



# MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR

Editör: Doç.Dr.Tayfun SOYSAL

**yaz**  
yayınları

# **Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Alanında Bilimsel Araştırmalar**

**Editör**

Doç.Dr. Tayfun SOYSAL

**yaz**  
yayınları

2026

**Malzeme ve Metalurji Mühendisliği  
Alanında Bilimsel Araştırmalar**

Editör: Doç.Dr. Tayfun SOYSAL

---

**© YAZ Yayınları**

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

---

E\_ISBN 978-625-8574-76-0

Mart 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

[www.yazyayinlari.com](http://www.yazyayinlari.com)

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

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Doymamış Polyester Reçineler.....</b>                                                                                                              | <b>1</b>  |
| <i>Hüseyin ÜNAL, Cihat ARDA</i>                                                                                                                       |           |
| <b>Elyaf Takviyeli Doymamış Polyester Kompozitler;<br/>Yapı, Özellik ve Üretim Yöntemleri.....</b>                                                    | <b>18</b> |
| <i>Hüseyin ÜNAL, Cihat ARDA</i>                                                                                                                       |           |
| <b>Endüstriyel Proseslerde Malzeme Davranışı ve<br/>İş Sağlığı Riskleri: Termal, Mekanik ve Kimyasal<br/>Tehlikelerin Malzemeye Etkisi.....</b>       | <b>46</b> |
| <i>Özlem AYDIN</i>                                                                                                                                    |           |
| <b>Çelik Yapılarda Korozyon–Mekanik Etkileşim: Hasar<br/>Mekanizmaları, Yüzey Modifikasyon ve Koruma<br/>Stratejileri ile Kalan Ömür Tahmini.....</b> | <b>69</b> |
| <i>Özlem AYDIN</i>                                                                                                                                    |           |

*"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."*

## DOYMAMIŞ POLYESTER REÇİNELER

Hüseyin ÜNAL<sup>1</sup>

Cihat ARDA<sup>2</sup>

### 1. GİRİŞ

Doymamış polyester reçineler (UP), termoset polimerler içerisinde endüstriyel ölçekte en yaygın olarak kullanılan reçine sistemlerinden biridir. Özellikle elyaf takviye içeren kompozit malzeme üretiminde ana matris malzemesi olarak tercih edilen bu reçineler; düşük maliyetleri, kolay işlenebilirlikleri, geniş hammadde seçenekleri ve mekanik özelliklerinin formülasyon yoluyla ayarlanabilir olması nedeniyle uzun yıllardır hem akademik çalışmalara hem de endüstriyel çalışmalara konu olmuştur ve olmaya da devam etmektedir. Cam elyaf takviyeli plastikler (CET-P) başta olmak üzere, doymamış polyester esaslı kompozitler denizcilik, otomotiv, inşaat, altyapı, enerji ve elektrik-elektronik sektörlerinde kritik yapısal ve yarı-yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Doymamış polyester reçinelerin bu denli yaygınlaşmasının temel nedenleri arasında, oda sıcaklığında kürleşebilme kabiliyeti, farklı üretim yöntemleriyle uyumlu olmaları ve seri üretime elverişli proses pencereleri yer almaktadır. Bununla birlikte, çevresel ve sağlıkla ilgili kaygılar, özellikle stiren içeren sistemlere yönelik kısıtlamalar, bu reçine grubunun sürekli olarak geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0521-6647.

<sup>2</sup> Makine Mühendisi, Subor Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., ORCID: 0000-0002-0677-2568.

Bu bölümde doymamış polyester reçineler, kimyasal yapı ve sentez mekanizmaları, kürleşme davranışları, türleri, fiziksel, mekanik, termal özellikleri, katkı maddeleri ile modifikasyon yaklaşımları, işleme teknikleri, endüstriyel uygulamaları ve güncel araştırma eğilimleri kapsamında ayrıntılı ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınmaktadır.

## **2. TERMOSET POLİMERLER İÇERİSİNDE DOYMAMIŞ POLYESTERLERİN YERİ**

Termoset polimerler, kürleşme sonrası geri dönüşü olmayan üç boyutlu ağ yapıları oluşturan polimer sistemleridir. Epoksi, fenolik, poliüretan ve doymamış polyester reçineler bu sınıfın en önemli üyeleridir. Doymamış polyesterler, epoksi reçinelere kıyasla daha düşük maliyetli olmaları ve daha basit kürleşme sistemleri gerektirmeleri nedeniyle geniş ölçekli uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Doymamış polyesterlerin en önemli ayırt edici özelliği, zincir yapısında yer alan karbon-karbon çift bağlarıdır. Bu çift bağlar, reaktif seyrelticiler aracılığıyla çapraz bağlanarak termoset ağ yapısının oluşmasını sağlar. Bu yönüyle UP reçineler, hem polimer kimyası hem de kompozit mühendisliği açısından özgün bir konuma sahiptir.

## **3. KİMYASAL YAPI VE SENTEZ MEKANİZMASI**

Doymamış polyester reçineler, doymuş ve doymamış dikarboksilik asitler veya anhidritler ile diollerin polikondenzasyon reaksiyonu sonucunda elde edilen lineer polimerlerdir. Reaksiyon sırasında ester bağları oluşur ve yan ürün olarak su açığa çıkar.

### **3.1. Hammadde Bileşenleri**

Doymamış polyester sentezinde kullanılan temel bileşenler aşağıda özetlenmiştir:

Doymamış dikarboksilik asitler / anhidritler

- Maleik anhidrit
- Fumarik asit

Doymuş dikarboksilik asitler / anhidritler

- Ortoftalik anhidrit
- İzofthalik anhidrit
- Tereftalik asit

Dioller

- Etilen glikol
- Propilen glikol
- Dietilen glikol
- Neopentil glikol

Bu bileşenlerin kimyasal yapısı ve molar oranları, reçinenin esnekliği, sertliği, cam geçiş sıcaklığı ve kimyasal dayanımı üzerinde doğrudan etkilidir.

### **3.2. Polikondenzasyon Reaksiyonu**

Polikondenzasyon reaksiyonu genellikle 180–220 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Reaksiyon esnasında açığa çıkan suyun ortamdan uzaklaştırılması, yüksek molekül ağırlıklı polyester zincirlerinin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Reaksiyon ilerledikçe asit sayısı azalır ve viskozite artar.

Reaksiyonun kontrolü, nihai reçinenin moleköl ağırlığı dağılımını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden biridir.

### **3.3. Reaktif Seyrelticiler**

Doymamış polyester reçineler genellikle yüksek viskoziteli sistemlerdir. Bu nedenle, işlenebilirliği artırmak amacıyla reaktif seyrelticiler kullanılır. En yaygın reaktif seyreltici stirendir. Stiren, kürleşme sırasında polyester zincirleriyle kopolimerleşerek nihai ağ yapısının bir parçası haline gelir.

Son yıllarda, çevresel ve sağlık kaygıları nedeniyle stiren içermeyen veya düşük stirenli alternatif seyrelticiler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır.

## **4. KÜRLEŞME (SERTLEŞME) MEKANİZMASI**

Doymamış polyester reçinelerin kürleşmesi, serbest radikal polimerizasyonu mekanizmasıyla gerçekleşir. Bu süreçte doymamış bağlar arasında çapraz bağlar oluşarak üç boyutlu termoset ağ yapısı meydana gelir.

### **4.1. Başlatıcılar**

Organik peroksitler, serbest radikal oluşumunu sağlayarak kürleşme reaksiyonunu başlatır. Metil etil keton peroksit (MEKP), oda sıcaklığında kürleşme uygulamalarında en yaygın kullanılan başlatıcıdır. Benzoil peroksit (BPO) ise genellikle ısı ile kürleşen sistemlerde tercih edilir.

### **4.2. Hızlandırıcılar ve İnhibitörler**

Kobalt naftenat gibi hızlandırıcılar, başlatıcının daha düşük sıcaklıklarda etkin hale gelmesini sağlar. İnhibitörler ise reçinenin raf ömrünü uzatmak için kullanılır ve kontrolsüz erken kürleşmeyi engeller.

#### **4.3. Kürleşme Kinetiği ve Büzülme**

Kürleşme sırasında hacimsel büzülme meydana gelir. Bu durum, iç gerilmelerin oluşmasına ve boyutsal hassasiyet gerektiren uygulamalarda problemlere yol açabilir. Büzülmenin kontrolü, dolgu maddeleri ve uygun kürleşme rejimleri ile mümkündür.

### **5. DOYMAMIŞ POLYESTER TÜRLERİ**

Doymamış polyester reçineler, kimyasal yapılarını oluşturan aromatik asit türüne ve zincir yapısına bağlı olarak farklı performans seviyeleri sunan çeşitli gruplara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, reçinelerin mekanik dayanımı, kimyasal dayanımı, termal kararlılıkları ve endüstriyel kullanım alanlarını doğrudan belirlemektedir. Bu bölümde en yaygın kullanılan doymamış polyester türleri özellikleri ve aralarındaki temel farklar detaylı olarak ele alınmaktadır.

#### **5.1. Ortoftalik Polyester Reçineler**

Ortoftalik polyesterler, ortoftalik anhidrit esaslı olarak sentezlenen ve doymamış polyester reçineler arasında en çok kullanılan grubu oluşturmaktadır. Ucuz olmaları ve kolay temin edilebilir hammaddeleri sayesinde genel amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu reçineler orta seviyede mekanik dayanım özelliği göstermekte olup, cam elyaf takviyesi ile birçok yarı-yapısal uygulama için yeterli performans sağlayabilmektedir. Ancak aromatik halkaların zincir üzerindeki konumu nedeniyle moleküler paketlenme sınırlıdır ve bu durum kimyasal ve termal dayanımın göreceli olarak düşük olmasına yol açmaktadır. Özellikle alkali ortamlarda ve uzun süreli sıcaklık maruziyetinde özellik kayıpları gözlemlenebilir.

