görmektedir (Bhudolia & ark., 2020).

### 3.2. İlgili çalışmalar

Termoplastik kompozitler, hafiflik ve yüksek mukavemet özellikleriyle havacılık ve uzay endüstrisinde önemli bir yer tutar. Rodlar, bu malzemelerin kullanıldığı kritik elemanlardır. Bu bölümde, termoplastik kompozit rod üretim yöntemleri ile ilgili akademik çalışmalar incelenmektedir.

Farklı malzeme kullanılarak bağlantı rodunun tasarımı ve statik yapısal analizlerinin yapıldığı bir çalışmada (Şekil 18) bağlantı rodlarında çelik yerine karbon elyaf, bakır, gri dökme demir, çinko, alüminyum ve titanyum gibi malzemeler kullanılmıştır. Bu çalışmada rodların ağırlıklarını azaltırken performansının artırılması hedeflemiştir. Standart boyutlardaki rodlar, dayanım ve rijitlik kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Statik yapısal özellikler (Von-Mises gerilmesi, gerinim, deformasyon, emniyet faktörü ve burkulma analizi), ANSYS Workbench yazılımı kullanılarak sonlu

elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir (Kumar, Prabhakar & Paswan, 2023).



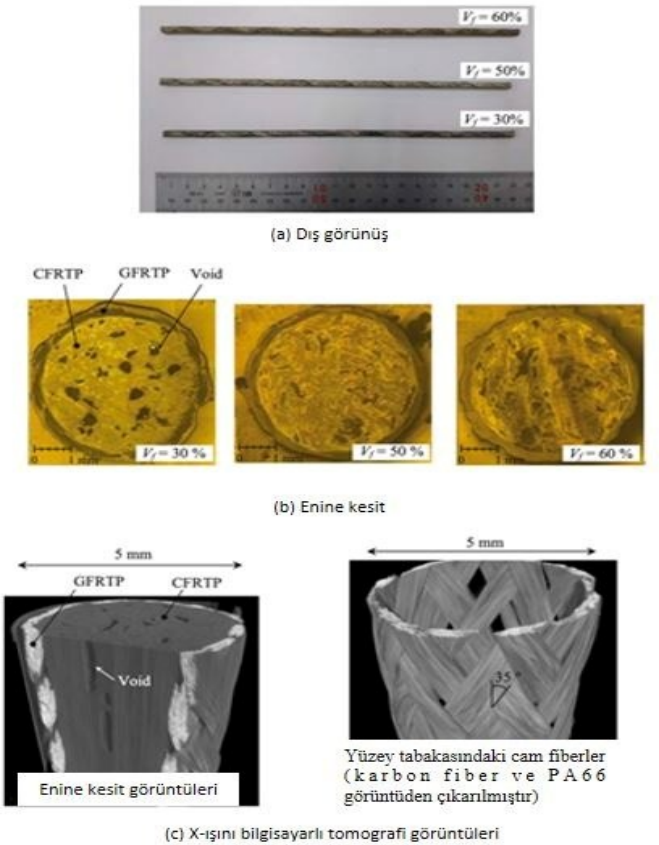

*Şekil 18: Bağlantı rodunun tasarımı*
*Kaynak: Kumar, Prabhakar & Paswan, 2023*

Şekil 19'da termoplastik kompozit bağlantı rodu tasarımları gösterilmektedir. Tasarım, küçük uç duvar kalınlığının ve merkez genişliğinin artırılması gibi geometrik optimizasyonlarla desteklenmiştir. Sonlu elemanlar analiziyle muadilinden %78 daha hafif rodlar tasarlanmıştır (Vaidya & ark., 2023).

*Şekil 19: Termoplastik kompozit bağlantı rodu tasarımları*
*Kaynak: Vaidya & ark., 2023*

Şekil 20'de hafif ve korozyona dayanıklı elyaf takviyeli termoplastik perçin gösterilmiştir. CFRP malzemelerin birleştirilmesi için elyaf takviyeli termoplastik (FRTP) ile hafif, korozyona dayanıklı bir perçin tasarlanmıştır. Tasarım ile FRTP perçin, cam elyaf/PA66 ve karbon elyaf/PA66 karışık elyafların örgü tekniğiyle üretilip pultrüzyon yöntemiyle çubuğa dönüştürülmüştür. CFRP laminatlar, FRTP perçinle termal şekillendirme yöntemiyle birleştirilmiştir. FRTP perçinin elyaf hacim oranı arttıkça bağlantı dayanımı yükselmiş ve metal bağlantılara göre daha yüksek özgül bağlantı dayanımı elde edilmiştir (Ueda, Uia & Ohtanib, 2018).

Şekil 21'de gösterildiği gibi uçak hidrolik silindirlerinin ağırlığını azaltmak için metal astarsız CFRP boruları tasarlanmış ve test edilmiştir. Mekanik modelle CFRP parametreleri hesaplanmış, dalga şekilli iç içe geçme yapılarıyla bağlantılar güçlendirilmiştir. Üretim için düşük maliyetli ve hassas bölünmüş üretim-birleştirilmiş kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Testler, prototipin metal astarlı tüplere göre %56,64 daha hafif olduğunu, yüksek basınç dayanımı, düşük sızıntı ve sürtünme sağladığını göstermiştir (Li & ark., 2023).



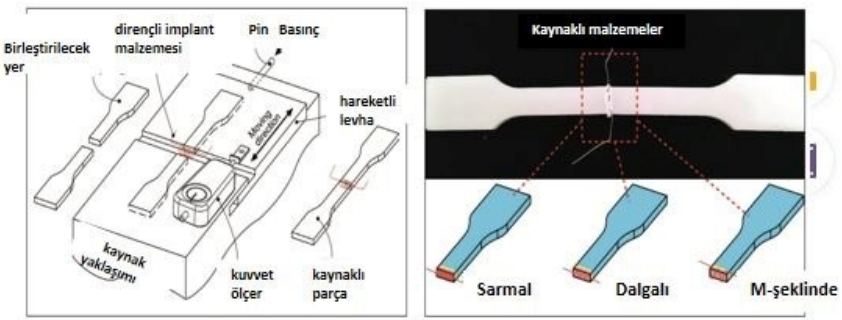

*Şekil 20: FRTP rodlar*

*Kaynak: Ueda, Uia & Ohtanib, 2018*

Havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde polimer ve kompozit malzemelerin birleştirilmesinde direnç kaynaklarının kullanımı artmaktadır. Şekil 22'de polipropilen levhaların direnç implant kaynağının araştırılması ve optimizasyonu süreci gösterilmektedir. Bu çalışmada, direnç implant kaynağı ile birleştirilen enjeksiyon kalıplı PP levhaların mekanik ve morfolojik özelliklerine tel geometrisi (spiral, dalgalı, M-şekilli) ve tel çapının (0,3 mm, 0,5 mm) etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, tel çapı ve geometrisinin kaynak bölgesindeki ısı oluşumunu ve mekanik

performansı belirgin şekilde etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, benzer uygulamalarda rehber olabilir (Bakırıcı, Karagöz & Kaya, 2022).

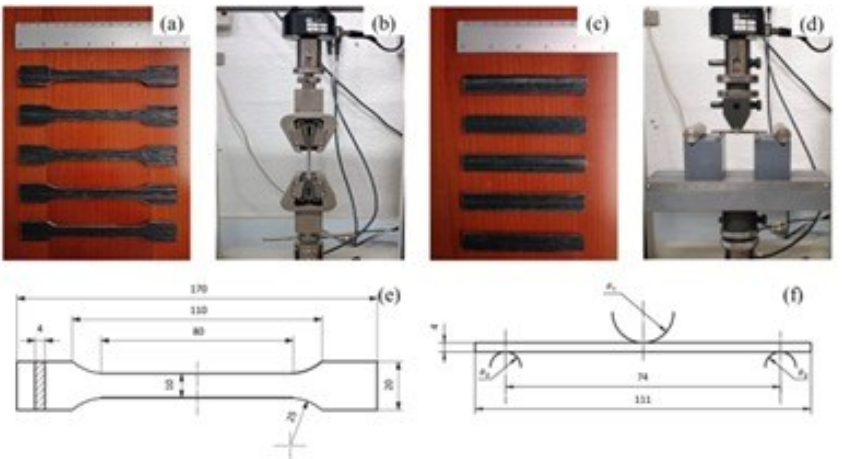
*Şekil 21: Metal astarı olmayan CFRP hidrolik silindir üretimi*
*Kaynak: Li & ark., 2023*




*Şekil 22: sol) Numune kaynak kullanımı için özel şablon. sağ) RIW birleştirmesinden sonra kaynaklı parça görünümü.*
*Kaynak: Bakırcı, Karagöz & Kaya, 2022*

Şekil 23'de, önceden reçinelenmiş cam takviyeli polipropilen şeritlerin pultrüzyon süreci gösterilmektedir. Pultrüzyon hattı, ısıtma/şekillendirme ve soğutma kalıplarından oluşmuştur. Sıcaklık ve çekme kuvveti, termokupl ve yük hücresiyle ölçülmüştür. Mikroskopla yapılan kesit incelemesi, takviyelerin dağılımını ve içsel kusurları değerlendirmiştir. Ürün, %23 elyaf hacim oranı ve sınırlı içsel kusurlarla iyi kalite göstermiştir. Elyaflar, sınırlı şerit

sayısı ve sıkıştırma nedeniyle kesitte homojen olmayan bir şekilde dağılmıştır. Çekme modülü 21,5 GPa, eğilme modülü ise 15,0 GPa olarak ölçülmüştür (Tucci & ark., 2023).




*Şekil 23: Polipropilen şeritlerin pultrüzyon süreci*
*Kaynak: Tucci & ark., 2023*

Yapılan güncel literatür incelemeleri son yıllarda termoplastik kompozit rod üretim yöntemlerinin seçimi, tasarımı, performansı, maliyeti, etkileri vb. boyutlarda tartışıldığını göstermektedir. Örneğin; farklı malzemeler kullanılarak üretilen bağlantı rodlarının tasarımı ve statik yapısal analizleri ile ilgili çok sayıda çalışmalar yapıldığı anlaşılmaktadır. Literatürde bağlantı rodlarında çelik yerine karbon elyaf, bakır, gri dökme demir, çinko, alüminyum ve titanyum gibi malzemelerin kullanılması ile ilgili yeterli sayıda çalışmalar mevcuttur. Çelik yerine diğer malzemelerin kullanımı rodların ağırlıklarını azaltırken performansını da iyileştirmektedir. Termoplastik kompozit malzemelerden hafif ve korozyona dayanıklı bağlantı rodları üretim yöntemleri ile ilgili çalışmalara bulunmaktadır. Havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerinde polimer ve kompozit malzemelerin birleştirilmesinde direnç kaynaklarının kullanımı gittikçe artmaktadır. Termoplastik kompozitten üretilen rodların performansı, çekme ve itme dayanıklığı, hizmet ömrü, maliyeti, vb. parametrelerin incelenmesi

ile ilgili çok sayıda çalışmalar bulunmaktadır.

### 3.3. Değerlendirme

Termoplastik kompozit rodları, havacılık ve otomotiv sektörlerinde malzeme mühendisliği açısından büyük bir yenilik sunmaktadır. Karbon veya cam gibi yüksek mukavemetli liflerle güçlendirilmiş bu çubuklar, hem hafiflik hem de dayanıklılık özellikleriyle performansı artırırken maliyetleri düşürme potansiyeline sahiptir. Ayrıca, bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirlik açısından sağladığı avantajlar, endüstriyel uygulamalarda kullanımını daha cazip hale getirmektedir.

Bilimsel araştırmalar, termoplastik kompozitlerin üretim yöntemleri ve malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Örneğin, enjeksiyon kalıplama, otomatik AFP, pultrüzyon ve hibrit üretim yöntemleri gibi süreçlerin termoplastik malzemelerde mekanik dayanım, elyaf dispersiyonu ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğu gösterilmiştir. Sayısal simülasyon ve deneysel doğrulama çalışmaları, özellikle termoplastik kompozitlerin şekillendirme parametrelerinin (örneğin, sıcaklık, şekillendirme hızı) malzeme performansı üzerindeki kritik etkilerini ortaya koymaktadır.

Gelecekte, bu malzemelerin kullanım alanlarının genişlemesi, yeni nesil termoplastik matrislerin geliştirilmesiyle mümkün olacaktır. Örneğin, PAEK ve polieterimid (PEI) gibi yüksek sıcaklık dayanımına sahip termoplastiklerin, uçak ve otomotiv uygulamalarında kullanımı artmaktadır. Ayrıca, elyaf-matris ara yüzündeki bağlanma kuvvetlerini artırmaya yönelik çalışmalar, kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarını optimize etmeye odaklanmaktadır. Bilimsel olarak, sensör teknolojilerinin termoplastik kompozitlerle entegrasyonu, özellikle havacılık uygulamalarında gerçek zamanlı yapısal sağlık izleme (SHM) sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanıyacaktır. Bu tür yenilikler, uçuş güvenliği ve bakım süreçlerinin iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş karbon elyafların ve biyolojik bazlı polimerlerin entegre edilmesi hem

maliyet etkinlik hem de çevresel faydalar açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, termoplastik kompozitlerin modern mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ve bu malzemelerin gelecek nesil endüstriyel çözümler için kritik bir rol oynayacağını vurgulamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu teknolojilerin daha da optimize edilmesine ve daha geniş bir uygulama yelpazesine uyarlanmasına odaklanmalıdır. Bu bağlamda, termoplastik kompozit rodlar, sürdürülebilirlik, maliyet etkinlik ve yüksek performansın önemli bir kesişim noktasını temsil etmektedir.

## 4. Termoplastik Kompozit Rod Güncel Uygulamaları

Bu bölümde rod güncel uygulamaları kapsamında önce birleştirme teknolojilerinden bahsedilecek, sonra literatürde yer alan güncel çalışmalar incelenecektir ve son olarak da bölümün değerlendirilmesi yapılacaktır.

### 4.1. Birleştirme Teknolojileri

Termoplastik kompozitlerin yavaş yavaş termoset kompozitlerin yerini almasıyla beraber, birleştirme teknolojileri konusundaki çalışmalar daha da önemli hale gelmiştir. Havacılık endüstrisinin yüksek standardına karşılık verecek kompozit-kompozit ve kompozit-metal birleştirme teknikleri, üzerinde çalışılan kritik konular arasındadır. Termoplastik kompozitler eritilerek tekrar şekil verilebilmesi sayesinde farklı birleştirme teknolojilerinin uygulanabilmesine de olanak sağlamaktadır. Birleştirme kompozit parça üretiminde önemli bir role sahiptir. Geleneksel olarak kullanılan mekanik bağlayıcılar kompozit yapının delinmesi nedeniyle stress konsantrasyonuna ve korozyon problemlerine neden olmakta; yapıştırma yöntemi ise uzun zaman alan yüzey hazırlama işlemleri gerektirmektedir. Termoplastik kompozitlerin kullanımı ile birlikte bu problemleri elimine edecek kaynak teknolojilerinin alternatif olarak uygulanması mümkün hale gelmiştir (Cao & ark., 2023).

Füzyon birleştirme olarak da bilinen kaynak işlemi prensip olarak yüzey hazırlama (gerekmesi halinde), polimer ara yüzeyinin,

fiziksel olarak polimer zincirlerinin birbirine geçmesine neden olacak şekilde belli bir viskoziteye dek ısıtılması ve birleşim konsolidasyonu için polimerin soğutulması basamaklarını içerir. Kaynak kalitesi genellikle otoklav konsolidasyonu veya kalıplama yöntemlerinin kalitesi ile kıyaslanır. Kaynak sırasında, ara yüzeyde polimer zincirleri birbirine karışır ve yüklerin kaynak bölgesine dağıtım kabiliyeti geliştirilir.

Ayarlanabilir rod (adjustable rod), genellikle uzunluklarının veya pozisyonlarının ihtiyaçlara göre değiştirilmesine olanak sağlayan, özel bir tür bağlantı elemanı veya mekanik bileşendir. Bu tür rodlar, genellikle otomotiv, makine mühendisliği, inşaat ve elektronik gibi birçok farklı sektörlerde kullanılır. Ayarlanabilir rodlar, her tür uygulamaya adapte olabilen tasarımlarıyla, belirli bir sistemin yüksek hassasiyetle ayarlanması gereken durumlar için uygundur. Bu tip rodlar, genellikle iki veya daha fazla bileşenden oluşur ve bu rodların genellikle dişli bağlantılar veya vida mekanizmaları kullanılarak uzunlukları değiştirilebilir (Volk & ark., 2021). Ayarlanabilir rodlar özellikler, tipleri, kullanım alanları ve avantajları aşağıda özetlenmektedir.

Ayarlanabilir rod özellikleri:

1) Uzunluk Ayarı: Ayarlanabilir rodlar, bir vida mekanizması veya teleskopik bir yapı kullanarak uzunluklarının değiştirilebilmesine olanak tanır. Örneğin, bir teleskopik roda, iç ve dış boru yapıları vardır ve bu borular birbiri içine geçerek uzatılabilir veya kısaltılabilir.

2) Sıkı ve Güvenli Bağlantı: Genellikle dişli (vida) yapıları, kilitlenebilir bağlantılar sağlamak için kullanılır. Bu, ayarlama işlemi yapıldıktan sonra rodun güvenli bir şekilde sabitlenmesini sağlar.

3) Kullanım Alanlarına Göre Tasarım:

- Otomotiv sektöründe, direksiyon sistemi, süspansiyon ve motor bileşenlerinde ayarlanabilir rodlar kullanılır. Örneğin, direksiyon rod (steering rod), uzunluğu ayarlanarak aracın tekerleklerinin hizalanmasını sağlar.

- Mekanik sistemlerde ise, makinelerin veya robot kollarının doğru pozisyonlarda kalabilmesi için ayarlanabilir rodları kullanılabilir.
- Elektrik ve inşaat sektöründe, uzatılabilir boru hatları veya yapısal elemanlarda yer alabilir.

4) Dönme ve Eğilme Özellikleri: Bazı ayarlanabilir rodlar, sadece uzunluklarını değil, aynı zamanda konumlarını da değiştirebilir. Örneğin, dönme veya eğilme hareketlerine izin veren mekanizmalara sahip olabilirler.

5) Dayanıklılık ve Malzeme Seçimi: Ayarlanabilir rodlar, genellikle dayanıklı metal veya kompozit malzemelerden üretilir. Bu malzemeler, rodların uzun süreli kullanıma ve farklı koşullara dayanıklı olmasını sağlar.

Ayarlanabilir rod tipleri:
1) Vida Tipi Ayarlanabilir Rod:
- Vida ile uzunluk ayarının yapıldığı bir tasarımda, bir tarafında diş açılmış bir bağlantı parçası ile diğeri arasındaki mesafe istenilen şekilde değiştirilebilir. Bu tür rodlar, genellikle daha hassas ayarlamalar gerektiren yerlerde kullanılır.

2) Teleskopik Ayarlanabilir Rod:
- İç içe geçmiş bir yapıya sahip olan bu tür rodları, teleskopik bir yapı ile uzunluk değişimi sağlar. Çoğunlukla hafif ve kompakt yapılarıyla, taşınabilirlik veya esneklik isteyen uygulamalarda tercih edilir.

3) Bilyalı ve Pinyon Sistemli Ayar Mekanizması:
- Bazı ayarlanabilir rodları, bilyalı ve pinyon dişli sistemleri ile hassas bir pozisyon ayarı sunar. Bu tür tasarımlar, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren mekanizmalarda kullanılır.

4) Kilitli Ayarlamalar:
- Birçok ayarlanabilir rod, ayar yapıldıktan sonra, sabitlenmesini sağlamak için kilit mekanizmalarına sahiptir. Bu, rodun hareket etmesini engeller ve stabilite sağlar.
Ayarlanabilir rod kullanım alanları:
- Otomotiv: Direksiyon sistemlerinde, süspansiyon bağlantılarında, fren sistemlerinde ve şasi ayarlarında.

- Makine ve Robotik Sistemler: Endüstriyel robot kollarında, konveyör sistemlerinde veya makinelerde pozisyon ayarları yapmak için.
- Elektronik: Anten ayarları, sinyal yönlendirme sistemlerinde veya hassas ölçüm cihazlarında.
- İnşaat ve Yapı: Yapısal elemanlar arasında uzunluk ayarı gereken durumlarda (örneğin, destekler, taşıyıcılar, borular).
- Tarım ve Bahçe Aletleri: Çeşitli aletlerde, örneğin sulama sistemleri veya dikey yönlendirme ayarlarında (Podara & ark., 2024).

Ayarlanabilir rodların avantajları:
1) Esneklik: Uzunluk veya pozisyon değişikliğine imkân vererek, çok çeşitli uygulama ihtiyaçlarına adapte olabilirler.
2) Yüksek Hassasiyet: Özellikle mekanik sistemlerde, hassas ayarlamalar yapmak için idealdir.
3) Kullanım Kolaylığı: Kullanıcılar, hızlı bir şekilde uzunluk veya pozisyon ayarı yapabilir, bu da operasyonel verimliliği artırır.
4) Dayanıklılık: Güçlü malzeme ve tasarımlar sayesinde, ayarlanabilir rodları uzun ömürlüdür ve zorlu koşullara dayanıklıdır (Diniță &., 2023).

Ayarlanabilir rod, her türlü mekanik sistemlerde, özellikle uzunluk, pozisyon veya açı ayarlarının gerektiği durumlarda kullanılan esnek ve dayanıklı bir bağlantı elemanıdır. Bu rodları, birçok endüstriyel uygulamada önemli bir rol oynar ve yüksek hassasiyet gerektiren ayarlamalar için idealdir.

### 4.2. İlgili Çalışmalar

Termoplastik kompozit rod üretimi, modern mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu bölümde, bu teknolojinin mevcut araştırmalar, yenilikçi üretim yöntemleri ve endüstriyel uygulamalardaki gelişmeleri ele alınmıştır.

Mühendislik karbon elyaf termoplastikleri, 14.000 N yataklama ve 1 mm maksimum sapma tasarım gereksinimi olan kompozit bağlantı rodlarının geliştirilmesinde ve optimizasyonunda kullanılmıştır (Şekil 24). Termoplastik bantların kalıplanması,

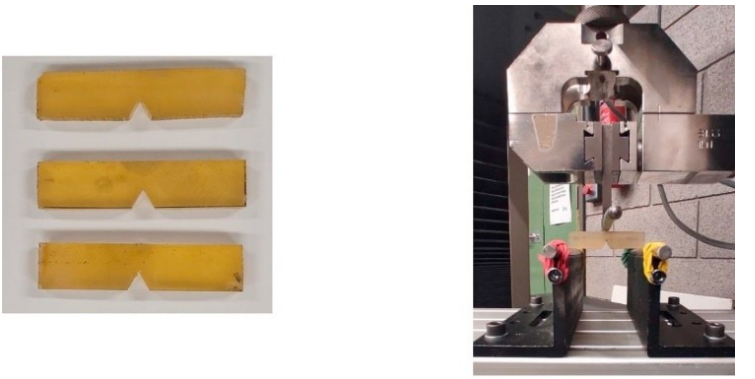
küçük ve büyük uç etrafındaki bant sarım sayısı ve bağlantı çubuğu geometrisi içindeki farklı sarım desenleri açısından araştırılmıştır. Tasarım, küçük ucun duvar kalınlığı ve merkez bölümün genişliği artırılarak bağlantı çubuğunun geometrisi kademeli olarak optimize edilmiştir. Merkez bölüm genişliğinin ve küçük ucun duvar kalınlığının artırılmasını optimize etmek için sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılmıştır. Optimize edilmiş kompozit bağlantı rodunun çelik bağlantı rodlara göre %78 daha hafif olduğu değerlendirilmiştir (Vaidya & ark., 2023).

*Şekil 24: Termoplastik kompozit bağlantı rodu*
*Kaynak: Vaidya & ark., 2023*

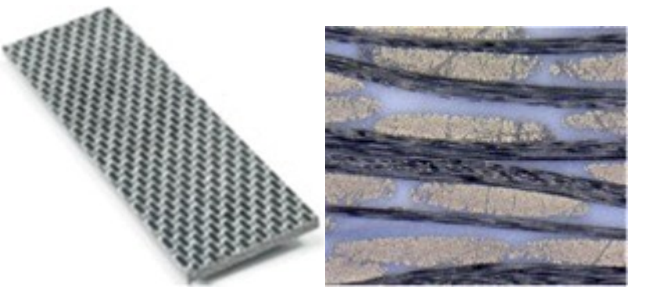
2023 yılında yapılan bir çalışmada cam elyaflarla takviye edilmiş termoplastik kompozit reçinenin mod I çatlama dayanıklılığı değerlendirilmiştir. İlk olarak saf reçine karakterize edilip, üç farklı panel seti test edilmiştir: 1) işlenmemiş cam elyaflar ve termoplastik reçine, 2) UV ile işlenmiş cam elyaflar ve termoplastik reçine, 3) plazma ile işlenmiş cam elyaflar ve termoplastik reçine. Elyaf-matris ara yüzey gücü, itme testi ile ölçülüp, artan yapışma gücü mod I çatlama dayanıklılığında azalmaya yol açmıştır. Şekil 25'te çatlama yüzeylerinin SEM görüntüleri gösterilmiştir (Scarselli & ark., 2023).

CF-PEEK kompozitlerinde oda sıcaklığında ultrasonik frekansta ön çatlak başlatma süreci bir çalışmada değerlendirilmiştir.

20 KHz rezonans frekansına sahip demir bazlı kesici alet kullanılmıştır. Ultrasonik ön çatlama, elyaf katman ayrımı için ilk adım olarak değerlendirilmiştir. Yüksek hızlı kamera ve kızılötesi termografi ile çatlak oluşumu, sıcaklık değişimi ve enerji izlenmiştir. Şekil 26'da gösterilen sonuçlar, salınım genliğinin çatlak derinliği, sıcaklık ve enerji üzerinde kesme kuvvetine göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Ön çatlama, PEEK'in camsı geçiş sıcaklığının altında gerçekleşmiştir (Ragupathi & ark., 2024)



*Şekil 25: Tek kenar çentik testi ve üç nokta eğme testi düzeneği*
*Kaynak: Scarselli & ark., 2023*

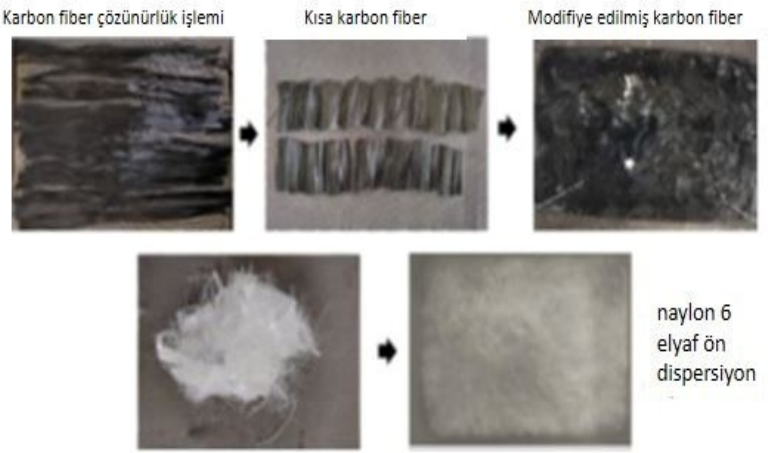


(a) (b)

*Şekil 26: (a) Kesme incelemesi için kullanılan CF-PEEK numunesi ve (b)elyaf yönelimini gösteren mikrograf*
*Kaynak: Ragupathi & ark., 2024*

Şekil 27'de, karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitler (CFRTP) için süspansiyon yöntemiyle ultrason destekli ve çalkalama-tarama yöntemleri kullanılarak karbon ve reçine elyafları

gösterilmektedir. Karbon elyaf uzunluğu 50 mm ve içeriği %30 olduğunda CFRTP'nin en iyi performansı gösterdiği, çekme mukavemetinin 182.1 MPa, eğilme mukavemetinin 354.3 MPa, darbe mukavemetinin 67.2 KJ/m² olduğu tespit edilmiştir. Süspansiyon yöntemi, üretim verimliliğini artırıp maliyeti düşürerek CFRTP üretimi için uygulanabilir bir yöntem olarak önerilmiştir (Li & ark., 2024).