Ortoftalik polyesterler, tekne gövdeleri, otomotiv dış panelleri, dekoratif kompozitler ve genel amaçlı GFRP uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

## **5.2. İzofthalik Polyester Reçineler**

İzofthalik polyesterler, izofthalik asit veya anhidrit kullanılarak sentezlenen ve ortoftalik sistemlere kıyasla daha dengeli bir zincir yapısına sahip olan reçinelerdir. Aromatik halkaların zincir üzerindeki konumlanması, moleküler düzeni artırmakta ve bu durum kimyasal ve mekanik özelliklere olumlu yansımaktadır.

İzofthalik polyester reçineler, daha yüksek eğme ve çekme mukavemeti ile daha iyi darbe performans özellikleri gösterir. Aynı zamanda asidik ortamlara ve neme karşı dirençleri ortoftalik sistemlere göre belirgin biçimde daha iyidir. Bu özellikleri sayesinde yapısal kompozit uygulamalarında ve orta/yüksek performans gerektiren alanlarda tercih edilmektedirler. Tipik kullanım alanları arasında kimyasal depolama tankları, boru sistemleri, rüzgar enerjisi bileşenleri ve yüksek dayanım gerektiren GFRP yapılar yer almaktadır.

## **5.3. Tereftalik Polyester Reçineler**

Tereftalik polyesterler, para-konumlu aromatik yapıya sahip tereftalik asit esaslı olarak sentezlenen reçinelerdir. Bu yapı, zincirler arası etkileşimi artırarak daha yüksek kristalin benzeri düzen ve dolayısıyla üstün termal ve mekanik performans özellikleri sağlar. Bu çeşit polyester reçine grubu, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük su absorpsiyonu ve zorlu kimyasal şartlara karşı yüksek direnç özelliği göstermesiyle öne çıkmaktadır. Özellikle sürekli çalışma sıcaklığının önemli olduğu uygulamalarda ve uzun servis ömrü beklenen sistemlerde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, hammaddelerinin maliyeti ve işleme zorlukları nedeniyle ortoftalik ve izofthalik reçinelere kıyasla daha pahalıdır.

Tereftalik polyesterler başlıca endüstriyel boru hatları, kimyasal proses ekipmanları ve altyapı uygulamalarında kullanılmaktadır.

#### **5.4. Vinil Ester Reçineler**

Vinil ester polimer reçineleri, kimyasal olarak epoksi bazlı olmakla birlikte doymamış polyesterlere benzer şekilde serbest radikal mekanizmasıyla kürleşen yüksek performanslı termoset sistemlerdir. Epoksi omurgasının uç kısımlarında yer alan vinil gruplar dolayısıyla hem yüksek mekanik mukavemet hem de mükemmel kimyasal direnç elde edilmektedir.

Vinil esterler, ortoftalik, izoftalik ve tereftalik polyesterlere kıyasla daha yüksek tokluk, daha düşük büzülme ve üstün yorulma direnci sunar. Özellikle asidik ve solvent içeren ortamlarda performanslarını uzun süre koruyabilmeleri, bu reçineleri kimyasal direnç gerektiren uygulamalar için ideal hale getirmektedir. Ancak maliyetlerinin yüksek olması, kullanım alanlarını daha çok kritik ve özel uygulamalarla sınırlamaktadır.

Bu reçineler, kimyasal tanklar, denizcilik yapıları, yüksek performanslı kompozitler ve agrezif ortam koşullarına maruz kalan endüstriyel sistemlerde tercih edilmektedir. Doymamış polyester reçine türlerinin özellik ve performanslarının karşılaştırılması aşağıda Tablo 5.1’de verilmiştir.

**Tablo 5.1. Doymamış polyester reçine türlerinin özellik ve performans karşılaştırması**

|                         | Polyester çeşidi                  |                                     |             |                  |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------|------------------|
| Özellikler              | Ortoftalik                        | İzoftalik                           | Tereftalik  | Vinil ester      |
| Mekanik dayanım         | Orta                              | Orta-Yüksek                         | Yüksek      | Çok yüksek       |
| Kimyasal dayanım        | Orta                              | Yüksek                              | Yüksek      | Çok yüksek       |
| Isıl dayanım            | Düşük- orta                       | Orta                                | Yüksek      | Yüksek           |
| Su absorpsiyonu         | Orta                              | Düşük                               | Çok düşük   | Çok düşük        |
| Büzülme                 | Yüksek                            | Orta                                | Düşük       | Çok düşük        |
| Maliyet                 | Düşük                             | Orta                                | Orta-Yüksek | Yüksek           |
| Tipik kullanım alanları | Genel cam elyaf takviyeli plastik | Yapısal cam elyaf takviyeli plastik | Boru-Tank   | Kimyasal yapılar |

## **6. POLYESTERLERİN FİZİKSEL, MEKANİK VE TERMAL ÖZELLİKLERİ**

Bu bölümde doymamış polyester reçinelerin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri tablolar halinde özetlenerek değerlendirilmiştir. Tablolar, literatürde yaygın olarak rapor edilen tipik değer aralıklarını yansıtmakta olup, kullanılan reçine türü, kürleşme koşulları ve katkı maddelerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Doymamış polyester reçinelerin tipik fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

**Tablo 6.1. Doymamış polyester reçinelerin tipik fiziksel ve mekanik özellikleri**

| <b>Özellikler</b>                   | <b>Değer aralığı</b> |
|-------------------------------------|----------------------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )       | 1.1-1.40             |
| Çekme dayanımı (MPa)                | 40-90                |
| Eğme dayanımı (MPa)                 | 70-140               |
| Elastiklik Modülü (GPa)             | 2.5-4.5              |
| Kopma uzaması (%)                   | 1.5-3.0              |
| Darbe dayanımı (Kj/m <sup>2</sup> ) | 5-15                 |

### **6.1. Mekanik Özellikler**

Doymamış polyester reçinelerin özellikleri, reçine türü, kürleşme derecesi ve kullanılan katkı malzemelerine göre geniş bir aralıkta değişmektedir.

UP reçineler orta seviyede çekme, eğme ve basma dayanımına sahiptir. Elyaf takviyesi ile elastiklik modülü ve yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde artırılabilir.

### **6.2. Termal Özellikler**

Doymamış polyester polimerin camısı geçiş sıcaklığı (T<sub>g</sub>) yaklaşık 60–120 °C aralığındadır. Termal bozunma sıcaklığı ise reçine yapısına bağlı olarak değişmektedir. Doymamış polyester reçinelerin tipik termal özellikleri aşağıdaki Tablo 6.2’ de verilmiştir.

**Tablo 6.2. Doymamış polyester reçinelerin tipik termal özellikleri**

| Özellik                   | Birimi | Tipik değer aralığı |
|---------------------------|--------|---------------------|
| Camsı geçiş sıcaklığı     | °C     | 60-120              |
| Isıl bozunma başlangıcı   | °C     | 280-350             |
| Sürekli çalışma sıcaklığı | °C     | 80-120              |

### **6.3. Kimyasal Dayanım**

Asitler, yağlar ve birçok çözücüye karşı iyi direnç gösterirken, kuvvetli bazlara karşı sınırlı dayanım sergiler. Doymamış polyester reçinelerin tipik kimyasal dayanımının nitel değerlendirilmesi aşağıdaki Tablo 6.3’de verilmiştir. Doymamış polyester reçineleri genellikle asitler, yağlar ve birçok çözücüye karşı iyi direnç gösterirken, kuvvetli bazlara karşı sınırlı dayanım sergiler.

**Tablo 6.3. Doymamış polyester reçinelerin tipik kimyasal dayanımının nitel değerlendirilmesi**

| Kimyasal ortam     | Dayanım seviyesi |
|--------------------|------------------|
| Asidik ortamlar    | İyi              |
| Alkali ortamlar    | Zayıf- Orta      |
| Yağlar ve yakıtlar | İyi              |
| Organik çözücüler  | Orta             |

## **7. KATKI MADDELERİ VE MODİFİKASYON YAKLAŞIMLARI**

Doymamış polyester reçinelerin performansı, kullanım amaçlarına bağlı olarak farklı katkı maddeleri ve modifikasyon yaklaşımları ile önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Bu katkılar; mekanik mukavemet, termal kararlılık, aşınma dayanımı, yangın performansı ve maliyet gibi parametreler üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

### **7.1. Dolgu Maddeleri**

Doymamış polyester sistemlerde kullanılan dolgu maddeleri; maliyet azaltma, mekanik özelliklerin ayarlanması,

büzülmenin kontrolü, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve fonksiyonel özelliklerin kazandırılması amacıyla tercih edilmektedir. Ders kitabı yaklaşımıyla bu dolgu maddeleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Mineral Dolgular;

- Kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ )
- Talk
- Kaolin
- Mika
- Barit ( $\text{BaSO}_4$ )
- Silika ( $\text{SiO}_2$ )
- Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Metal ve Metal Oksit Dolgular;

- Alüminyum hidroksit
- Magnezyum hidroksit
- Çinko oksit ( $\text{ZnO}$ )
- Titanyum dioksit ( $\text{TiO}_2$ )

Fonksiyonel ve Özel Amaçlı Dolgular;

- Grafit
- Karbon siyahı
- Bor nitrür
- Cam kürecikler (glass beads)
- Uçucu kül (fly ash)

Bu dolgu maddelerinin seçimi, partikül boyutu, şekli, yüzey kimyası ve hacim oranına bağlı olarak doymamış polyester

matrisin mekanik, termal ve tribolojik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle ince taneli ve yüzey modifiye edilmiş dolgular, daha homojen dağılım sağlayarak performans kayıplarını sınırlandırmaktadır.