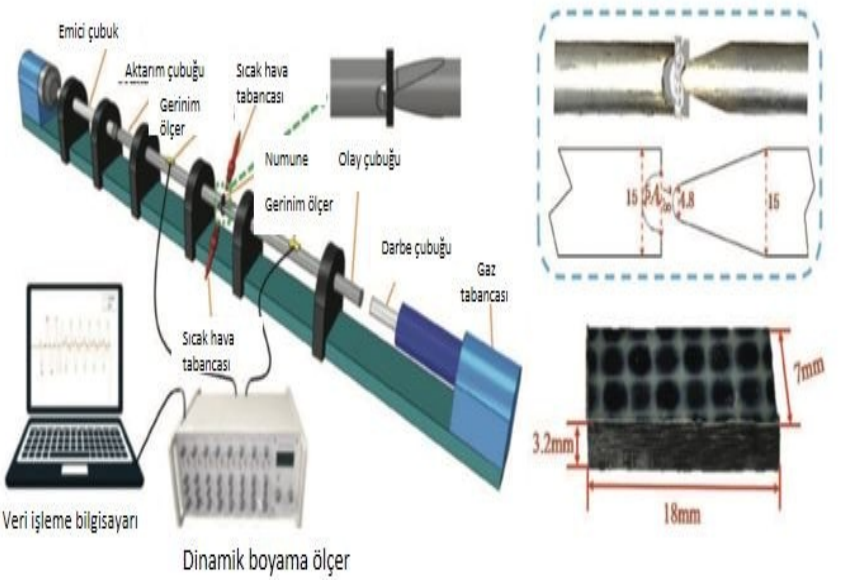



*Şekil 27: Elyaf ön işleminin şematik diyagramı*
*Kaynak: Li & ark., 2024*

Şekil 28'de düz dokunmuş karbon kumaş/polietereterketon (CF/PEEK) termoplastik kompozitlerin farklı sıcaklıklarda (25°C, 120°C, 295°C) yüksek gerinim oranlı darbe yükleri altında katmanlar arası kayma özellikleri ve hasar mekanizmaları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklık kayma modülünü ve tepe gerilmesini azaltırken, kırılma gerilimini artırdığı ve hasar modunun delaminasyondan kayma kırılmasına dönüştüğü tespit edilmiştir. Gerinim oranı arttıkça kayma modülü ve tepe gerilmesinin arttığı, yüksek hızlarda elyaf kırılması, matris çatlaması ve delaminasyon gözlemlenmiştir (Zhang & ark., 2023).

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerde, boşluk oranı optik mikroskop kesit görüntüleriyle eşikleme yöntemiyle

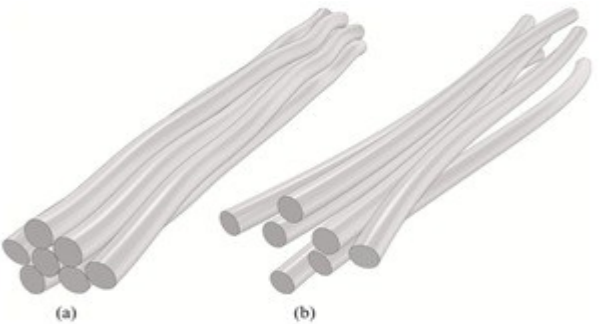
değerlendirilmiştir. Yüksek matris kıvamı nedeniyle liflerin reçinelenmesinde zorluklar yaşandığı ve açık gözenekler oluştuğu tespit edilmiştir. Bu gözenekler, zımparalama ve parlatma sırasında reçine ile doldurulabilir. Bu sorunu aşmak için elyaf dağılımına dayalı bir emprenye kalitesi değerlendirme yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem, Şekil 29'da kümelenmemiş elyafların yüzdesini hesaplayarak emprenye derecesi ve boşluklar hakkında bilgi verir (Elderfield, Cook & Wong, 2024).



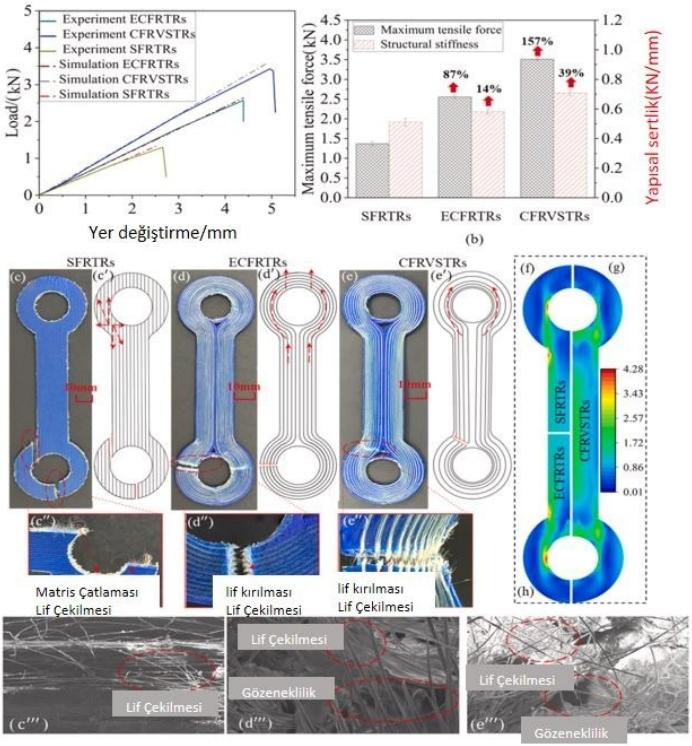

*Şekil 28: Test düzeneğinin şematik diyagramı*
*Kaynak: Zhang & ark., 2023*

Polar koordinat tarama temelli eğrisel elyaf takviyeli değişken sertliğe sahip kompozitlerin optimizasyon ve 3 boyutlu (3B) baskı süreci Şekil 30'da özetlenmiştir. Eğrisel elyaf takviyeli değişken sertliye sahip yapıların (CFRVSSs) 3B baskısı, karmaşık ve hafif bileşenler tasarlamak için yeni fırsatlar sunmaktadır. CFRVSSs için polar koordinat tabanlı bir optimizasyon yöntemi önerilmiş ve elyaf ile stres dağılımı arasındaki tutarlılık artırılmıştır. Ayrıca, 3B baskı sürecindeki form hatalarını minimize etmek için

yeni hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntem, yüksek hızlı tren bağlantı rodlarının tasarımında başarıyla kullanılarak, çekme mukavemeti %156 artırılmıştır. Yöntem, mühendislik alanında eğrisel bileşenler için geniş uygulama potansiyeline sahiptir (Guo & ark., 2024).



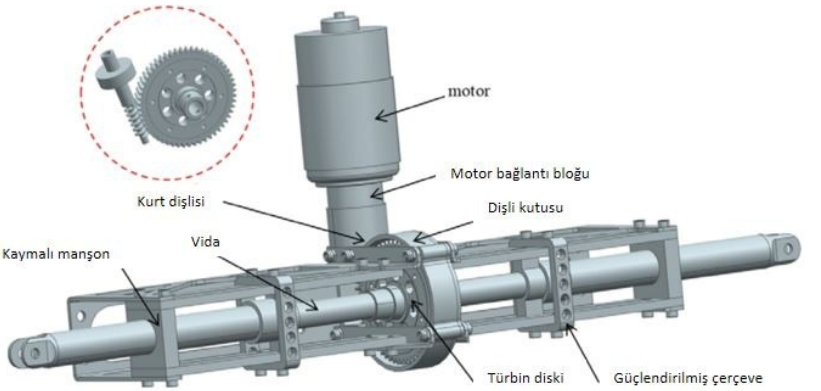

*Şekil 29: Kalıntı gerilimin serbest bırakılması nedeniyle elyaf kümesinin sıkışmasının bozulması*
*Kaynak: Elderfield, Cook & Wong, 2024*




*Şekil 30: Eğrisel elyaf takviyeli değişken sertliye sahip kompozitlerin optimizasyon tasarımı ve 3 boyutlu baskı süreci*
*Kaynak: Guo & ark., 2024*

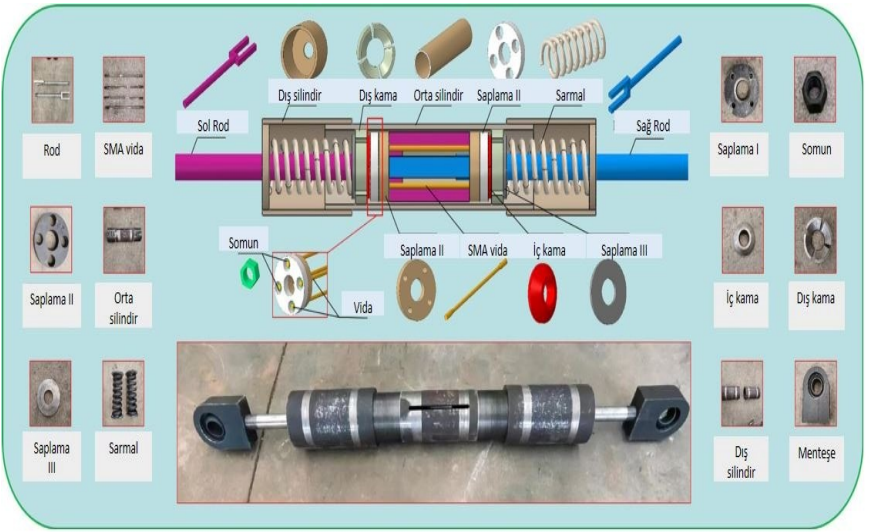
Esnek değişken eğilme kanadının tasarımı ve kuru rüzgar tüneli testi ile ilgili yapılan çalışmada kanat deformasyonunun uçuş görevleri ve ortamlarına göre optimize edilmesi araştırılmıştır (Şekil 31). Bükülme deformasyonu yapmak için esnek bir yüzey, girintili yapı ve itici mekanizma geliştirilmiştir. Kanat yüzeyinin pürüzsüz kalması için yüzey yapısı optimize edilmiştir. Ayrıca, kanat deformasyonu için mekanik bir rod tasarlanmış ve DC motorla tahrik edilmiştir. Bu rod, kanat yüzeyinin ön ve arka kenarlarını bükmek için motorun yönünü değiştirir. Simülasyonlar ve analizler, kanat deformasyonunun aerodinamik etkilerini değerlendirmiş ve test

sonuçları, aerodinamik performansın simülasyonla uyumlu olduğunu göstermiştir (Xu & ark., 2023).



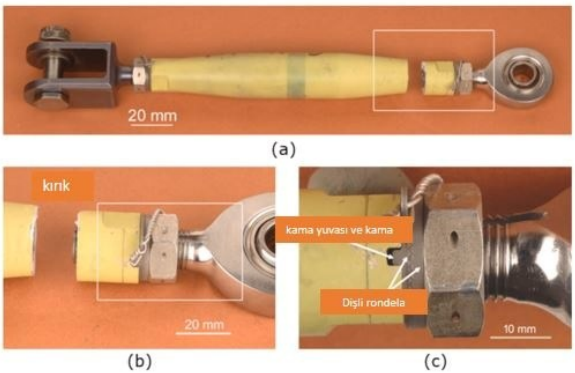

*Şekil 31: Tahrik itme rodunun şematik diyagramı*
*Kaynak: Xu & ark., 2023*

Şekil hafızalı alaşım (SMA) ve değişken sürtünme cihazı ile donatılmış çift sistemli, kendi kendine merkezlenen enerji dağıtıcı bir rodun deneysel, matematiksel modeli geliştirilmiş ve simülasyonu yapılmıştır (Liu & ark., 2023). SMA, sismik dirençli cihazlarda ilgi görmektedir ancak düşük enerji yayılım kapasitesi ve güvenilirlik uygulama alanlarını sınırlamaktadır. Çalışmada önerilen kendine merkezlenen enerji dağıtıcı (SCED) rod sistemi Şekil 32'de gösterilmiştir. Yapılan araştırma, yeni çift sistemli SCED cihazının mevcut SMA desteklerinin ve sönümleyicilerinin eksikliklerini telafi ettiğini ve kama blok sistemini ana enerji dağıtıcı sistem olarak ve SMA sistemini ana kendi kendine merkezlenebilen sistem olarak kullanmanın çok umut verici ve önerilen bir kendi kendine merkezlenebilen enerji dağıtıcı cihaz olduğunu göstermektedir.