## **7.2. Elyaf Takviye Malzemeleri**

Elyaf takviyeleri, doymamış polyester esaslı kompozitlerin yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini belirleyen en temel bileşenlerdir. Kullanılan elyaf türü, kompozitin mekanik performansı, yoğunluğu ve maliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Doymamış polyester sistemlerde yaygın olarak kullanılan elyaflar aşağıda özetlenmiştir:

Sentetik Elyaflar;

- Cam elyaf (E-cam, S-cam)
- Karbon elyaf
- Aramid elyaf
- Bazalt elyaf

Doğal Elyaflar;

- Keten elyaf
- Jüt elyaf
- Kenevir elyaf
- Sisal elyaf
- Hindistancevizi elyafı

Hibrit Elyaf Sistemleri;

- Cam elyaf + karbon elyaf
- Cam elyaf + aramid elyaf
- Cam elyaf + doğal elyaf kombinasyonları

Cam elyaf, düşük maliyeti ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle en yaygın kullanılan takviye malzemesidir. Karbon elyaf yüksek elastiklik modülü ve özgül dayanımı ile ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilirken, aramid elyaflar üstün darbe ve yorulma direnci ile öne çıkmaktadır. Doğal elyaflar ise sürdürülebilirlik ve düşük yoğunluk avantajları sunmakta, ancak nem hassasiyetleri nedeniyle genellikle yüzey işlemleri ile kullanılmaktadır.

### **7.3. Alev Geciktirici ve Darbe Dayanımı Artırıcılar**

Doymamış polyester reçinelerin doğal olarak sınırlı yangın dayanımına sahip olmaları, birçok uygulamada alev geciktirici katkıların kullanımını zorunlu kılmaktadır. Halojenli alev geciktiriciler yüksek etkinlik sağlamakla birlikte çevresel ve sağlık etkileri nedeniyle giderek yerini halojensiz sistemlere bırakmaktadır. Fosfor ve alüminyum hidroksit esaslı katkılar, günümüzde yanmayı geciktirici katkılar olarak daha çevreci alternatif katkılar olarak öne çıkmaktadır. Darbe dayanımını artırmak amacıyla ise kauçuk esaslı modifikatörler ve termoplastik katkılar kullanılmaktadır. Bu katkılar, reçine matrisinde enerji yutma mekanizmalarını aktive ederek çatlak ilerlemesini sınırlandırır. Ancak darbe dayanımındaki artış, çoğu zaman elastiklik modülünde azalma ile birlikte gerçekleştiğinden, katkı oranlarının dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir. Doymamış polyesterlerde kullanılan bazı katkı türlerinin temel etkileri Tablo 7.2 de verilmiştir.

**Tablo 7.2. Doymamış polyesterlerde kullanılan bazı katkı türleri ve temel etkileri**

| <b>Katkı</b>             | <b>Avantajları</b>              | <b>Dezavantajları</b> |
|--------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| Mineral katkılar         | Maliyet düşüşü, Rijitlik artışı | Viskozite artışı      |
| Cam elyaf                | Dayanım artışı                  | Ağırlık artışı        |
| Karbon elyaf             | Yüksek özgül Dayanım            | Yüksek maliyet        |
| Alev geciktiriciler      | Yanmayı geciktiricilik          | Mekanik kayıp         |
| Kauçuk modifiye ediciler | Darbe dayanımı                  | Elastik Modül azalımı |

## 8. İŞLEME YÖNTEMLERİ

Doymamış polyester reçineler aşağıdaki üretim yöntemleriyle işlenebilmektedir:

- Elle yatırma yöntemi
- Püskürtme yöntemi
- Flament sarma yöntemi
- Pultrüzyon
- Reçine transfer kalıplama (RTM / VARTM)
- SMC ve BMC prosesleri

## 9. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Doymamış polyester reçineler denizcilik, otomotiv, inşaat, kimya ve enerji ile ilgili endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tipik doymamış polyester türleri Tablo 9.1 de verilmiştir.

**Tablo 9.1. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tipik doymamış polyester türleri**

| Uygulama Alanı     | Reçine türü (tercih edilen) |
|--------------------|-----------------------------|
| Tekne gövdeleri    | Orto /İzoftalik             |
| Kimyasal tanklar   | Vinil ester                 |
| Boru sistemleri    | Tereftalik                  |
| Otomotiv panelleri | Ortoftalik                  |
| Elektrik yalıtımı  | İzoftalik                   |

## 10. ÇEVRESEL ETKİLER VE İŞ SAĞLIĞI GÜVENLİĞİ

Doymamış polyester reçinelerin çevresel etkileri, hammadde temininden üretim, kullanım ve kullanım sonrası bertaraf aşamalarına kadar uzanan geniş bir yaşam döngüsü

perspektifinde değerlendirilmektedir (Mallick, 2007; Strong, 2008). Özellikle uçucu organik bileşik (VOC) emisyonları, enerji tüketimi, geri dönüşüm zorlukları ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkiler bu reçine grubuna yönelik temel çevresel tartışma konularını oluşturmaktadır (Wypych, 2016).

### **10.1. Stiren Emisyonları ve Hava Kalitesi**

Doymamış polyester reçinelerde en yaygın kullanılan reaktif seyreltici olan stiren, kürleşme sırasında kısmen atmosfere salınabilen uçucu bir organik bileşiktir (ECHA, 2018). Stiren emisyonları, hem iş sağlığı ve güvenliği açısından hem de çevresel açılarından önemli bir sorun oluşturmaktadır. Literatürde, uzun süreli stiren maruziyetinin baş ağrısı, solunum yolu tahrişi ve merkezi sinir sistemi üzerinde olumsuz etkilere yol açabildiği bildirilmektedir (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2021).

Stiren kaynaklı çevresel etkilerin azaltılması amacıyla, düşük stirenli reçineler, stiren ikamesi reaktif seyrelticiler ve kapalı kalıplama teknikleri (RTM, VARTM) yaygın olarak önerilmektedir (Strong, 2008; Pickering, 2016). Bu yaklaşımlar, VOC emisyonlarını azaltmanın yanı sıra üretim ortamlarının daha güvenli hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

### **10.2. Enerji Tüketimi ve Karbon Ayak İzi**

Doymamış polyester reçinelerin üretimi, polikondenzasyon reaksiyonları ve hammadde sentezi nedeniyle belirli bir enerji tüketimini beraberinde getirmektedir (La Rosa et al., 2014). Bununla birlikte, epoksi ve diğer yüksek performanslı termoset reçinelerle karşılaştırıldığında, doymamış polyesterlerin göreceli olarak daha düşük işlem sıcaklıklarında kürleşebilmesi, enerji tüketimi açısından bir avantaj olarak değerlendirilmektedir (Mallick, 2007).

Kompozit yapıların hafiflik avantajı, özellikle otomotiv ve taşımacılık sektörlerinde kullanım sırasında yakıt tüketiminin ve dolaylı karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır (Pickering, 2016). Bu nedenle doymamış polyester esaslı kompozitlerin çevresel etkileri, sadece üretim aşamalarıyla sınırlı kalmayıp kullanım süresi boyunca sağladıkları dolaylı çevresel kazanımlar ile birlikte değerlendirilmelidir.

### **10.3. Geri Dönüşüm ve Atık Yönetimi**

Doymamış polyester reçineler termoset yapıda oldukları için, termoplastik polimerlere kıyasla geri dönüşümleri oldukça sınırlıdır (Worrell and Reuter, 2014). Kürleşmiş polyester esaslı kompozitlerin mekanik geri dönüşümünde, öğütülmüş atıklar ikincil dolgu malzemesi olarak kullanılabilir (Pickering, 2016).

Kimyasal geri dönüşüm yöntemleri ise polimer ağ yapısının kontrollü şekilde parçalanmasını hedeflemekte olup, solvoliz ve piroliz gibi teknikleri içermektedir. Fakat, bu yöntemlerde yüksek enerji kullanılması gerekliliği ve proses karmaşıklığı nedeniyle endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği halen sınırlıdır (La Rosa et al., 2014).

### **10.4. Biyo Bazlı ve Çevre Dostu Yaklaşımlar**

Son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda biyo-bazlı doymamış polyester reçinelerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar artış göstermiştir (Kainulainen et al., 2015). Bitkisel kaynaklı monomerler kullanılarak sentezlenen bu reçineler, fosil kaynaklı hammaddelere olan bağımlılığı azaltmayı amaçlamaktadır.

Doğal elyaf takviyeleri ile birlikte kullanılan biyo esaslı polyester sistemlerin, genel çevresel performansı artırma potansiyeli vardır. Buna ilaveten, maliyet, nem hassasiyeti ve uzun vadeli dayanım gibi faktörler bu sistemlerin

yaygınlaşmasının önündeki temel sınırlayıcılar olarak değerlendirilmektedir (Pickering, 2016).

Son yıllarda nano-boyutlara sahip bazı katkılı sistemler, biyo-bazlı polyesterler ve sürdürülebilir üretim yaklaşımları, doymamış polyester polimer reçineler için geleceğin ana araştırma konuları arasında olacaktır.

## **11. SONUÇ**

Doymamış polyester reçineler, epoksi ve vinilester gibi termoset polimerlere göre daha düşük maliyetli hem de daha hafif olmaları aynı zamanda polyesterlerden yeni nesil çevre dostu formülasyonların geliştirilmesi sayesinde, bu reçinelerin sürdürülebilirlik perspektifinde iyileştirilme potansiyeli oldukça yüksektir. Özellikle kompozit endüstrisinde kullanımında polyesterlerin vazgeçilmez bir konuma sahip olduğu unutulmamalıdır. Gelişen modifikasyon teknikleri ile bu reçinelerin performansı sürekli olarak artırılmaktadır. Ancak polyester reçinelerin çevresel etkileri, stiren emisyonları, enerji tüketimi ve geri dönüşüm zorlukları gibi özellikleri genellikle dikkatle ele alınması gereken temel konular arasındadır.