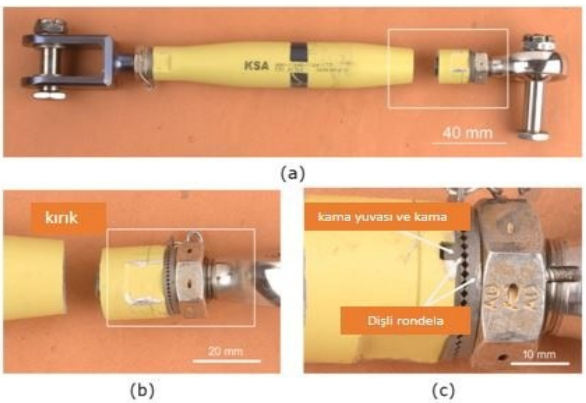

*Şekil 32: Çift sistemli SCED rodunun ayrıntılı görünümü*
*Kaynak: Liu & ark., 2023*

Şekil 33 ve Şekil 34, bir helikopter türünde kazalara neden olan iki kontrol rodunun arızalarını göstermektedir. Kontrol rodları, bir ucunda çatal ve diğer ucunda küresel bir yatak (küresel mafsal) bulunan 2024 Al alaşımlı borulardan yapılmıştır. Fiziksel görünüm açısından, kontrol rodlarında meydana gelen arızalar birbirine benzer olup küresel mafsaldaki Al alaşımlı boruda kırıktan kaynaklanmıştır. Yapılan fraktografi çalışması, her iki durumda da küresel mafsal saplamasındaki 1./2. dişe karşılık gelen Al alaşımlı borulardaki iç diş köklerinde bir sektör üzerinde çoklu yorulma çatlaklarının başladığını doğrulamıştır. Daha sonra boru duvarına ilerleyerek çevresel yönde yayıldığını göstermiştir. Çatlak ilerledikçe boruların yük taşıma kapasitesi azalmış ve operasyonel yük altında nihai kırılma meydana gelmiştir. Arızaların yeri ve mekanizması benzer olsa da temel nedenleri farklıdır. Bir vakada, çatlak oluşumu diş üretimindeki kusurdan; diğerinde ise küresel mafsaldaki yanlış montajdan kaynaklanmıştır (Madan & ark., 2024).




*Şekil 33: (a) Kırık bölgesi, (b) (a)'da işaretlenen bölgenin kırık yerini gösteren büyütülmüş görüntüsü ve (c) düzeneğin yakın görüntüsü*

*Kaynak: Madan & ark., 2024*




*Şekil 34. (a) Kırık bölgesi, (b) (a)'da işaretlenen ve kırık yerini gösteren bölgenin büyütülmüş görüntüsü ve (c) düzeneğin yakın görüntüsü*

*Kaynak: Madan & ark., 2024*

Yapılan güncel literatür incelemeleri son yıllarda termoplastik kompozit rodların farklı sektörlerde farklı uygulamalarda kullanıldığını göstermektedir. Örneğin; belirli şartlarda ve ortamlarda hareketin iletilmesi amacıyla geliştirilen bağlantı rodlarının farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı

anlaşılmaktadır. Literatürde termoplastik kompozit malzemelerden üretilmiş rodların uygulama ortamlarına görevlerini güvenilir ve yüksek performansla yapmalarını garantileyecek test süreçleri geniş bir şekilde ele alınmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda termoplastik kompozit malzemelerden üretilen rodlarda meydana gelen arızalar incelenerek önerilerde bulunulmuştur. Yapılan akademik çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde termoplastik kompozit malzemelerden üretilen rodların havacılık, denizcilik ve otomotiv sektörlerindeki farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiş ve gelecekte bu teknolojinin kullanımının diğer sektörlerde de yaygınlaşacağı beklenmektedir.

### 4.3. Değerlendirme

Bu çalışmada, termoplastik kompozit rodların havacılık endüstrisindeki mevcut uygulamaları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen bulgular, bu yenilikçi malzeme sınıfının sunduğu hafiflik, yüksek mekanik dayanıklılık, darbe direnci ve geri dönüştürülebilirlik gibi üstün özelliklerin, havacılık sektöründeki yapısal uygulamalarda kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle uçak kontrol mekanizmaları, uçak gövdeleri, kanat yapıları ve bağlantı elemanlarında, geleneksel metallerin yerini alarak hem performans hem de maliyet avantajları sağlamaktadır.

UV ve plazma gibi yüzey işlemleriyle elyaf-reçine ara yüzey yapışmasının geliştirilmesi ve ultrasonik destekli işleme yöntemlerinin kullanımı, bu malzemelerin performansını daha da optimize etmektedir. Bunun yanında, karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin (CFRTP) yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda öne çıktığı ve sektörde artan sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, termoplastik kompozitlerin yüksek maliyetleri ve yüksek sıcaklıklara duyarlılığı gibi dezavantajları, geniş ölçekli uygulamalar önünde bir engel oluşturmaktadır. Ancak, yeni nesil malzemeler ve üretim teknikleri bu sınırlamaların üstesinden gelinmesi için umut vaat etmektedir. Gelecekteki çalışmalar, üretim maliyetlerini düşürmek, mekanik özellikleri optimize etmek ve

üretim süreçlerini daha verimli hale getirmek gibi alanlara odaklanmalıdır.

Sonuç olarak, termoplastik kompozitler, havacılık sektörünün değişen gereksinimlerine cevap verebilecek, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine katkıda bulunabilecek önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu yenilikçi malzeme sınıfı, daha geniş bir uygulama yelpazesine yayılarak sektörde önemli bir dönüşüm yaratma potansiyeline sahiptir.

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Havacılık sektöründe, birçok rod bileşenine sahip kontrol mekanizmaları giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu rodlar için farklı metal malzemelerin seçimi, kullanım alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Ancak, termoplastik kompozit malzemelerin rodların üretiminde kullanılması rodların ağırlığının azalmasını, dolaysıyla havacılık standartlarında kritik bir parametre olan ağırlıkta azalmayı sağlar. Bu hususu, uçakların yük kapasitesini artırarak termoplastik kompozitleri geleneksel malzemelere kıyasla değerli bir alternatif haline getirmektedir. Termoplastik kompozit rodların ayarlanabilir uzunluk özelliği, montaj sırasında kolaylık sağlamak ve montaj sürecinin verimliliğini artırmakla birlikte çeşitli havacılık uygulamalarına daha iyi uyum sağlama imkanı sunar. Araştırmalar, termoplastik kompozit rodların hafiflik, yüksek mekanik dayanım, darbe direnci ve geri dönüştürülebilirlik gibi üstün özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellikler, havacılık sektöründe performans ve maliyet etkinliğinin önemli olduğu yapısal uygulamalar için gereklidir. Termoplastik kompozit rodlarının havacılık endüstrisindeki değerlendirmeleri, geleneksel metallerin yerini almakta önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu geçiş sürecinde performansın artrırılmasının yanısıra aynı zamanda üretim maliyetinin azaltılmasıda hedeflenmektedir.

Termoplastik kompozit rodların üretim verimliliğini artırmak için yenilikçi imalat yöntemlerinin araştırılması

önerilmektedir. Pultrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi teknikler, üretim verimliliğini ve malzeme özelliklerini optimize etmek için incelenmelidir. Pultrüzyon ve enjeksiyon kalıplama, üretim verimliliğini artıran ve malzeme özelliklerini iyileştiren iki önemli tekniktir. Pultrüzyon, sürekli liflerin reçineyle emprenye edilip şekil verilerek yüksek dayanıklılık ve hafiflik sağlar. Enjeksiyon kalıplama ise karmaşık geometrilerle hızlı üretim yapar, malzeme tasarrufu sağlar ve yüksek verimlilik sunar. Her iki teknik, doğru koşullarda kullanıldığında malzeme özelliklerini optimize edebilir. Ayrıca, termoplastik kompozit malzemelerinin gerçek dünya havacılık koşullarındaki uzun vadeli performansı üzerine araştırmalar yapılması önemlidir. Bu araştırmalar, dayanıklılık, yorgunluk direnci ve çevresel etkiler üzerine odaklanmalı ve uçak bileşenlerinin ömrü boyunca güvenilirliğini sağlamak için gereklidir. Ayrıca, üreticiler ve düzenleyici kurumlar gibi sektör paydaşlarıyla işbirliği yapmak, bu malzemelerin havacılıkta benimsenmesini kolaylaştırabilir. Bu işbirliği, sertifikasyon ve standardizasyon ile ilgili zorlukların aşılmasına yardımcı olacaktır. Son olarak, termoplastik kompozitlerin geri dönüştürülebilirliğine vurgu yapmak, havacılık sektöründe sürdürülebilir uygulamalara yönelik artan talep ile uyumlu olacaktır. Geri dönüşüm programlarının geliştirilmesi ve biyolojik temelli malzemelerin kullanımının teşvik edilmesi, bu kompozitlerin çevresel faydalarını daha da artırabilir. Özetle, termoplastik kompozit malzemelerin havacılık sektörüne entegrasyonu, ağırlık azaltma, performans ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu malzemelerin gelecekteki havacılık uygulamalarındaki potansiyelinden tam anlamıyla yararlanabilmek için devam eden araştırmalar ve işbirlikleri büyük önem taşımaktadır.

## Kaynakça


Abenojar, J., Aparicio, G. M., Butenegro, J. A., Bahrami, M., & Martínez, M. A. (2024). Decomposition Kinetics and Lifetime Estimation of Thermoplastic Composite Materials Reinforced with rCFRP. 1, 109839.

Arquier, R., Sabatier, H., Iliopoulos, I., Régnier, G., & Miquelard-Garnier, G. (2024). Role of the inter-ply microstructure in the consolidation quality of high-performance thermoplastic composites. 1, 111394.

Avcı, R., Çakıcı, U. G., Çetinkaya, B., & Öktem, M. F. (2024). Effect of atmospheric plasma treatment and wet blast on adhesion characteristics of carbon fiber reinforced LM-PAEK thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, *278*, 111394.

Bakırcı, H., Karagöz, İ., & Kaya, M. A. (2022). Investigation and optimization of resistance implant welding of polypropylene sheets. 1, 108480.

Bellamkonda, P. N., Dwivedy, M., & Addanki, R. (2024). Cold Metal Transfer Technology-A Review of Recent Research Developments. *Results in Engineering*, 102423.

Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F., & Islam, A. (2020). Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: a review. *Materials*, *13*(6), 1284.

Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F., & Joshi, S. C. (2020). Damping, impact and flexural performance of novel carbon/Elium® thermoplastic tubular composites. *Composites Part B: Engineering*, *203*, 108480.

Biron, M. (2013). *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*. Oxford, UK: Elsevier.

Cao, Y., Yang, Q., Huang, L., Tian, C., Wang, P., Wang, C., & Cai, K. (2023, May). Research on Deep Hole Machining Based

on Aircraft Landing Gear. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2501, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.

Colwell, J., Halley, P., Varley, R., Heidarian, P., McNally, T., Peijs, T., & Vandi, L. (2024). Self-reinforced biodegradable thermoplastic composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *7*(4), 128.

Costa, A. P. D., Botelho, E. C., Costa, M. L., Narita, N. E., & Tarpani, J. R. (2012). A review of welding technologies for thermoplastic composites in aerospace applications. *Journal of Aerospace Technology and Management*, *4*(3), 255-265.

Diniță, A., Ripeanu, R. G., Ilincă, C. N., Cursaru, D., Matei, D., Naim, R. I., ... & Portoacă, A. I. (2023). Advancements in fiber-reinforced polymer composites: a comprehensive analysis. *Polymers*, *16*(1), 2.

Elderfield, N., Cook, O., & Wong, J. C. (2024). Fiber dispersion as a quality assessment metric for pultruded thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, *275*, 111321.

Gebrehiwet, L., Abate, E., Negussie, Y., Teklehaymanot, T., & Abeselom, E. (2023). Application of composite materials in aerospace & automotive industry. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, *5*(3), 697-723.

Guo, Z., Hou, Z., Tian, X., Zhu, W., Malakhov, A. V., Polilov, A. N., ... & Lan, H. (2024). Optimization design and 3D printing of curvilinear fiber reinforced variable stiffness composites based on polar coordinate sweeping. *Additive Manufacturing*, 104272.

Jin, Z., Han, Z., Chang, C., Sun, S., & Fu, H. (2022). Review of methods for enhancing interlaminar mechanical properties of fiber-reinforced thermoplastic composites: Interfacial modification, nano-filling and forming technology. *Composites science and technology*, *228*, 109660.

Karst, A., Parpaite, T., Bouquey, M., Pelletier, H., Soulestin, J., & Samuel, C. (2024). Synthesis of PEDOT particles and manufacturing of electrically-conductive PEO/PEDOT thermoplastic composites by twin-screw extrusion. 1, 126577.

Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M., Iqbal, M. J., Billah, M., & Chowdhury, M. A. (2024). Advances of composite materials in automobile applications–A review. *Journal of Engineering Research*.

Kumar, D. P., & Paswan, A. K. (2023). Design and Statical Structural Analysis of Connecting Rod Using Different Material. PULKIT KUMAR, PRABHAKAR, ARVIND PASWAN,'Design and Statical Structural Analysis of Connecting Rod Using Different Materials', *IJRAR-International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR),* 10(4), 770-781.

Li, Y., Feng, T., Wang, Y., Zhu, Z., Peng, H. X., Xu, P., & Qin, F. (2024). Real-time evaluating temperature-dependent interfacial shear strength of thermoplastic composites based on stress impedance effect of magnetic fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *176*, 107874.

Li, Z., Wang, J., Wu, A., Liu, T., Wang, P., Wang, M., & Liu, X. (2024). Preparation and properties of hybrid specific length carbon fiber thermoplastic composites by suspension method. *Polymer Composites*, *45*(9), 7991-8004.

Liu, T., Zhu, L., Luo, J., Dong, Y. R., & Li, Z. (2023). Experimental, mathematical model, and simulation of a dual-system self-centering energy dissipative brace equipped with SMA and variable friction device. *Journal of Constructional Steel Research*, *211*, 108219.