## KAYNAKÇA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2021). *Toxicological profile for styrene*. U.S. Department of Health and Human Services.
- European Chemicals Agency. (2018). *Evaluation of occupational exposure limits for styrene*. Helsinki, Finland.
- Kainulainen, T. P., Sirviö, J. A., & Liimatainen, H. (2015). Bio-based unsaturated polyester resins: Synthesis and properties. *Polymer Degradation and Stability*, 121, 89–98.
- La Rosa, A. D., Recca, G., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., & Cozzo, G. (2014). Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite materials. *Energy and Buildings*, 76, 195–204.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Pickering, K. L. (2016). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods, and applications* (2nd ed.). Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.
- Worrell, E., & Reuter, M. A. (2014). *Handbook of recycling: State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Oxford, UK: Elsevier.

# **ELYAF TAKVİYELİ DOYMAMIŞ POLYESTER KOMPOZİTLER; YAPI, ÖZELLİK VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

**Hüseyin ÜNAL<sup>1</sup>**

**Cihat ARDA<sup>2</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitler, modern mühendislik uygulamalarında yüksek özgül dayanım, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve tasarlanabilir özellikler sunmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler; matris fazı olarak görev yapan polimerlerin, yük taşıyıcı ve dayanım artırıcı takviye elemanlarıyla birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir. Polimer matrisli kompozitler arasında doymamış polyester (UP) reçineler, düşük maliyetleri, oda sıcaklığında kürlenebilme yetenekleri, iyi kimyasal dirençleri ve geniş üretim yöntemleriyle uyumlulukları sayesinde öne çıkmaktadır. Elyaf takviyesi, doymamış polyester esaslı kompozitlerin mekanik performansını önemli ölçüde artırmakta, çekme, eğme ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi sentetik elyafların yanı sıra son yıllarda çevresel kaygılar doğrultusunda doğal elyafların kullanımı da artış göstermektedir. Elyaf türü, hacim oranı, yönlenmesi ve elyaf-matris ara-yüzey

---

<sup>1</sup> Prof. Dr., Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-0521-6647

<sup>2</sup> Makine Mühendisi, Subor Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., ORCID: 0000-0002-0677-2568

özellikleri, üretilen kompozitin performansını belirleyen temel parametrelerdir.

Bu bölümde, elyaf takviyeli doymamış polyester esaslı kompozitlerin temel bileşenleri, üretim yöntemleri, mekanik, tribolojik ve çevresel özellikleri ve endüstriyel uygulamaları değerlendirilmektedir.

## **2. DOYMAMIŞ POLYESTER REÇİNELER**

### **2.1. Kimyasal Yapı ve Sınıflandırma**

Doymamış polyester reçineler, doymamış dikarboksilik asitler veya anhidritler (maleik anhidrit, fumarik asit) ile doymuş ya da doymamış diollerin (etilen glikol, propilen glikol, neopentil glikol vb.) polikondenzasyon reaksiyonu sonucu sentezlenen termoset polimerlerdir. Reçine zincirinde yer alan doymamış çift bağlar, çapraz bağlanma reaksiyonlarına imkan tanıyarak üç boyutlu çapraz bağ yapısının oluşmasını sağlar. Kimyasal yapıya bağlı olarak doymamış polyester reçineler genel olarak ortoftalik, izoftalik, tereftalik ve vinil ester modifiye polyesterler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ortoftalik polyesterler düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilirken, izoftalik ve tereftalik tip polyesterler daha yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç özelliği göstermektedirler. Vinil ester modifiye polyesterler ise polyester ve epoksi sistemlerin avantajlarını bir araya getirerek özellikle agrezif çevre koşullarında üstün performans sağlamaktadır.

### **2.2. Reçine-Stiren Sistemi ve Reoloji**

Doymamış polyester reçineler genellikle stiren monomeri ile seyreltilmiş halde kullanılmaktadır. Stiren, reçinenin viskozitesini düşürerek elyaf ıslatma kabiliyetini artırmakta ve aynı zamanda kurlenme sırasında çapraz bağ yapısına katılmaktadır. Reolojik özellikler, reçine türü, stiren oranı ve

sıcaklık gibi parametrelere bağlı olarak değişmekte olup, özellikle vakum infüzyon ve RTM gibi kapalı kalıplama yöntemlerinde kritik öneme sahiptir.

### **2.3. Kürlenme Mekanizması**

Doymamış polyester reçinelerin kürlenmesi, serbest radikal polimerizasyon mekanizması ile gerçekleşmektedir. Bu süreçte yaygın olarak metil etil keton peroksit (MEKP) başlatıcı olarak kullanılırken, kobalt bazlı hızlandırıcılar reaksiyonun oda sıcaklığında gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kürlenme reaksiyonu ekzotermik olup, kontrolsüz koşullarda iç gerilmeler ve mikro çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Bu nedenle kürlenme parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir.

### **2.4. Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikler**

Saf doymamış polyester reçineler; düşük elastiklik modülü, sınırlı darbe dayanımı ve gevrek kırılma davranışı sergilemektedir. Bununla birlikte, iyi kimyasal direnç, boyutsal kararlılık ve atmosferik koşullara karşı dayanım gibi avantajlara sahiptir. Elyaf takviyesi ile birlikte bu reçinelerin çekme, eğme ve darbe dayanımları önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir.

### **2.5. Avantajlar ve Sınırlamalar**

Doymamış polyester reçinelerin başlıca avantajları; düşük maliyet, kolay işlenebilirlik, geniş hammadde temini ve çok çeşitli üretim yöntemleriyle uyumluluk olarak sıralanabilir. Buna karşılık, epoksi gibi alternatif termoset sistemlere kıyasla daha düşük tokluk ve yorulma dayanımı göstermeleri, yüksek performans gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı bir faktör oluşturmaktadır. Bu nedenle elyaf takviyesi, hibrit sistemler ve katkı modifikasyonları yaygın biçimde uygulanmaktadır.

### **3. ELYAF TAKVİYE TÜRLERİ**

Elyaf takviyesi, doymamış polyester esaslı kompozitlerin mekanik, termal ve tribolojik performansını belirleyen en kritik unsurlardan biridir. Elyafın türü, geometrisi, hacim oranı ve yönlenmesi, yük taşıma kapasitesi ve hasar mekanizmaları üzerinde doğrudan etkilidir.

#### **3.1. Cam Elyaf Takviyeler**

Cam elyaflar, doymamış polyester esaslı kompozitlerde maliyet/performans dengesi, kimyasal dayanım ve üretim kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan takviye elemanlarıdır. Endüstride en sık karşılaşılan cam elyaf türleri E-camı, S-camı ve E+R camı sistemleridir. Bu cam elyaflar, kimyasal bileşimleri ve üretim prosesleri nedeniyle farklı mekanik, termal ve çevresel dayanım özellikleri sergilemektedir.

##### **3.1.1. E-Cam Elyaf**

E-cam elyafı, başlangıçta elektriksel yalıtım uygulamaları için geliştirilmiş olup günümüzde genel amaçlı kompozit uygulamalarında standart haline gelmiştir. Silika, alümina ve kalsiyum oksit esaslı kimyasal bileşimi sayesinde iyi mekanik özellikler, yüksek elektriksel yalıtım ve uygun maliyet sunmaktadır. Doymamış polyester reçinelerle uyumu oldukça iyidir ve silan bağlayıcılar ile ara-yüzey yapışması kolaylıkla artırılabilir.

##### **3.1.2. S-Cam Elyaf**

S-cam elyafı, yüksek mukavemet ve elastiklik modülü gerektiren ileri mühendislik uygulamaları için geliştirilmiştir. Yüksek silika ve alümina içeriği sayesinde E-cam elyaflara göre daha yüksek çekme dayanımı ve elastiklik modülü özelliği gösterir. Bu özellikleri nedeniyle havacılık, savunma ve yüksek performanslı yapısal uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak

üretim maliyetlerinin yüksek olması, kullanım alanlarını sınırlayan temel faktördür.

### **3.1.3. E+R Cam Elyaf**

E+R cam elyafları, E-cam ve R-cam elyafların hibrit veya modifiye edilmiş versiyonlarını ifade etmektedir. R-cam elyaflar, E-cam elyaflara kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve daha iyi kimyasal direnç sunmak üzere optimize edilmiştir. E+R cam elyafları, maliyet artışını sınırlarken mekanik ve çevresel performansı iyileştirmeyi amaçlayan uygulamalarda tercih edilmektedir. Aşağıda farklı tip cam elyafların karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablodaki karşılaştırmadan görüldüğü üzere, E-cam elyaflar ekonomik ve genel amaçlı uygulamalar için uygunken, S-cam elyaflar yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. E+R cam elyaf sistemleri ise mekanik, termal ve korozyon direnci gereksinimlerinin birlikte ön plana çıktığı uygulamalarda dengeli bir çözüm sunmaktadır.

**Tablo 1. E-Cam, S-Cam ve E+R cam elyafların karşılaştırmalı özellikleri**

| <b>Özellik</b>                                 | <b>E-Cam</b> | <b>S-Cam</b> | <b>E+R Cam</b> |
|------------------------------------------------|--------------|--------------|----------------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )                  | ~2.55        | ~2.49        | ~2.52–2.54     |
| Çekme Dayanımı (MPa)                           | 2000–3500    | 4300–4800    | 3500–4200      |
| Elastiklik Modülü (GPa)                        | 70–76        | 85–90        | 80–86          |
| Kopma Uzaması (%)                              | 4.5–5.0      | 5.0–5.5      | 4.8–5.2        |
| Çalışma Sıcaklığı (°C)                         | ~500         | ~700         | ~600           |
| Isıl Genleşme Katsayısı (×10 <sup>-6</sup> /K) | 5.0          | 2.8–3.0      | 3.5–4.0        |
| Kimyasal Dayanım                               | İyi          | Çok iyi      | Çok iyi        |
| Korozyon Direnci (asidik/alkalik ortamlar)     | Orta-İyi     | İyi          | Çok iyi        |
| Elektriksel Yalıtım                            | Çok iyi      | İyi          | Çok iyi        |
| Maliyet (göreceli)                             | Düşük        | Yüksek       | Orta           |

### **3.2. Karbon Elyaf Takviyeler**

Karbon elyaflar, yüksek özgül mukavemet ve elastiklik modülü, düşük yoğunluk ve üstün yorulma dayanımı özellikleri sayesinde ileri mühendislik kompozitlerinin en önemli takviye elemanları arasında yer almaktadır. Doymamış polyester esaslı kompozitlerde kullanımları, özellikle yapısal rijitlik ve ağırlık tasarrufunun kritik olduğu uygulamalarda öne çıkmaktadır. Karbon elyaflar, elastiklik modülü ve çekme dayanımına bağlı olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır.

#### **3.2.1. Karbon Elyafların Sınıflandırılması**

Karbon elyaflar genel olarak yüksek dayanımlı (HS), orta elastik modüllü (IM), yüksek elastik modüllü (HM) ve çok yüksek elastik modüllü (UHM) olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, elyafın üretim hammaddesi (PAN veya zift esaslı), kristal yapı yönelmesi ve ısıtma işlem sıcaklığına bağlı olarak oluşmaktadır.

- Yüksek Dayanımlı (HS) Karbon Elyaf: Görece düşük elastiklik modülüne karşın yüksek çekme dayanımı sunar. Darbe ve yorulma yüklerinin baskın olduğu uygulamalarda tercih edilir.
- Orta Elastik Modüllü (IM) Karbon Elyaf: Dayanım ve rijitlik arasında dengeli bir performans sunar. Genel amaçlı yapısal kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Yüksek Elastik Modüllü (HM) Karbon Elyaf: Yüksek elastiklik modülü sayesinde rijitlik gereksiniminin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Ancak kırılma eğilimi daha yüksektir.
- Çok Yüksek Elastik Modüllü (UHM) Karbon Elyaf: Son derece yüksek elastiklik modülüne sahiptir. Özel ve sınırlı uygulamalarda kullanılır.

### 3.2.2. Karbon Elyaf–Doymamış Polyester Uyumu

Karbon elyaflar, kimyasal olarak inert yapıları nedeniyle doymamış polyester matrislerle sınırlı ara-yüzey bağlanması sergileyebilir. Bu nedenle yüzey oksidasyonu, plazma işlemleri ve kaplama teknikleri ile elyaf yüzey enerjisi artırılarak ara-yüzey yapışması iyileştirilmektedir.

### 3.2.3. Karbon Elyafların Mekanik, Termal ve Kimyasal Özellikleri

Farklı karbon elyafların, mekanik, termal, kimyasal ve elektriksel özellikleri aşağıdaki Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2. Farklı karbon elyafların, mekanik, termal, kimyasal ve elektriksel özellikleri**

| Özellik                                     | HS Karbon elyaf | IM Karbon elyaf | HM Karbon elyaf | UHM Karbon elyaf |
|---------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>                 | 1.75-1.80       | 1.78-1.82       | 1.85-1.90       | 1.90-2.00        |
| Çekme dayanımı, MPa                         | 3500-5500       | 3000-5000       | 2500-3500       | 1500-2500        |
| Elastiklik modülü, MPa                      | 220-240         | 260-300         | 350-450         | 500-700          |
| Kopma uzaması, %                            | 1.0-2.0         | 1.0-1.5         | 0.5-1.0         | <0.5             |
| Çalışma sıcaklığı, °C                       | >2000           | >2000           | >2500           | >3000            |
| Isıl genleşme katsayısı, w/m <sup>0</sup> K | -0.5-0.0        | -0.8- -0.2      | -1.2- -0.5      | -2.0- -1.0       |
| Elektriksel iletkenlik                      | Çok yüksek      | Çok yüksek      | Çok yüksek      | Çok yüksek       |
| Kimyasal dayanım                            | Çok iyi         | Çok iyi         | Çok iyi         | Çok iyi          |

### 3.2.4. Karbon Elyaf Takviyelerin Avantajları ve Sınırlamaları

Karbon elyaf takviyeli doymamış polyester kompozitler, yüksek özgül rijitlik ve mükemmel yorulma dayanımı sunmalarına karşın, yüksek maliyet, elektriksel iletkenlik kaynaklı galvanik korozyon riski ve düşük darbe dayanımı gibi sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle karbon elyaflar sıklıkla cam veya aramid elyaflarla birlikte hibrit sistemler halinde kullanılmaktadır.

### **3.3. Aramid Elyaf Takviyeler**

Aramid elyaflar, aromatik poliamid esaslı yapıları sayesinde yüksek tokluk, üstün darbe dayanımı ve enerji sönümleme kabiliyetleri ile öne çıkan ileri mühendislik elyaflarıdır. Doymamış polyester esaslı kompozitlerde özellikle darbe, aşınma ve yorulma yüklerinin hakim olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Aramid elyaflar genel olarak kimyasal yapı ve mekanik performanslarına bağlı olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır.

#### **3.3.1. Aramid Elyaf Türleri**

Aramid elyaflar temel olarak para-aramid, meta-aramid ve yüksek performanslı aramid türevleri şeklinde sınıflandırılmaktadır.

- Para-aramid elyaflar (Kevlar, Twaron): Yüksek çekme dayanımı ve elastiklik modülü ile yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.
- Meta-aramid elyaflar (Nomex): Mekanik dayanımları daha düşük olmakla birlikte üstün termal stabilite ve alev geciktirici özelliklere sahiptir.
- Yüksek performanslı aramid türevleri (Technora vb.): Para-aramidlerin geliştirilmiş versiyonları olup daha iyi yorulma ve kimyasal dayanım sunar.

#### **3.3.2. Aramid Elyafların Mekanik, Termal ve Kimyasal Özellikleri**

Aşağıdaki Tablo 3’de farklı aramid elyafların mekanik, termal ve kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aramid elyafların en önemli avantajı, yüksek darbe ve aşınma dayanımıdır. Buna karşın nem emme ve UV hassasiyeti, doymamış polyester matrisli kompozitlerde uzun dönem performansı sınırlayabilmektedir. Bu nedenle yüzey

modifikasyonları ve hibrit elyaf sistemleri yaygın olarak uygulanmaktadır.

**Tablo 3. Farklı Aramid elyafların, mekanik, termal ve kimyasal özellikleri**

| Özellik                                     | Para-Aramid | Meta-Aramid | Yüksek performanslı Aramid |
|---------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>                 | 1.44-1.45   | 1.38-1.40   | 1.39-1.42                  |
| Çekme dayanımı, MPa                         | 3000-3600   | 1000-1400   | 2800-3200                  |
| Elastiklik modülü, MPa                      | 70-130      | 20-40       | 90-120                     |
| Kopma uzaması, %                            | 2.5-4.0     | 15-25       | 3.0-4.5                    |
| Darbe dayanımı                              | Çok yüksek  | Yüksek      | Çok yüksek                 |
| Çalışma sıcaklığı, °C                       | 500         | 400         | 500                        |
| Isıl genleşme katsayısı, w/m <sup>o</sup> K | -2.0-0.0    | 2-4         | -1.0-0.0                   |
| Kimyasal dayanım                            | İyi         | Çok iyi     | Çok iyi                    |
| Nem emme                                    | Yüksek      | Orta        | Orta                       |

### **3.4. Doğal Elyaf Takviyeler**

Doğal elyaflar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri, düşük yoğunlukları ve çevre dostu olmaları nedeniyle doymamış polyester esaslı kompozitlerde giderek artan bir ilgi görmektedir. Bununla birlikte doğal elyafların mekanik özelliklerinin sentetik elyaflara kıyasla daha düşük olması ve nem emilimi gibi çevresel hassasiyetleri, kullanım alanlarını sınırlayan temel faktörlerdir.

#### **3.4.1. Doğal Elyaf Türleri**

Doymamış polyester kompozitlerde yaygın olarak kullanılan doğal elyaflar; keten, jüt, kenevir, sisal, ve hindistan cevizi elyafı olarak sınıflandırılabilir. Aşağıda farklı doğal elyafların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri verilmiştir. Doğal elyaf takviyeli doymamış polyester kompozitler, düşük ve orta seviyede mekanik performans gerektiren, çevre dostu uygulamalar için uygun bir çözüm sunmaktadır. Nem emilimi ve

ara-yüzey bağlanma problemleri; alkali işlem, asetilasyon ve silan kaplama gibi yüzey modifikasyonları ile kısmen giderilebilmektedir.

**Tablo 4. Farklı doğal elyafların, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri**

| Özellik                     | Keten   | Jüt      | Kenevir   | Sisal   | Hindistan cevizi |
|-----------------------------|---------|----------|-----------|---------|------------------|
| Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup> | 1.4-1.5 | 1.3-1.45 | 1.45-1.50 | 1.45    | 1.15-1.25        |
| Çekme dayanımı, MPa         | 500-900 | 400-800  | 550-900   | 400-700 | 100-250          |
| Elastiklik modülü, MPa      | 50-70   | 20-30    | 30-60     | 9-22    | 4-6              |
| Kopma uzaması, %            | 1.2-1.6 | 1.5-1.8  | 1.6       | 2-3     | 15-30            |
| Çalışma sıcaklığı, °C       | <200    | <180     | <200      | <200    | <150             |

#### **4. ELYAF-MATRİS ARAYÜZEYİ**

Elyaf/matris ara-yüzeyi, kompozit malzemelerde yük transferinin gerçekleştiği ve hasar oluşumunun başlatıldığı kritik bölgedir. Ara-yüzey bağlanmasının kalitesi, kompozitin mekanik, yorulma ve aşınma davranışlarını doğrudan etkilemektedir.