Madan, M., Raghavendra, K., Venkatesh, V., Parupalli, H. B., Sujata, M., & Bhaumik, S. K. (2024). Fracture in control rods of helicopters: Same failures but different reasons. 1, 108713.

Mandolfino, C., Cassettari, L., Lertora, E., & Pizzorni, M. (2024). Adhesive bonding of glass-fibre thermoplastic composite: Process optimisation and sustainability analysis using LCA methodology. 1, 107422.

Moghaddam, A., Kumru, B., & Bergsma, O. K. (2024). Recyclable twin matrix composites. *Composites Communications*, *50*, 102010.

Moradi, A., Sun, C., Guan, Z., & Rastegarzadeh, S. (2023). Technology for lateral spreading of fibre bundles for applications in manufacturing thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *167*, 107422.

Okolie, O., Latto, J., Faisal, N., Jamieson, H., Mukherji, A., & Njuguna, J. (2023). Manufacturing defects in thermoplastic composite pipes and their effect on the in-situ performance of thermoplastic composite pipes in oil and gas applications. 1, 110390.

Ozturk, F., Cobanoglu, M., & Ece, R. E. (2024). Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *37*(9), 3084-3116.

Pheysey, J., De Cola, F., & Martinez-Hergueta, F. (2024). Short fibre/unidirectional hybrid thermoplastic composites: Experimental characterisation and digital analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *181*, 108121.

Podara, C., Termine, S., Modestou, M., Semitekolos, D., Tsirogiannis, C., Karamitrou, M., ... & Charitidis, C. (2024). Recent Trends of Recycling and Upcycling of Polymers and Composites: A Comprehensive Review. *Recycling*, *9*(3), 37.

Pourahmadi, E., Ganesan, R., & Shadmehri, F. (2024). Micromechanical characterization of Carbon/PEEK thermoplastic composite material in-situ consolidated by automated fiber placement: Stiffness prediction. *Composites Science and Technology*, *246*, 110390.

Ragupathi, B., & Balle, F. (2024). Characterization of glass-fiber reinforced thermoplastic composite after ultrasonic reconsolidation. 1, 107411.

Resende Lucas, R., Mendonça Sales-Contini, R. D. C., Barbosa Marques, L. F., Reis, J. F., Ramos Moreira Abrahão, A. B., Cocchieri Botelho, E., & Pinto Mota, R. (2024). Characterization of the hybrid joint between AA2024-T3 alloy and thermoplastic composite obtained by oxy-fuel welding (OFW). *AIMS Materials Science*, *11*(3).

RO-RA (2024). Structural Connection Elements and Flight Control Kinematic Functions. (24/12/2024 tarihinde https://www.ro-ra.com/products/rods/#1594320667083-87986bf3-a3b5 adresinden ulaşılmıştır).

Scarselli, G., Quan, D., Prasad, V., Rao, P. S., Hardiman, M., Reid, I., ... & Ivankovic, A. (2023). Mode, I fracture toughness of glass fibre reinforced thermoplastic composites after UV and atmospheric plasma treatments. *Composites Science and Technology*, *236*, 109982.

Shi, L., Ge, R., Tan, N., Duan, X., Chen, J., Zhou, T., & Sun, Z. (2024). Non-contact heating methods of carbon fiber thermoplastic composites based on Joule thermal properties: Optimization and validation. *Carbon*, *219*, 118830.

Siegl, M., Jungbauer, B., Gebhardt, J., Judenmann, A., & Ehrlich, I. (2024). Winding process of fibre-reinforced thermoplastic tubes with integrated tape production through in-situ roving impregnation and infrared consolidation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-24.

Talabi, S. I., Tobin, J., Strom, B., Brownstein, I., Kunc, V., & Hassen, A. A. (2024). Recent and future developments in pultrusion technology with consideration for curved geometries: A review. 1, 110518.

Tucci, F., Rubino, F., Pasquino, G., & Carlone, P. (2023). Thermoplastic Pultrusion Process of Polypropylene/Glass Tapes. *Polymers*, *15*(10), 2374.

Ueda, M., Ui, N., & Ohtani, A. (2018). Lightweight and anti-corrosive fiber reinforced thermoplastic rivet. *Composite Structures*, *188*, 356-362.

Vaidya, U., Ning, H., Janney, M., Mauhar, M., Graham, K., & Streckel, M. (2023). Thermoplastic composite connecting rods. *Composites Part B: Engineering*, *252*, 110518.

Volk, M., Wong, J., Arreguin, S., & Ermanni, P. (2021). Pultrusion of large thermoplastic composite profiles up to Ø 40 mm from glass-fibre/PET commingled yarns. 1, 109339.

Voltz, M. O., Zöllner, O., & Mitschang, P. (2024). Effects of thermoforming parameters and layup on unidirectional reinforced amorphous thermoplastic composite surfaces. 1, 108063.

Wang, G., Wang, F., Wang, H., Fu, R., & Zhou, J. (2024). Study on short fiber reinforcement mechanism for mechanical performance improvement of 3D-printed short-continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Polymer Composites*.

Xu, X. D., Chen, G. G., Li, S., & Lv, T. G. (2024). Design and dry wind tunnel test of progressive flexible variable bending wing. *The Aeronautical Journal, 128*(1323), 1011-1036.

Zhang, J., & Feng, Z. (2024). Design and identification of a double-acting piezoelectric-hydraulic hybrid actuator. *Chinese Journal of Aeronautics, 37*(3), 456-467.

Zhang, X., Pan, Z., Yu, J., Yang, C., & Wu, Z. (2024). Effects of high temperature and strain rate on the impact-induced inter-laminar shear behavior of plain-woven CF/PEEK thermoplastic composites. *International Journal of Damage Mechanics, 10567895241274780*.

## BÖLÜM VIII

# Yüksek Saflıkta Metal Üretim Yöntemleri

**Güven YARKADAŞ**[1]

## 1.Giriş

Teknolojinin ilerlemesi ile malzemelerin yeni özelliklerini keşfederek bu özelliklere dayalı yeni sistemler tasarlıyoruz. Bunun yanı sıra mevcut özelliklerde yüksek performans elde edebilmek için sistem üretiminde kullanılan malzemelerin saflıkları ön plana çıkıyor. Daha saf malzeme daha yüksek performanslı sistemler üretmenin anahtarı durumundadır.

Yüksek saflıkta malzemeler, özellikle elektronik, optik, havacılık, uzay, savunma ve medikal uygulamalarda, malzemeden beklenen performansın yüksek ve güvenirliğin çok önemli olduğu uygulamalarda kullanılırlar. Bu uygulamalardan en önemlileri mikroişlemciler, dedektörler, sensörler, hafıza modülleri, elektronik

[1] Dr. Öğr. Ü. Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, *Termox Metalurji Ltd. Şti., ORCID: 0000-0002-4592-2768

devre elemanları, ledler, sonar radar sistemleri, hassas ölçüm cihazları gibi sistemlerin bileşenleridir.

Mikro işlemeciler, cihazlar ve sensörlerin boyutları küçüldükçe performansları artarak enerji tüketimleri azalmaktadır. Fakat boyutlar küçüldükçe akımın geçtiği kanallarda ya da geçitlerde malzeme kalınlığı birkaç atom kalınlığına kadar düşmüş durumdadır. Bu durumda burada kullanılan malzemelerde istenmeyen bir element ya da izotop ciddi sorunlara neden olabilir.

Yakın zamana kadar kullandığımız uygulamalarda %99 saflık yüksek algılanırken şimdi bazı uygulamalarda %99,9999 gibi saflıklar standart hale gelmiş durumdadır ve daha saf malzemelere ilgi artmış durumdadır.

Önceden geleneksel pirometalurjik ve hidrometalurjik süreçlerle üretilen malzemeler direk olarak ürünlerin üretiminde kullanılıyordu. Şimdilerde hem bu süreçlerde yüksek saflığa ulaşmak için gelişmeler oldu hem de metal üretim süreçlerine yeni prosesler eklendi.

**Yüksek saflıktaki bazı metallerin uygulama alanları:**

Havacılıktan savunmaya, elektronikten sağlık uygulamalarına ileri teknolojini uygulamalarının neredeyse hepsinde yüksek saflıkta metaller kullanılmaktadır. Aşağıda bazı örnekler verilmiştir.

In : ITO targetler, CIGS fotovoltaikler, likit kristal ekranlar,..

Sn : Paketleme malzemesi, devre karları, refrakter malzemeler,..

Ni : Paslanmaz çelik, özel alaşımlar, yüksek sıcaklık malzemeleri,..

Cu : Ses elektroniği, devre kartları, yorulmaya dayanıklı kablolar,..

Co : Manyetik malzemeler, süper alaşımlar, elektronik eleman targetleri,..

Ti : Büyük çaplı devre kartları, dekoratif malzemeler,..

Ga : Yarıiletken malzemeler, işlemciler, potovoltaikler, katalitik yüzeyler,..

Ge : İşlemciler, devre kartları, fotovoltaikler, infrared optik malzemeler,..

Te : Havacılık, nükleer enerji, elektronik,..

Al : Optoelektronik, target malzeme, devre kartı kablolama,(Yu et al., 2021)

Yüksek saflıkta metal eldesi için temelde farklı iki yaklaşım yöntemi mevcuttur. Bunlardan birinde, metalin çok saf bir bileşiği önce kimyasal ve/veya fiziksel-kimyasal işlemlerle hazırlanır. Daha sonra bu bileşik, dikkatlice kontrol edilen koşullar altında doğrudan metale indirgenir. Diğer yaklaşım, "ticari" saflıktaki metale özel rafinasyon tekniklerinin uygulanmasına dayanır. Bu iki yaklaşımın peş peşe kullanılması da mümkündür. Birinci yaklaşımdaki metotlar; (Chase, 1960)

1. Çözünmeyen bir bileşiğin tekrarlanan çöktürülmesi

2. Tekrarlanan yeniden kristalleşme

3. Safsızlıkların komleksleştirici ajanlar kullanılarak çöktürülmesi.

4. Kademeli damıtma ya da süblimleştirme.

5. Çözücü ekstraksiyonu

6. İyon değişimi süreci

Bu yöntemlerle elde edilen yüksek saflıktaki bileşiklerden, sulu çözeltilerin veya erimiş tuzların elektrolizi veya katı, sıvı veya uçucu bileşiklerin kalsiyum, hidrojen, magnezyum, sodyum veya çinko ile indirgenmesi yoluyla yüksek saflıkta metaller elde edilebilir. Halid bileşikleri hidrojenle indirgenebilir. Halidler, karboniller, alkiller ve asetil asetonatlar gibi metallerin uçucu bileşiklerinin termal ayrışması da saf metaller elde etmek için etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. Özellikle, birçok metalin uçucu iyodürleri, metal geri kazanımı için ısıtılmış yüzeylerde ayrıştırılabilir(Chase, 1960).

İkinci yaklaşımda ise ham veya ticari saflıkta metaller bir veya daha fazla yöntemle rafine edilebilir, bunların başlıcaları şunlardır:

1. Ateşte rafinasyon işleminde ergimiş bir banyoda safsızlıkların flakslar kullanılarak oksidasyonu ile cüruf olarak ayrılması.

2. Kademeli damıtma ve distilasyon

3. Van Arkel - De Boer işlemiyle iyodür saflaştırma

4. Elektroliz

5. İndüksiyon, ark, elektron bombardımanı, gibi tekniklerle vakumda ergitme

6. Bölgesel ergitme ile saflaştırma

7. Tek kristal büyütme

8. Katı hal elektro taşınım (Chase, 1960)

Bu bölümde metal üretim süreçlerine yüksek ve ultra saflıkta metallerin üretilmesi için en çok kullanılan metot olan bölgesel ergitme ile saflaştırma tekniğinin detayları verilecektir(Chase, 1960).

**Bölgesel ergitme saflaştırma (Zone melting refining)**

1952 yılında Pfann tarafından metallerin saflaştırılması için geliştirilen metot zaman içerisinde metallerin ve bazı organik ve inorganik kimyasalların(Qi & Li, 2022) saflaştırılmasında en çok kullanılan yöntem oldu (Pfann, 1952) .

Bölgesel ergitme yöntemi ile saflaştırılabilen ve endüstride uygulama alanı bulan elementler ulaşılabilinen saflık derecelerine göre aşağıdaki tablo 1'de verilmiştir.

Bölgesel ergitme saflaştırma yönteminde saflaştırmanın etkinliği birçok proses parametresine bağlıdır. Ergitme tekrar sayısı arttıkça ulaşılabilen saflık derecesi de artar. Farklı safsızlık elementlerinin farklı limitasyonları olmasının yanında genel olarak yöntemin sınırları vardır. Belli bir tekrar sayısından sonra saflaştırma yönteminin limitlerine ulaşılır. Aşağıdaki tabloda endüstride genel olarak metallerin ulaşılabilen saflık dereceleri verilmiştir.