##### **4.1. Yük Transfer Mekanizması**

Doymamış polyester esaslı kompozitlerde uygulanan yükler, matristen elyaflara ara-yüzey kesme gerilmeleri yoluyla aktarılmaktadır. Ara-yüzey yapışmasının yetersiz olması durumunda, elyaf çekip çıkması, mikro çatlak oluşumu ve delaminasyon gibi hasar mekanizmaları ortaya çıkmaktadır.

##### **4.2. Ara-yüzey Bağlanma Türleri**

Arayüzey bağlanması, mekanik kilitleme, fiziksel etkileşimler ve kimyasal bağlanma olmak üzere üç temel mekanizma ile gerçekleşmektedir. UP reçinelerle cam elyaf arasındaki kimyasal bağlanma, genellikle silan bağlayıcılar aracılığıyla sağlanmaktadır.

#### **4.3. Yüzey Modifikasyon Teknikleri**

Silan bazlı bağlayıcılar, elyaf yüzeyinde hidroksil grupları ile reaksiyona girerek matris–elyaf aderansını artırmaktadır. Karbon ve aramid elyaflar için oksidasyon, plazma işlemi ve kaplama teknikleri ara-yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

#### **4.4. Ara-yüzeyin Mekanik ve Tribolojik Etkilere Katkısı**

Güçlü bir ara-yüzey bağlanması, yük transferini iyileştirerek çekme ve eğme dayanımını artırmaktadır. Aynı zamanda aşınma sırasında elyaf kopması ve matris soyulmasını azaltmaktadır. Tribolojik uygulamalarda ara-yüzey özellikleri, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

#### **4.5. Ara-yüzey Hasar Mekanizmaları**

Ara-yüzey hasarı, mikro çatlak ilerlemesi, elyaf-matris ayrılması ve delaminasyon şeklinde kendini göstermektedir. Bu hasar türleri, özellikle çevresel etkiler ve tekrarlı yükleme koşullarında kompozitin servis ömrünü sınırlayan başlıca faktörlerdir.

### **5. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ**

Elyaf takviyeli doymamış polyester esaslı kompozitlerin nihai özellikleri, kullanılan üretim yöntemiyle doğrudan ilişkilidir. Üretim tekniği, elyaf türü (kısa, uzun, sürekli veya dokuma), elyaf hacim oranı, boşluk miktarı ve ara-yüzey kalitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Bu bölümde el yatırma, vakum infüzyon, reçine transfer kalıplama (RTM) ve filament sarma yöntemleri, kısa elyaf, uzun elyaf, sürekli elyaf ve dokuma elyaf kullanımını açısından ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

### **5.1. El Yatırma Yöntemi**

El yatırma yöntemi, açık kalıplama teknikleri arasında en temel ve en yaygın üretim yöntemlerinden biridir. Yöntemin şematik resmi aşağıda Şekil 1’de verilmiştir. Özellikle büyük boyutlu, karmaşık geometrili ve düşük/orta üretim adetlerine sahip parçaların imalatında tercih edilmektedir.

**Kalıp Hazırlığı:** Üretim süreci kalıp yüzeyinin hazırlanması ile başlar. Kalıp yüzeyi genellikle cam elyaf takviyeli polyester, epoksi veya metal malzemeden üretilir. Yüzey düzgünlüğü, nihai ürünün yüzey kalitesini doğrudan etkilediğinden kalıp yüzeyi öncelikle temizlenir, yağ ve kirden arındırılır.

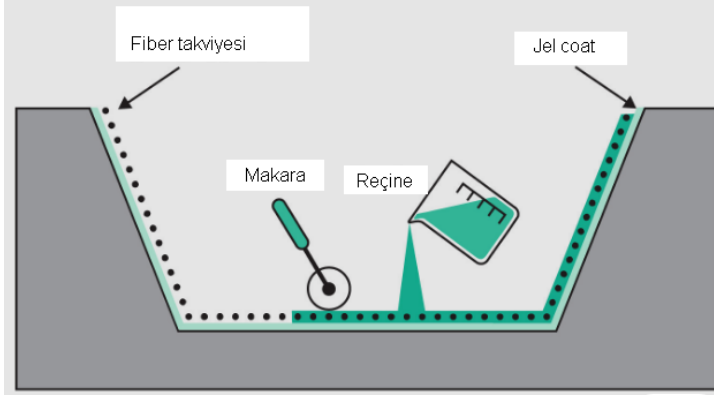
**Kalıp Ayırıcı Uygulaması:** Kalıptan kolay ayırma sağlamak amacıyla balmumu esaslı veya yarı kalıcı kimyasal kalıp ayırıcılar ince tabakalar halinde uygulanır. Ayırıcı malzeme, jel coat ve reçinenin kalıba yapışmasını engelleyerek yüzey hasarlarını minimize eder.

**Jel Coat Uygulaması:** Yüksek yüzey kalitesi, UV dayanımı ve estetik görünüm sağlamak amacıyla kalıp yüzeyine jel coat tabakası uygulanır. Jel coat genellikle pigmentli doymamış polyester esaslı olup fırça veya püskürtme yöntemiyle uygulanır ve yarı kürlenmiş duruma gelmesi beklenir.

**Elyaf Yerleştirme ve Reçine Emprenye:** Kısa, uzun veya dokuma elyaflar jel coat üzerine katmanlar halinde yerleştirilir. Hazırlanan doymamış polyester reçine (katalizör ve hızlandırıcı ilavesi ile) fırça veya rulo yardımıyla elyaflara emdirilir. Hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için metal veya plastik rulolar kullanılır.

**Kürlenme ve Kalıptan Ayırma:** Parça oda sıcaklığında veya kontrollü ortamda kürlenmeye bırakılır. Kürlenme tamamlandıktan sonra ürün kalıptan mekanik kuvvet

uygulanmadan dikkatlice ayrılır. Gerekli durumlarda kenar temizliği ve yüzey düzeltme işlemleri yapılır.



**Şekil 1. Elle yatırma tekniği (Willson, fictiv.com)**

## **5.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi**

Vakum infüzyon yöntemi, kapalı kalıplama teknikleri arasında yer almakta olup yüksek yüzey kalitesi, düşük boşluk oranı ve kontrollü elyaf/reçine oranı sağlamaktadır. Yöntem aşağıda kısaca açıklanmıştır ve vakum infüzyon yöntemi Şekil 2’de şematik olarak verilmiştir.

**Kalıp ve Yüzey Hazırlığı:** Kalıp yüzeyi el yatırma yöntemine benzer şekilde temizlenir ve uygun kalıp ayırıcılar uygulanır. Yüksek yüzey kalitesi gerektiren uygulamalarda jel coat kalıp yüzeyine uygulanarak ön kürlenmeye bırakılır.

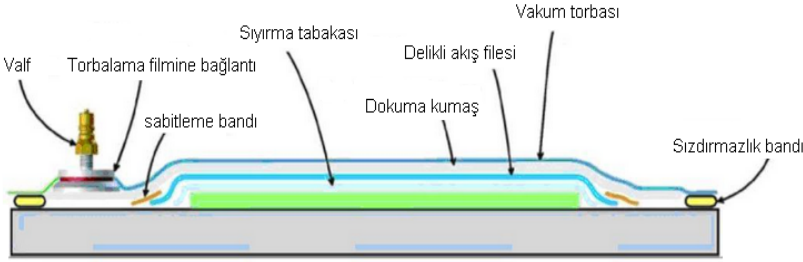
**Kuru Elyaf Yerleştirme (Preform Hazırlığı):** Kısa elyaflar nadiren kullanılırken, uzun ve dokuma elyaflar kuru halde kalıp yüzeyine yerleştirilir. Elyaf katmanları, istenen yönlenme ve kalınlık sağlanacak şekilde dizilir. Akış filesi, dağıtıcı kanallar ve vakum hattı sistemleri yerleştirilir.

**Vakum Torbası ve Sızdırmazlık:** Tüm sistem vakum torbası ile kapatılır ve sızdırmazlık bantları ile kapalı hale

getirilir. Vakum uygulanarak sistemdeki hava uzaklaştırılır ve elyaf paketinin sıkışması sağlanır.

**Reçine İnfüzyonu:** Düşük viskoziteli doymamış polyester reçine vakum etkisiyle elyaf yapısı içerisine çekilir. Reçinenin tüm elyafları homojen şekilde ıslatması sağlanır.

**Kürlenme ve Demontaj:** Reçine infüzyonu tamamlandıktan sonra parça vakum altında kürlenmeye bırakılır. Kürlenme sonrası vakum torbası ve yardımcı malzemeler sökülerek ürün kalıptan ayrılır.



**Şekil 2. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi (kevra.fi)**

### **5.3. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)**

RTM yöntemi, endüstriyel üretimde yüksek tekrarlanabilirlik ve boyutsal hassasiyet sunan kapalı kalıplama yöntemlerinden biridir.

**Kalıp ve Ayırıcı Uygulaması:** RTM kalıpları genellikle iki parçalı metal veya kompozit kalıplardan oluşur. Kalıp yüzeyleri temizlenir ve yarı kalıcı kalıp ayırıcılar uygulanır. Gerekli durumlarda jel coat uygulaması yapılabilir.

**Elyaf Preform Yerleştirme:** Kısa elyaflar sınırlı olmak üzere, uzun ve dokuma elyaflardan oluşan kuru preform kalıp içine yerleştirilir. Preform, nihai parça geometrisine uygun olarak şekillendirilir.

**Kalıbın Kapatılması ve Reçine Enjeksiyonu:** Kalıp kapatıldıktan sonra düşük viskoziteli doymamış polyester reçine,

basınç altında kalıp boşluğuna enjekte edilir. Reçine akışı, kalıp içindeki kanallar yardımıyla kontrol edilir.