*Tablo 1. Metallerin bölgesel saflaştırma yöntemi ile ulaşılan saflık değerleri.*

| ELEMENT | Al | As | Cd | Cu | Fe | Mg | Ni | Nb | Ga | Si | Sn | Te | Zn | Ag | Ge | In | Ce |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ulaşılan saflık (N) | 9 | 9 | 7 | 10 | 9 | 8 | 7 | 7 | 7 | 9 | 7 | 7 | 7 | 8 | 10 | 7 | 7 |

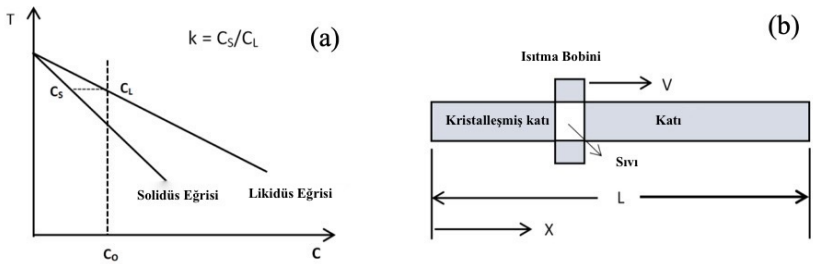
Burada "N" dokuz anlamındadır ve N den önce gelen sayı saflığın derecesini belirleyen 9 ların sayısıdır. Örneğin 10N saflıkta olan germanyumun bölgesel saflaştırma işleminden sonra elde edilen metalde germanyum oranı %9.999.999.999' dur. Yani bu malzemede yaklaşık olarak 10 milyar germanyum atomuna karşılık 1 tane başka elementin atomu vardır(Yu et al., 2021).

Bölgesel eritme saflaştırma; nispeten büyük veya uzun bir katı şarj veya külçenin bir kısmı ergitilerek sıvı bir bölge oluşturulur ve daha sonra ısıtıcı hareket ettirilerek ve geride kalan kısım soğutularak sıvı bölgenin şarjın bir kısmından veya tamamından geçmesin sağlanması ile gerçekleştirilen birkaç farklı metalurjik işleme verilen ortak bir isimdir. Bölgesel eritme teknikleri temel olarak bir katı içindeki çözünebilir safsızlıkların veya fazların dağılımını manipüle etmeyi sağlar ve bu nedenle birçok şekilde kullanılabilir. Bunlardan biri bilinen bir safsızlığın yapıya homojen dağıtılmasıdır. Bu, ergitilmiş bir bölgeyi bir katı içinden hem ileri hem de geri yönde birçok kez ilerletilerek yapılabilir(SHAH, 1980).

*Şekil 1. Solda bölgesel ergitme ile zenginleştirilmiş polikristal germanyum ingot, sağda bölgesel ergitme yöntemiyle safsızlıkların homojen dağıtılması sonucu homojenleştirilmiş tek kristal germanyum ingot(Pfann, 1962).*

Bölgesel eritme rafinasyonu, esasen tek yönlü katılaştırma/segregasyon yoluyla saflaştırma ile aynı mekanizmaya sahiptir. Metal'deki safsızlıkların çözümü çoğunlukla sıvı veya katı halde farklıdır. Katıdaki safsızlık konsantrasyonunun sıvıdakine oranı, sıvı ve solidüs arasındaki sıcaklık değişimleri sırasında yaklaşık olarak sabit kalan denge dağılım katsayısı olarak tanımlanır. Bu değer, farklı safsızlıklar için birden az veya fazla olabilir ve bunların uzaklaştırılmasının zorluk seviyesini gösterir.

Bölgesel ergitme ile saflaştırma işlemi katı bir külçe boyunca bir sıvı bölgesinin veya bir dizi sıvı bölgesinin yavaş tek yönlü hareketiyle gerçekleşir. Isıtıcı elemanın hareket etmesiyle sıvı bölge hareket ettiğinde, sıvı bölgenin önündeki katı, sıvı ve katının erime arayüzünde erir ve sıvı metal, donma arayüzünde katılaşır. Böylece, donma arayüzündeki safsızlıklar sürekli olarak sıvıya veya katıya (dağılım katsayılarına bağlı olarak) atılır. Sonuç olarak metalin bir veya diğer ucunda yoğunlaşırlar; dolayısıyla külçenin geri kalanı kısmen saflaştırılmış olur. Bu işlem çok kez tekrarlanır ve her geçişte katıda saflık biraz daha artar. İstenen saflık seviyesine ulaşmak için birçok geçiş yapılmalıdır. Özet olarak sıvı faz hareket ettikçe safsızlar sıvı fazda çözünüp, birikip taşınarak katının en uç tarafına taşınır(Zhang et al., 2017).




*Şekil 2. a) Safsızlıkları katı ve sıvıda çözünürlük farkları ve denge dağılım katsayısı b) Bölgesel ergitme saflaştırma sisteminin şematik gösterimi(Zhang et al., 2018).*

**Bölgesel saflaştırma sistem çeşitleri ve karşılaştırması:**

Bölgesel saflaştırma sistemleri ilk kullanıldığı 1950' li yıllardan bu yana çeşitlenerek geliştirildi. Onlarca farklı metalin saflaştırılmasında başarılı olarak ticari uygulama alanı buldu.

Elektronik endüstrisinde kullanılan birçok malzeme bu saflaştırıcılardan geçerek istenen spesifikasyonlara ulaşmaktadır.

*Tablo 2: Bölgesel saflaştırma yöntemleri ve karşılaştırması.*

| **Bölgesel saflaştırma sistemi tipi** | **Karakteristiği** | **Avantajları** | **Dezavantajları** | **Uygulamaları** |
|---|---|---|---|---|
| **Yatay bölgesel saflaştırma** | Pota yatay durur, ısıtıcı eleman yatay hareket eder | Yükleme boşaltma kolay, arayüz kolay görülür, | Ekipman büyük yer işgal eder | Çoğu metaller, bazı reaktif metaller hariç |
| **Dikey bölgesel saflaştırma** | Pota dikey durur ve ısıtıcı dikey hareket eder | Ekipman az yer işgal eder | Yükleme boşaltma kolay değil, pota çatlayabilir | Çoğu metaller, bazı reaktif metaller hariç |
| **Yüzen bölgesel saflaştırma** | Pota yok, parça dikey durur, sıvı faz yüzey gerilimi ile yerinde durur. | Kontaminasyon kaynağı az, az yer işgal eder, ısı transferi hızlı | Şarjın yüzey gerilimi yüksek olmalı, küçük şarj boyutu ile düşük kapasite | Silisyum, Tungsten, Zirkonyum, Demir gibi reaktif metaller, |
| **Sürekli bölgesel saflaştırma** | Şarj girişi, ürün ve atık çıkışı var, sitem sürekli çalışır. | Yüksek kapasite, yüksek saflaştırma verimi | Karmaşık tasarım, yüksek maliyet, zor operasyon | Teorik olarak çoğu metal, henüz geliştirme aşamasında, ticari kullanım henüz yok. |

Bugün kullanılan yöntemleri yukarıdaki Tablo 2'de görüldüğü gibi dört temel başlık altında özetleyebiliriz. Saflaştırma maliyetlerinin bilinen tüm yöntemlerde yüksek olması nedeni ile bu alanda en önemli geliştirme hedefi saflıktan taviz vermeden düşük maliyet ve sürekli kitlesel üretimdir.

**Bölgesel ergitme ile saflaştırmayı etkileyen proses parametreleri:**

1. Isıtıcının gücü ve hareket hızı ve ortamın ısıl iletkenliğine bağlı olarak gelişen katı/sıvı arayüzündeki sıcaklık gradyanı, o bölgedeki safsızlıkların mikro ayrışmasını etkiler.

2. Etkin dağıtım katsayısı (k), atındaki safsızlık konsantrasyonunun sıvıdakine oranını temsil eder. Bu faktörün kendisi sıvı/katı arasındaki difüzyon tabakası kalınlığına, bölgenin hareket hızına, her bir kirliliğin difüzyon katsayısına ve ısıtma gücüne bağlıdır.

3. Normalde rafinasyon verimliliğini artırmak için yeterince yavaş tutulması gereken ergimiş bölge hareket hızı düşük tutulmalıdır ancak aynı zamanda çok düşük hızlar her geçiş için zaman tüketimini sonuç olarak proses süresini ve enerji maliyetini artırır.

4. Bölge uzunluğu hem elementlerin nihai dağılımını hem de elde edildiği hızı etkileyen erimiş bölgenin uzunluğudur. Bu uzunluk, ısıtma gücü, bölge hareket hızı, pota ve yükün termal iletkenliği gibi birçok faktörden etkilenir.

5. Sıvı bölge geçişlerinin sayısı. Geçişlerin sayısı yükseldikçe elde edilebilecek maksimum saflığa yaklaşılır(Ho et al., 1996; Rodway & Hunt, 1989; Spim et al., 2000).

Aşağıda bazı metallerin bölgesel ergitme saflaştırma yöntemi ile çalışmaların kısa bir literatür özeti verilmiştir.

**Bakır saflaştırma:**

Dosmukhamedov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada %99,96Cu alaşımından başlayarak bölgesel ergitme saflaştırma yöntemiyle 5N3 (%999993) saflıkta bakır elde etmişlerdir(Dosmukhamedov et al., 2017, 2022). Lalev ve arkadaşları yaptıkları çalışmada argon plazma ısıtıcılı bir bölgesel saflaştırma sitemi kullanarak, Mg, Sn, Cd, Zn gibi elementlerin diğerlerinden daha hızlı uzaklaştırılabildiğini ölçmüşlerdir(Lalev et al., 2009a). Lalev ve arkadaşları yaptıkları başka bir çalışmada hidrojen plazma arkı kullanarak 6N saflıkta bakır üretimini gerçekleştirmişlerdir(Lalev et al., 2009b).

**Silisyum saflaştırma:**

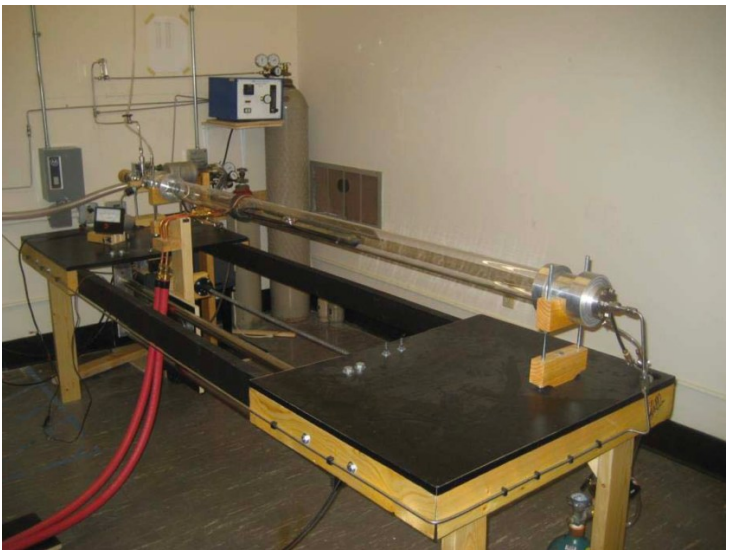
Mei ve arkadaşları metalurjik saflıkta silikon la (%99,85) yola çıkıp iki ergitme geçişi ile elektronik kalitede (6N) e yakın fotovoltaik kalitede silisyum elde etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda 5N7 saflıkta silikon elde etmişlerdir. Kullandıkları bölgesel ergitme sisteminin su soğutmalı bakır potasının sıvı silikonla reaksiyona girmediğini, külçenin kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırdığını gösterdiler. Sıvı bölge ilerleme hızının 10mm/dk dan 1 mm/dk'ya düşürülmesi ile saflaştırma performansının önemli oranda arttığını, bölgesel ergitmede karbon ve oksijenin önemli oranda elimine edilebilmesine rağmen iletkenliği önemli derecede etkileyen B oranını etkin bir şekilde azaltamadığını bulgulamışlardır(Mei et al., 2012).

**Galyum saflaştırma:**

Yüksek saflıktaki galyum ve bileşiklerine olan ilgi, opto-elektronik, uzay mühendisliği ve savunma alanlarındaki artan uygulamalarla ilişkilidir. Ghosh ve arkadaşları dikey bir bölgesel ergitme saflaştırma sistemi kullanarak 4N saflıktaki galyumla başlayarak çok sayıda pas geçerek 6N63 saflıkta galyum elde edebilmişlerdir(Dhar & Ghosh, 2008). Detwiler ve arkadaşları(Detwiler & Fox, 1955) 1955 de galyumun bölgesel ergitme saflaştırma metoduyla saflaştırma çalışmalarını yapmışlar fakat dönem itibari ile saflık derecelerini ölçmek için analitik metotlar çok gelişmediğinden sonuçlar net olarak verilmemiştir. Rambabu ve arkadaşları(Rambabu et al., 2008) 4N/5N galyumu 6N5'e bölgesel ergitme saflaştırma yöntemi ile yükseltebilmişlerdir(Kim, 2018).

**Germanyum saflaştırma:**

Yan ve arkadaşları karanlık madde ve nötrino araştırmalarında kullanılmak üzere ultra saf germanyum üretimini amaçlamışlardır. Ticari germanyum ingotları 5N saflığındadır. 200khz lik tek indüksiyon bobinli yatay bir bölgesel saflaştırma sisteminde yapılan saflaştırma çalışmalarında 7N seviyelerine çıkarak dedektör yapımında kullanılabilecek tek kristal germanyum ingot üretmişlerdir(Yang et al., 2015).



*Şekil3. Yang ve arkadaşlarının germanyum saflaştırma için kullandıkları bölgesel ergitme saflaştırma cihazı (Yang et al., 2015).*

**Alüminyum saflaştırma:**

Yüksek saflıkta alüminyum (5N veya 6N), özel elektronik ve kimyasal uygulamalarda yaygın olarak kullanılır, örneğin elektronik cihazların, entegre devrelerin veya katalizör olarak uygulanacak alüminyum oksit ve alüminyum nitrür gibi sentetik ürünlerinin üretiminde ince filmler ve kaplamalar ve elektronik seramikler için kullanılır. Zhang ve arkadaşları bu çalışmada sıvı bölge hareket hızı ve indüksiyon ısıtma gücünün Al' deki Fe ve Si safsızlıklarının rafine edilmesi üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Düşük hareket hızı (0,8 mm/dak) iyi bir arıtma seviyesiyle sonuçlanmış, ancak yüksek ısıtma gücü (10 kW) üç geçiş uygulanması durumunda tatmin edici olmayan bir verimlik değerleri elde edilmiştir(Zhang et al., 2017). Van ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyumun kristal

büyümesinin ve alüminyumun saflaştırma etkisinin katlanma olgusundan doğrudan etkilendiği göstermişlerdir. Bölge eritme, koruyucu bir atmosfer altında saflaştırma ile karşılaştırıldığında, vakum altında bölge eritme kullanıldığında alüminyum saflığı iyileştirilir ve tane boyutu artar. Bu, katlanma olgusunun oluşumunun koruyucu atmosfer ve vakum altında farklı olduğu ve bunun kristal tanelerinin morfolojisini ve alüminyumun saflığını doğrudan etkilediği ilginç bir keşiftir(Wan et al., 2022).

**KAYNAKLAR:**

Chase, A. (1960). Production_and_Availability_of_Some_High. *Biologia Centrali-Americaa*, *2*, v–413.

Detwiler, D. P., & Fox, W. M. (1955). Purification of Gallium by Zone-Refining. *Jom*, *7*(1), 205–205. https://doi.org/10.1007/bf03377483

Dhar, S., & Ghosh, K. (2008). of GarA Computational Study and Experimental Validation of Zone Refining Process for ultra purification of Gallium. *Trans. Indian Inst. Met.*, 1–3.

Dosmukhamedov, N. K., Fedorov, A. N., Zholdasbay, E. E., & Icheva, Y. B. (2022). Physical and mechanical properties of ultrapure copper obtained by zone melting. *Non-Ferrous Metals*, *53*(2), 25–29. https://doi.org/10.17580/nfm.2022.02.04

Dosmukhamedov, N. K., Zholdasbay, E. E., & Nurlan, G. B. (2017). Ultra-pure Cu obtaining using zone melting: Influence of liquid zone width on impurities' behavior. *Non-Ferrous Metals*, *43*(2), 15–20. https://doi.org/10.17580/nfm.2017.02.03

Ho, C. D., Yeh, H. M., & Yeh, T. L. (1996). Optimal zone lengths in multi-pass zone-refining processes. *Separations Technology*, *6*(4), 227–233. https://doi.org/10.1016/S0956-9618(96)00160-9

Kim, D. (2018). *Ultra Purification of Gallium by Zone Refining*.

Lalev, G. M., Lim, J. W., Munirathnam, N. R., Choi, G. S., Uchikoshi, M., Mimura, K., & Isshiki, M. (2009a). Impurity

behavior in Cu refined by Ar plasma-arc zone melting. *Metals and Materials International*, *15*(5), 753–757. https://doi.org/10.1007/s12540-009-0753-1

Lalev, G. M., Lim, J. W., Munirathnam, N. R., Choi, G. S., Uchikoshi, M., Mimura, K., & Isshiki, M. (2009b). Purification of Cu by hydrogen plasma-arc zone melting and characterization of trace impurities by secondary ion mass spectrometry. *Materials Characterization*, *60*(1), 60–64. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.05.004

Mei, P. R., Moreira, S. P., Cardoso, E., Côrtes, A. D. S., & Marques, F. C. (2012). Purification of metallurgical silicon by horizontal zone melting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *98*, 233–239. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.014

Pfann, W. G. (1962). *Zone Melting*. *135*(3509).

Qi, Y., & Li, J. (2022). Process parameters influence on zone refining and thermodynamics analysis of 1,2-diphenylethane. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *42*, 338–343. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2021.07.021

Rambabu, U., Munirathnam, N. R., & Prakash, T. L. (2008). Purification of gallium from Indian raw material sources from 4N/5N to 6N5 purity. *Materials Chemistry and Physics*, *112*(2), 485–489. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.06.017

Rodway, G. H., & Hunt, J. D. (1989). Optimizing zone refining. *Journal of Crystal Growth*, *97*(3–4), 680–688. https://doi.org/10.1016/0022-0248(89)90571-X

SHAH, J. S. (1980). Zone Refining and Its Applications. In *Crystal Growth* (Second Edition). Pergamon Press Ltd. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-025043-4.50015-5

Spim, J. A., Bernadou, M. J. S., & Garcia, A. (2000). Numerical modeling and optimization of zone refining. *Journal of Alloys and Compounds*, *298*(1–2), 299–305. https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00655-6

Wan, H., Kong, L., Yang, B., Xu, B., Duan, M., & Dai, Y. (2022). Zone melting under vacuum purification method for high-purity aluminum. *Journal of Materials Research and Technology*, *17*, 802–808. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.010

Yang, G., Guan, Y. T., Jian, F. Y., Wagner, M. D., Mei, H., Wang, G. J., Howard, S. M., Mei, D. M., Nelson, A., Marshal, J., Fitzgerald, K., Tenzin, C., & Ma, X. (2015). Zone Refinement of Germanium Crystals. *Journal of Physics: Conference Series*, *606*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/606/1/012014

Yu, L., Kang, X., Chen, L., Luo, K., Jiang, Y., & Cao, X. (2021). Research status of high-purity metals prepared by zone refining. *Materials*, *14*(8). https://doi.org/10.3390/ma14082064

Zhang, X., Friedrich, S., & Friedrich, B. (2017). Investigation of influencing parameters on zone melting refining of aluminium, part one impurities: Iron and silicon. *Proceedings - European Metallurgical Conference, EMC 2017*, *1*(July 2017), 327–334.

Zhang, X., Friedrich, S., & Friedrich, B. (2018). Production of High Purity Metals: A Review on Zone Refining Process. *Journal of*

*Crystallization Process and Technology*, *08*(01), 33–55. https://doi.org/10.4236/jcpt.2018.81003

## BÖLÜM IX

# İleri Teknoloji İçin Gerekli Kritik Elementler Ve Hammaddeler

**Güven YARKADAŞ**[1]

## 1.Giriş

Bir toplumun ekonomik refahı ve gelecek ile ilgili kendini rahat hissetmesi kaynaklarının bolluğu ile ilgilidir. Bu kaynakların en önemlisi tabii ki insan kaynağıdır. İnsan kaynağından sonra sanayi devrimiyle birlikte ikinci önemli kaynak enerji kaynakları olmuştur. Tabi bilgi ve enerji ile yapabileceğiniz şey toprağı topraktaki elementleri ürünlere dönüştürmektir. Kayaçlardaki elementleri yüksek teknoloji ürünlerine dönüştürme yolunda iki şeye ihtiyacınız var; bol ve ucuz enerji ve bilgi birikimi. Enerji fiyatı ürettiğiniz ürünlerin maliyet açısından rekabet edebilirliğini direk olarak etkilemektedir.

[1] Dr. Öğr. Ü. Mersin Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, *Termox Metalurji Ltd. Şti., ORCID: 0000-0002-4592-2768

Ekonomik modellerde hangi parametrelerin önemli olduğunun araştırılması Nobel ödüllerine konu olmuştur. Geçtiğimiz yıllarda Daron Acemoğlu ve arkadaşları bu konuda yaptığı çalışmalarla Nobel ödülüne layık görüldüler. Bu derlemede hedeflenen toplumların zenginliğinin hangi parametrelere bağlı olduğu değil endüstriyel üretimin sürdürülebilir olması için gerekli hammadde kaynaklarının özellikle elementlerden hangilerinin kritik öneme sahip olduğunun araştırılmasıdır.

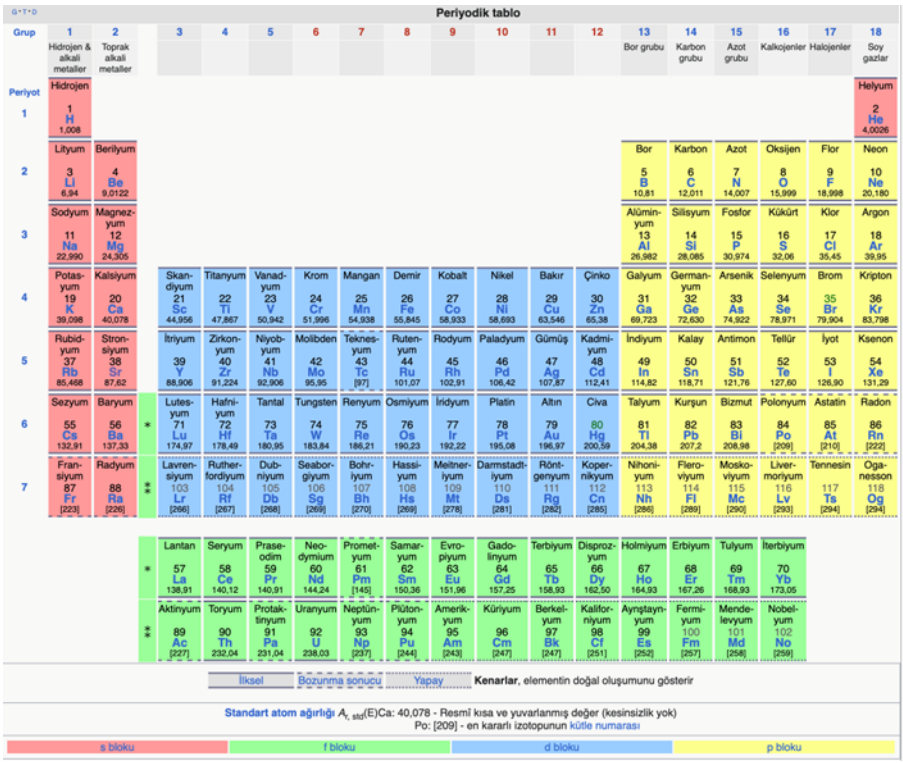
Endüstrileşmiş, sanayi devrimini yaşamış, ihtiyacı olan önemli ürünleri üreten ve önemli bir kısmını ihraç eden ülkelerin sayısı kısıtlıdır. Bu ülkeler sanayi ürünlerini üretirken coğrafyalarının verdiği zenginliğe bağlı olarak bir kısım kaynakları kendi topraklarından sağlarken bir kısmını da ithal etmek ve üretimde kitlesel üretimle rekabet edebilir olabilmek için ürünlerini de ihraç etmek zorundadırlar. Bu zorunluluk uluslararası siyasete ve savaşlara yön vermektedir.

Sanayi üretimi ürünlerin karmaşıklığının az olduğu eski yıllarda demir, bakır, kalay, kömür gibi az sayıda elemente ihtiyaç duyardı. O yıllarda bile bu kaynakların uluslararası paylaşımı sorun olmuş dünya savaşlarının motivasyonunu oluşturmuştur. Savaşları kazanan hakimiyetini ilan edip kaynaklara kolay ve ucuz ulaşırken diğerleri ya ulaşamaz ya da yüksek fiyattan ulaşabilir durumda kalmışlardır. Üstelik siyasi krizlerde bu ulaşabilirlik sürekli tehlike altındadır.

Bugün tüketici ürünleri, elektronik, haberleşme, savunma, otomotiv, enerji, sağlık, havacılık, uzay gibi ana üretim alanlarında kullanılan malzemeler öyle çeşitlenmiş durumdadır ki neredeyse

periyodik cetveldeki tüm elementler kimyasal süreçlerle saflaştırılıp bu ürünlerde kullanılır hale gelmiştir. Geçtiğimiz 200 yılda sadece periyodik cetvelde gösterilen ve yerkabuğunda belirli oranlarda bulunan 92 elementlerin neredeyse hepsi izole edilmiş, birbirinden farklı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden yararlanılarak on binlerce farklı ürün ve tasarım ortaya konulmuştur. Bu elementlerin bir kısmının fiziksel ve kimyasal özellikleri o kadar birbirinden farklıdır ki birçoğunun yerlerinin belir özellikler bakımında diğerleri ile doldurulması mümkün değildir. Bu elementler sanayileşmiş ülkeler tarafından ya doğada bulunduğu cevher ya da zenginleştiril mineral şeklinde ya da çeşitli proseslerden geçirilerek elde edilmiş saf metaller ve alaşımlar şeklinde satın alınmaktadır.

Önceleri sadece, mekanik yüklere dayanım paslanmama gibi birkaç fiziksel özellik yeterli iken şimdi, manyetik, iletkenlik, yarı iletkenlik, optik, korozyona dayanıklılık, yüksek sıcaklıkta dayanıklılık, piezo elektrik özellik, manyeto kalorik özellik, katalitik özellik, biyo uyumluluk… gibi onlarca farklı özellik keşfedilmiş ve bunlara dayalı ürünler geliştirilmiş ve bu ürünlerin çok önemli bir kısmı artık hayati ya da vazgeçilmez hale gelmiştir.




*Şekil 1. Elementlerin periyodik cetveli.[vikipedia]*

Bu elementlerin ya da yerkabuğunda bulunan bileşiklerinin yani minerallerin bazılarının dünya coğrafyasındaki ülkelere dağılımı pek adaletli değildir. Örneğin elektronik sektöründe çok önemli uygulama alanı bulan nadir metaller grubunun önemli bir kısmı Çin topraklarında iken yine yüksek teknoloji ürünlerin üretiminde kullanılan Bor elementinin çok büyük kısmı Türkiye topraklarındadır. Dünyada siyasi istikrarın olduğu dönemlerde bu kaynakların çıkarılıp serbest ticareti yapılmasına rağmen siyasi istikrarın sık sık kesildiğini ya da rekabet nedeni ile bazı kaynakların kısıtlandığını görüyoruz.