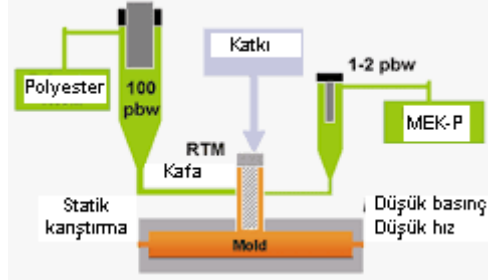
**Kürlenme ve Ürün Çıkartma:** Reçine enjeksiyonu tamamlandıktan sonra sistem kürlenmeye bırakılır. Kürlenme sonrası kalıp açılır ve ürün çıkarılır. RTM yöntemiyle elde edilen parçalar yüksek yüzey kalitesi ve düşük boşluk oranına sahiptir.

**Vakum İnfüzyon Yöntemi,** kapalı kalıplama teknikleri arasında yer almakta olup düşük boşluk oranı ve daha kontrollü elyaf-reçine oranı sağlamaktadır. Bu yöntemde elyaf preformu kuru halde kalıba yerleştirilir ve reçine vakum yardımıyla elyaf yapısı içerisine emdirilir.

Vakum infüzyon yönteminde kısa elyaf kullanımı sınırlıdır. Kısa elyafların reçine akışını engellemesi ve homojen preform oluşturma zor olması nedeniyle genellikle tercih edilmez. Ancak hibrit sistemlerde sınırlı oranlarda kullanılabilir. Sürekli ve uzun elyaflar, vakum infüzyon için en uygun takviye formudur. Elyaflar yönlendirilmiş şekilde yerleştirilerek yüksek elyaf hacim oranları (%50–60) elde edilebilir. Bu sayede mekanik özellikler ve yorulma dayanımı önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Dokuma elyaflar, vakum infüzyon yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Reçine akış kanallarının doğru tasarlanması, dokuma yapının tam olarak ıslanmasını sağlar. Bu yöntemle üretilen kompozitler, düşük boşluk oranı ve yüksek yüzey kalitesi sunar.

**RTM yöntemi,** kapalı kalıplama teknikleri arasında yer almakta olup yüksek boyutsal hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlamaktadır. Bu yöntemde kuru elyaf preformu kapalı kalıp içine yerleştirilir ve düşük viskoziteli doymamış polyester reçine basınç altında kalıba enjekte edilir. RTM yönteminde kısa elyaf kullanımı genellikle sınırlıdır. Kısa elyaflar, preform stabilitesini düşürebilir ve reçine akışını olumsuz etkileyebilir. Ancak lokal

takviye veya dolgu amacıyla kontrollü şekilde kullanılabilir.

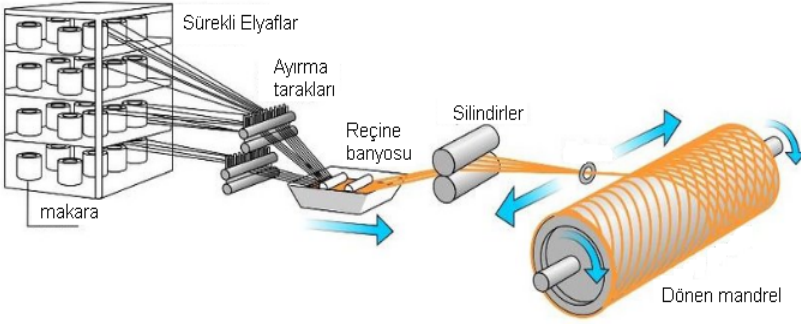


**Şekil 3. Vakum infüzyon yöntemi şematik gösterimi  
(osbornindustries.com)**

Uzun ve sürekli elyaflar, RTM için ideal takviye formudur. Elyaf yönlenmesi hassas şekilde kontrol edilebilir ve yüksek mekanik performans elde edilir. Bu yöntem, otomotiv ve yapısal uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Dokuma elyaflar RTM yönteminde en sık kullanılan takviye türüdür. Elyaf preformları, kalıp geometrisine uygun şekilde önceden şekillendirilebilir. RTM ile üretilen dokuma elyaf takviyeli kompozitler, düşük boşluk oranı, yüksek yüzey kalitesi ve iyi mekanik özellikler sunmaktadır.

#### **5.4. Filament Sarma Yöntemi**

Filament sarma yöntemi, sürekli elyafların (cam, karbon veya aramid) kontrollü bir şekilde reçine ile emprenye edilerek belirli bir açı, hız ve gerilim altında dönen bir mandrel üzerine sarılması esasına dayanan ileri bir kompozit üretim tekniğidir. Bu yöntem, özellikle aksel simetriye sahip yüksek dayanımlı ve yüksek rijitlikli yapıların üretiminde tercih edilmektedir. Filament sarma yönteminin şematik gösterimi Şekil 4’de verilmiştir.



**Şekil 4. Flament sarma yönteminin şematik gösterimi**

#### **5.4.1. Elyaf-Reçine Sistemi ve Karışım Detayı**

Filament sarma prosesinde en yaygın kullanılan matris sistemleri doymamış polyester, vinil ester ve epoksi reçinelerdir. UP esaslı sistemler; düşük maliyet, hızlı kurlenme ve cam elyafı ile iyi uyum nedeniyle endüstriyel uygulamalarda geniş yer bulmaktadır.

Reçine sistemi tipik olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

Ana bağlayıcı faz olan doymamış polyester reçine, Viskozite kontrolü ve çapraz bağlanma için reaktif seyreltici stiren, kür reaksiyonunun başlatılması için genellikle %1-2 başlatıcı (MEKP) ile kür hızının kontrolü için hızlandırıcı kKobalt naftenat), Pot-life kontrolü için inhibitör, ıslanabilirlik artırıcı, köpük kesici ve UV stabilizatör gibi katkılardan oluşur.

Filament sarma için reçine viskozitesi genellikle 200–600 mPa·s aralığında tutulur. Düşük viskozite, elyaf demetlerinin tam ıslanmasını sağlarken, aşırı düşük viskozite reçine akmasına ve reçine-zengin bölgelere yol açabilir. Elyaf/reçine oranı, sarım hızı ve elyaf gerilimi ile doğrudan ilişkilidir. Proses uygun şekilde optimize edildiğinde %60–70 elyaf hacim oranı elde edilebilir.

#### **5.4.2.Elyaf Tipleri: (Sürekli, Hoop ve kırılmış Elyaflar)**

Sürekli Elyaflar: Filament sarma prosesinin temelini sürekli elyaflar oluşturur. Cam (E-cam, S-cam), karbon ve aramid elyaflar yaygın olarak kullanılır. Sürekli elyaflar, yüksek çekme ve basma dayanımı sağlar ve yüklerin etkin biçimde taşınmasına olanak tanır.

Hoop Elyaflar ( $\approx 90^\circ$  Sarım): Hoop sarımda elyaflar mandrel eksenine dik olacak şekilde (yaklaşık  $90^\circ$ ) sarılır. Bu yapı özellikle:

- Çevresel (hoop) gerilmelerin baskın olduğu
- İç basınç altında çalışan
- Boru ve basınçlı kap uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Hoop elyaflar, radyal genleşmeyi sınırlar ve patlama basıncını önemli ölçüde artırır.

Helisel Elyaflar ( $\pm\theta$ ): Helisel sarımda elyaflar genellikle  $\pm 15^\circ$ – $\pm 75^\circ$  açılarıyla sarılır. Bu yapı:

- Eksenel yüklerin taşınmasını
- Burulma ve kombine yüklerin karşılanmasını sağlar. Pratik uygulamalarda hoop ve helisel sarımlar birlikte kullanılarak çok eksenli yük taşıma kapasitesi optimize edilir.

Kırılmış Elyaf Kullanımı: Klasik filament sarma sürekli elyaflara dayansa da, bazı özel uygulamalarda (kısa kesilmiş) elyaflar yardımcı faz olarak kullanılabilir. Kırılmış elyaflar genellikle: İç yüzey astar tabakası, yüzey düzgünlüğü artırma ve reçine zengin bölgelerde çatlak ilerlemesini sınırlandırma amaçlarıyla uygulanır. Ancak kırılmış elyaf kullanımı, mekanik performansı sınırlı ölçüde artırır ve esas yük taşıma görevini üstlenmez.

### **5.4.3.Elyaf Yönlenmesi, Gerilim ve Mekanik Performans İlişkisi**

Elyaf sarım açısı ve elyaf gerilimi, nihai kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan belirler.

Yüksek elyaf gerilimi: Elyaf dalgalanmasını azaltır. Aynı zamanda Elyaf/matris yapışmasını iyileştirir ve Elastik modül ve yorulma dayanımını artırır. Ancak aşırı elyaf gerilimi, mandrel deformasyonuna ve reçine fakir bölgelere yol açabilir. Bu nedenle filament sarma prosesinde gerilim/hız/viskozite dengesi kritik öneme sahiptir. Basıncı kaplar, LPG ve hidrojen tüpleri, kompozit borular, kimyasal tanklar, denizcilik boru sistemleri ve roket motor muhafazaları tipik uygulama alanlarıdır.

### **5.4.4.Sarım Açısı Oranları ve Patlama Basıncı İlişkisi**

Filament sarma ile üretilen basınçlı kap ve boru gibi yapılarda nihai mekanik performansın en kritik belirleyicilerinden biri hoop ve helisel sarım oranlarıdır. İç basınç altında çalışan silindirik yapılarda çevresel (hoop) gerilmeler, eksenel gerilmelere kıyasla yaklaşık iki kat daha büyüktür. Bu nedenle tipik bir filament sarma tasarımında %55–70 hoop ( $\approx 90^\circ$ ) sarım ve %30-45 helisel ( $\pm 15^\circ$ – $\pm 55^\circ$ ) sarım oranları tercih edilir.