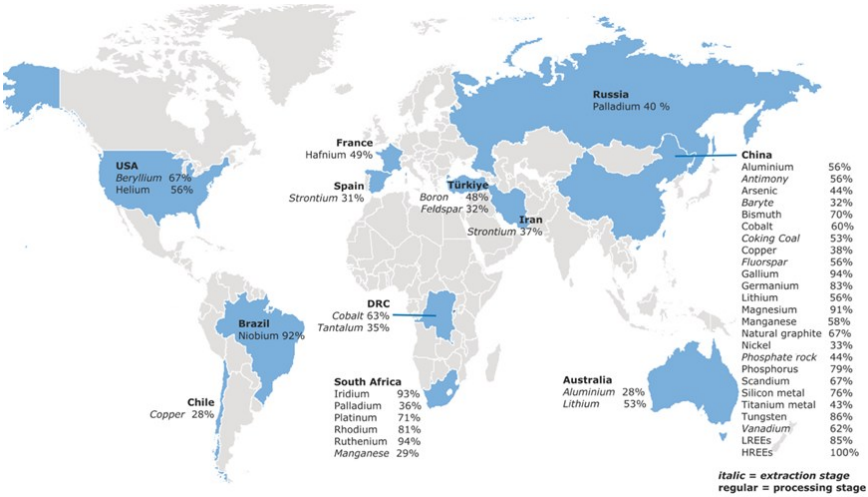
Ülkelerin bu ürünleri üretebilmeleri için artık kaynakların yönetimini çok iyi planlamaları gerekmektedir. Son yıllarda endüstrileşmiş ülkeler ve Avrupa Birliği kritik malzemeler, stratejik malzemeler ya da elementler başlıklı strateji belgelerini sürekli olarak yayınlayıp güncellemeye başlamışlardır.

Genellikle kritik malzemeler ile ilgili raporlarda enerji hammaddeleri yani kömür, petrol ve doğalgaz kapsam dışında tutulur. Günümüzde enerji kaynaklarına çok önemli iki bileşen daha eklenmiştir. Önce eklenen nükleer enerji ve şimdilerde çok önem kazanan yenilenebilir enerji. Nükleer enerji son 50 yılda ABD, Almanya, Japonya, Fransa, gibi ülkelerin ana enerji kalemlerin biri olmuştur. Ve nükleer santrallerin kurulumu için gerekli bilgi birikimi ve ileri teknoloji malzemeleri ve üretim süreçlerinin tıpkı savunma ve uzay sanayisinde olduğu gibi bir lokomotif etkisi olmuştur. Yani nükleer santralleri yapabilmek için biriktirdiğiniz bilgi birikimi teknoloji ürünlerinin üretiminin de yolunu açmıştır.

Nükleer santrallerin sızıntı tehlikesi ve atıkların saklanması gibi konularda getirdiği riskler nedeni ile rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir ve yeşil teknolojilere göre gözden düşmelerinin ya da toplumun bir kısmında istenmemelerinin etkisi ile ve bununla beraber rüzgar ve güneş enerjisi sistemlerinin maliyetlerinin son zamanlarda düşmesinin de etkisi ile rüzgar ve güneş yatırımları çok büyük bir ivme kazanmıştır. Bu enerji çeşitlerinin süreksiz olmaları ve depolama maliyetlerinin hala fazla olmasına rağmen yenilenebilir enerjiye eğilimin artmasına engel olamamaktadır. Bu durum tabi bu sistemlerin üretilmesi için gerekli kritik malzemelere olan talebi de arttırmaktadır.

**Kritik elementler ya da mineraller hangileridir.**

Ülkeler yayınladıkları raporlarda genellikle bu elementleri ya da mineralleri önemleri ve temin edilebilirlikleri bakımından sınıflandırırlar. Avrupa birliğinin kendisi için yayınladığı 2023 raporunda(Grohol, M., 2023) bu konu ile ilgili çok detaylı tespitlere yer verilmiştir bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.




*Şekil 2. Avrupa Birliği'nin (AB) 2023 yılında yayınladığı raporun kapağında kendisi için kritik metal ve hammaddelerin listesi ve bunların temin edildiği yerlerin dünya coğrafyasındaki dağılımı(Grohol, M., 2023).*

AB'nin Kritik Hammaddeler (CRM'ler) değerlendirmesi, AB Hammadde Girişimi'nin (RMI) 2008'in ilk eylemi olarak başlatıldı. Bu AB politikası, AB endüstriyel değer zincirleri ve toplumsal refah için enerji dışı ham maddelerin güvence altına alınması için bir çeşitlendirme stratejisi izlemektedir. Arzın çeşitlendirilmesi, birincil ham maddelerin AB ve üçüncü ülkelerden temin edilmesi, kaynak

verimliliği ve akışı yoluyla ikincil ham madde tedarikinin artırılması ve kıt ham maddelere alternatifler bulunması yoluyla bağımlılıkların azaltılmasıyla ilgilidir(Grohol, M., 2023).

Avrupa birliğinin 2023 yılı raporunda yayınladığı kendisi için kritik ve stratejik hammaddeler listesi aşağıdaki gibidir(Grohol, M., 2023). Bu rapor 2017' den beri bu alanda yapılan periyodik yayınların karşılaştırmalı ve geliştirilmiş bir halidir. Zaman içerisinde önemi artan yeni metaller listeye girmekte fakat listeden ayrılan pek görülmemektedir(Deetman et al., 2017; European Commission, 2018; Grohol, M., 2023; Popov et al., 2021).

**Alüminyum ve boksit:** Boksit alüminyum cevheridir ve Avrupa da birkaç tesiste alüminyuma dönüştürmek için kullanılır. Alüminyum demir-çelikten sonra en çok üretilen metalik malzemedir. Endüstrinin her alanında kullanılmaktadır. Cevherden alüminyum üretiminin en önemli yan ürünü Galyumdur ki bu yine stratejik bir metaldir ve bu metalin tek ticari kaynağıdır(Lu et al., 2017).

**Antimon:** Savunma sanayisinde mühimmat üretiminde, yangın geciktirici, kurşun akülerde alaşım elementi olarak kullanılır. Cevherden pirometalurjik yöntemlerle elde edilir. Önemli rezervlerin bir kısmı Türkiye'dedir(Moosavi-Khoonsari et al., 2022).

**Arsenik**: Yarı iletkenlerde ve alaşımlarda kullanılır.

**Barit:** Barit baryumun mineralidir. Mineral olarak sondaj operasyonlarında ağır mineral olarak kullanılır. Baryum medikal uygulamalarda, radyasyondan korunmada ve kimya alanında kullanılır

**Berilyum:** Elektronik, iletişim cihazları, otomotiv, havacılık ve uzay, savunma, sistemlerinin bileşenlerinde kullanılır.

**Bizmut:** İlaç sanayisinde, sağlık alanında, düşük ergime sıcaklıklı alaşımlarda, roket katı yakıtlarında kullanılır.

**Bor ve boratlar:** NdFeB mıknatısların üretiminde, yüksek performanslı camların üretiminde, gübrelerde, özel alaşımlarda kullanılırlar.

**Kobalt:** Lityum iyon pillerin önemli bileşenlerinden biridir. Süper alaşımlarda, katalizörlerde, çelik alaşımlarında ve SmCo mıknatısların üretiminde kullanılır.

**Kok kömürü:** Çelik üretiminde, karbon fiberlerde, pil elektrotlarında kullanılır.

**Feldspat:** Cam ve seramiklerin üretiminde ve fiber-galss malzemelerin üretiminde kullanılır.

**Florospat:** Demir çelik üretiminde, ısıtma soğutma endüstrisinde, alüminyum üretimi ve birçok metalurjik üretim süreçlerinde kullanılır(Grohol, M., 2023).

**Galyum:** Yarı iletkenlerde ve fotovoltaik hücrelerin üretiminde kullanılır.

**Germanyum:** Optik fiberlerde, infrared sensörlerde, uydu sistemlerinin güneş hücrelerin, katalizörlerde kullanılır(Grohol, M., 2023).

**Hafniyum:** Süper alaşımlarda, nükleer kontrol çubuklarında, refrakter endüstrisinde kullanılır.

**Helyum:** Atmosfer kontrollü sistemlerde, yarı iletkenlerde, MRI cihazlarında kullanır.

**Ağır nadir metaller:** Mıknatıslı motorlarda elektrik üreteçlerinde, elektrikli otomobillerin ve rüzgar santrallerinin motorlarında, led sistemlerinde ve fosforesans bileşenlerde, katalizörlerde, pillerde, cam ve seramiklerde, yarı iletkenlerde kullanılırlar.

**Lityum:** Mobil cihazların ve otomobillerin pillerinde, cam ve seramik endüstrisinde, çelik ve alüminyum endüstrisinde kullanılır(Grohol, M., 2023).

**Hafif nadir metaller:** Mıknatıslı motorlarda elektrik üreteçlerinde, elektrikli otomobillerin ve rüzgar santrallerinin motorlarında, led sistemlerinde ve fosforesans bileşenlerde, katalizörlerde, pillerde, cam ve seramiklerde, yarı iletkenlerde kullanılırlar(Grohol, M., 2023).

**Magnezyum:** otomotiv, havacılık ve elektronik cihazların hafif yapı malzemelerinin alaşımlarında, paketlemede, inşaatta, çelik üretiminde sülfür gidermede kullanılır(M. Pekguleryuz et al., 2013; M. O. Pekguleryuz & Kaya, 2003).

**Manganez:** Demir-çelikte, ve pillerde, ve alüminyum alaşımlarında kullanılır.

**Doğal grafit:** Pil üretiminde ve demir-çelikte refrakter üretiminde kullanılır.

**Niobyum:** Yüksek mukavemetli çelikler ve süper alaşımlarda alaşım elementi olarak, elektronikte kapasitör üretiminde ve süperiletken sistemlerin üretiminde kullanır.

**Platin grup metaller:** Elektronik uygulamalarında, yakıt hücrelerinde ve katalizörlerde kullanılır.

**Fosfat kayası:** Gübre üretiminde ve fosfor bileşiklerinin üretiminde kullanılır.

**Bakır:** Elektrik altyapısında kullanılır.

**Fosfor:** Kimya sanayisinde ve savunma sanayisinde kullanılır.

**Skandiyum:** Düşük yoğunluklu alaşımlarda ve katı oksit yakıt hücrelerinde kullanılır.

**Silisyum:** Yarı iletkenler, fotovoltaikler, elektronik bileşenlerinde ve silikon polimerlerde kullanılır.

**Stronsiyum:** SrFe (siyah mıknatıs) manyetik malzemelerde, alüminyum alaşımlarında, sağlık uygulamalarında ve piroteknikte kullanılır.

**Tantalyum:** Elektronikte kapasitör üretiminde ve süper alaşımlarda kullanılır.

**Titanyum:** Havacılık uzay ve savunma sanayisinde hafif ve yüksek mukavemetli alaşımlarda, medikal uygulamalarda ve asidik ortamda korozyona dayanıklı malzeme olarak kullanılır.

**Tungsten:** Alaşımlarda, aşınmaya dayanıklı bileşenlerde, uçak uzay, savunma sistemleri ve elektrik uygulamalarında, kesici delici takım uçlarında kullanılır.

**Vanadyum:** Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli alaşımlarda ve bunların, havacılık uzay ve nükleer reaktör uygulamalarında ve kimyasal katalizörlerde kullanılır.

**Nikel:** Demir-çelik alaşımlarında, pillerde, otomotiv üretiminde ve süper alaşımlarda kullanılır.

Avrupa birliğinin kritik ve stratejik malzemeler başlığında yukarıda da görüldüğü gibi periyodik cetvelin neredeyse yarısı var. Bunlardan yararlanılan alanlarda elektronikten sağlığa, oradan havacılık uzay ve savunma sanayisine ve tarım gübrelerine kadar neredeyse üretimin tüm alanlarını kapsıyor(Grohol, M., 2023; Lu et al., 2017; Moosavi-Khoonsari et al., 2022).

Sonuç olarak teknolojinin baş döndürücü bir biçimde ilerlemesi ile yüksek teknoloji ürünler üretmezseniz ekonominizin ayakta kalma şansı yoktur. Bu nedenle yüksek teknolojik ürünlerin üretiminde kullanılan hammaddelere bağımlılık kaçınılmaz bir sonuçtur. Her ülke kendisi açısından bu malzemelerin kısa, orta ve uzun vadede temin edilebilirliğini planlamak ve sağlamak zorundadır.

## KAYNAKLAR

Deetman, S., Mancheri, N., Tukker, A., Brown, T., Petavratzi, E., & Luis Tercero Espinoza. (2017). Report on the current use of critical raw materials for the EU. *SCRREEN Coordination and Support Action (CSA)*, *May*, 89.

European Commission. (2018). Report on critical raw materials and the circular economy. In *Publications Office of the EU*. https://doi.org/10.2873/331561

Grohol, M., V. C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI

Lu, F., Xiao, T., Lin, J., Ning, Z., Long, Q., Xiao, L., Huang, F., Wang, W., Xiao, Q., Lan, X., & Chen, H. (2017). Resources and extraction of gallium: A review. *Hydrometallurgy*, *174*(September), 105–115. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.010

Moosavi-Khoonsari, E., Mostaghel, S., Siegmund, A., & Cloutier, J. P. (2022). A Review on Pyrometallurgical Extraction of Antimony from Primary Resources: Current Practices and Evolving Processes. *Processes*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/pr10081590

Pekguleryuz, M., Kainer, K., & Kaya, A. A. (2013). Fundamentals of magnesium alloy metallurgy. In *Fundamentals of*

*Magnesium Alloy Metallurgy*. https://doi.org/10.1533/9780857097293

Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced Engineering Materials*, *5*(12), 866–878. https://doi.org/10.1002/adem.200300403

Popov, V. V., Grilli, M. L., Koptyug, A., Jaworska, L., Katz-Demyanetz, A., Klobčar, D., Balos, S., Postolnyi, B. O., & Goel, S. (2021). Powder bed fusion additive manufacturing using critical raw materials: A review. *Materials*, *14*(4), 1–37. https://doi.org/10.3390/ma14040909

BIDGE