Hoop sarım oranının artırılması patlama basıncını yükseltirken, aşırı hoop sarım eksenel çatlaklara yol açabilir. Helisel sarım ise eksenel dayanımı ve yapısal bütünlüğü sağlar. Optimum tasarımda her iki sarım tipi birlikte kullanılır.

### **5.4.5.UP, Vinil Ester ve Epoksi Reçinelerin Filament Sarmada Karşılaştırılması**

Filament sarma prosesinde kullanılan matris polimerlerin, mekanik, termal ve kimyasal performansları doğrudan etkilemektedir ve aşağıda Tablo 5’de karşılaştırmalı verilmiştir.

**Tablo 5. Filament sarma yönteminde kullanılan bazı matris polimerlerin, mekanik, termal ve kimyasal performansları**

| Reçine Sistemi | Avantaj                        | Dezavantaj              | Tipik kullanım alanları     |
|----------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| UP             | Düşük maliyet, hızlı kurlenme  | Orta mekanik performans | Cam elyaf takviyeli borular |
| Vinil ester    | Yüksek kimyasal direnç, tokluk | Orta maliyet            | Kimyasal tanklar            |
| Epoksi         | En yüksek mekanik performans   | Yüksek maliyet          | Basınçlı kaplar             |

#### **5.4.6. Jel Coat Kullanımının Amacı ve Zamanlaması**

Jel Coat Kullanımının Amacı ve Zamanlaması Jel coat, kompozit üretiminde nihai ürünün yüzey kalitesini artırmak, çevresel etkilere karşı koruma sağlamak ve estetik görünüm kazandırmak amacıyla kullanılan pigmentli bir doymamış polyester esaslı kaplama tabakasıdır. Yüksek yüzey düzgünlüğü ve parlaklık sağlamak, UV ışınları, nem ve kimyasal etkilere karşı bariyer oluşturmak, mikroyapısal yüzey hatalarını gizlemek ve aşınma ve korozyon direncini artırmak aslında jel coat kullanılma sebepleri arasındadır.

Jel coat genellikle, açık ve yarı kapalı kalıplama yöntemlerinde (el yatırma, vakum infüzyon, RTM), yüzey kalitesinin kritik olduğu denizcilik, otomotiv ve mimari uygulamalarda ve üretim sürecinin başında, elyaf yerleştirilmeden önce kalıp yüzeyine uygulanır.

#### **5.5. Vakum İnfüzyonda Akış Elemanlarının Rolü**

Vakum infüzyon yönteminde reçinenin elyaf preformu içerisinde homojen ve kontrollü şekilde ilerlemesi, kullanılan akış elemanlarına doğrudan bağlıdır. Yöntemde akış filesi, reçinenin yüzey boyunca hızlı ve dengeli yayılmasını sağlar. Büyük parçalarda kuru bölge oluşumunu önler. Dağıtıcı kanallar ve spiral hortumlar ise reçinenin giriş noktalarından eşit şekilde dağıtılmasını sağlar. Akış cephesinin dengeli ilerlemesine katkı

sunar. Vakum hatları ise sistemdeki havayı uzaklaştırarak boşluk oluşumunu minimize eder ve reçine emilimini kolaylaştırır.

### **5.6. RTM’de Basınç-Akış-Tekrarlanabilirlik İlişkisi**

RTM yönteminde reçine enjeksiyon basıncı, akış hızı ve kalıp geometrisi arasındaki denge, nihai ürün kalitesini belirleyen temel faktörlerdir.

**Basınç:** Reçinenin elyaf preformunu tamamen ıslatmasını sağlar. Yetersiz basınç kuru bölgelere, aşırı basınç ise elyaf yer değiştirmesine neden olabilir.

**Akış:** Kontrollü akış, homojen reçine dağılımı ve düşük boşluk oranı sağlar.

**Tekrarlanabilirlik:** Kapalı kalıp ve sabit proses parametreleri sayesinde RTM, seri üretimde yüksek kalite tutarlılığı sunar.

### **5.7. Üretim Yöntemlerine Göre Tipik Hatalar ve Kusurlar**

Kompozit üretimi gerçekleştirilirken üretimde bazı hatalar ve kusurlar oluşmaktadır. Bunlar, aşağıdaki Tablo 6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca yöntemlerin proses özellikleri de aşağıdaki Tablo 7’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Tablo 6. Üretim yöntemlerine göre tipik hatalar ve kusurlar**

| Kusur türü         | El Yatırma | Vakum İnfüzyon | RTM       |
|--------------------|------------|----------------|-----------|
| Boşluk (porozite)  | Yüksek     | Düşük          | Çok düşük |
| Kuru bölge         | Orta       | Düşük          | Düşük     |
| Reçine zengin alan | Yüksek     | Orta           | Düşük     |
| Elyaf kayması      | Orta       | Düşük          | Düşük     |

**Tablo 7. Karşılaştırmalı Proses Tablosu**

| Kriter                | El Yatırma | Vakum İnfüzyon | RTM       |
|-----------------------|------------|----------------|-----------|
| Elyaf hacim oranı (%) | 30-40      | 50-60          | 45-60     |
| Boşluk oranı          | Yüksek     | Düşük          | Çok düşük |
| Yüzey kalitesi        | Orta       | İyi            | Çok iyi   |
| Seri üretim           | Zayıf      | Orta           | Çok iyi   |
| Maliyet               | Düşük      | Orta           | Yüksek    |

### **5.8. UP Esaslı Kompozitlerde Jel Coat/Ara-yüzey Etkileşimi**

Doymamış polyester esaslı kompozitlerde jel coat ile ana matris arasındaki ara-yüzey, uzun dönem performans açısından kritik öneme sahiptir.

**Çatlak Oluşumu:** Termal genleşme farkları ve mekanik yükler, jel coat tabakasında mikro çatlaklara yol açabilir.

**Soyulma (Delaminasyon):** Yetersiz arayüzey aderansı veya uygunsuz kürlleme, jel coat tabakasının ana kompozitten ayrılmasına neden olabilir.

**Yaşlanma:** UV ışınları, nem ve kimyasal maruziyet, jel coat yapısında gevrekleşmeye ve renk solmasına yol açar. Bu durum zamanla mekanik ve tribolojik performansı olumsuz etkiler.

## **6. MEKANİK ÖZELLİKLER**

Elyaf takviyeli doymamış polyester (UP) esaslı kompozitlerin mekanik performansı; kullanılan elyaf türü, elyaf hacim oranı ve elyaf yönlenmesine güçlü biçimde bağlıdır. Bu bölümde çekme ve eğme özellikleri, literatürde yaygın olarak verilmiştir. Aşağıdaki Tablo 8’de farklı elyaf türlerinin çekme ve eğme özellikleri verilmiştir.

Aşağıdaki Tablo 9’da elyaf yönlenmesine göre doymamış polyester takviyeli polyester kompozitin mekanik özellikleri ile Tablo 10’da ise elyaf hacim oranının mekanik özelliklere etkisi

verilmiştir. Elyaf takviyeli UP kompozitlerde en yüksek çekme ve eğme performansı, yüksek elyaf hacim oranına sahip, sürekli ve yönlendirilmiş elyaf sistemlerinde elde edilmektedir.

**Tablo 8. Elyaf türüne göre çekme ve eğme özellikleri**

| Elyaf Türü         | Elyaf Hacim Oranı (%) | Çekme Dayanımı (MPa) | E- Modülü (çekmede) (GPa) | Eğme Dayanımı (MPa) | E-modülü (eğmede) (GPa) |
|--------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------|
| Cam (E-camı)       | 30–35                 | 150–220              | 10–15                     | 200–280             | 8–12                    |
|                    | 45–50                 | 300–400              | 18–25                     | 400–550             | 15–20                   |
| Karbon (HS)        | 40–50                 | 500–800              | 40–70                     | 600–900             | 35–60                   |
| Aramid (Para)      | 40–50                 | 400–650              | 20–35                     | 350–550             | 15–30                   |
| Doğal (Keten/ Jüt) | 30–40                 | 80–180               | 6–12                      | 120–250             | 5–10                    |

Dokuma elyaflar dengeli mekanik özellikler sunarken, kısa elyafli sistemler daha düşük dayanım ancak daha izotropik davranış göstermektedir. Karbon elyaf takviyeli UP kompozitler rijitlik açısından öne çıkarken, aramid elyaflar tokluk ve darbe dayanımı açısından avantaj sağlamaktadır.

**Tablo 9. Elyaf yönlenmesine göre mekanik özellikler (Cam elyaf takviyeli polyester kompozit)**

| Elyaf Yapısı / Yönlenme       | Elyaf Hacim Oranı (%) | Çekme Dayanımı (MPa) | Eğme Dayanımı (MPa) | Mekanik Anizotropi |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| Kısa elyaf- rastgele          | 20–30                 | 60–120               | 100–180             | Düşük              |
| Sürekli elyaf- tek yönlü (0°) | 45–55                 | 350–500              | 450–600             | Çok yüksek         |
| Çapraz katman (0°/90°)        | 45–55                 | 250–380              | 350–500             | Orta               |
| Dokuma elyaf                  | 40–50                 | 220–350              | 300–450             | Dengeli            |
| Dokuma elyaf (twill/saten)    | 40–50                 | 250–400              | 350–520             | Dengeli–yüksek     |

**Tablo 10. Elyaf hacim oranının mekanik özelliklere etkisi**

| Elyaf Hacim Oranı (%) | Çekme Dayanımı | Eğme Dayanımı | Tipik Açıklama                |
|-----------------------|----------------|---------------|-------------------------------|
| < 25                  | Düşük          | Düşük         | Matris baskın davranış        |
| 30–40                 | Orta           | Orta          | Yük aktarımı başlar           |
| 45–55                 | Yüksek         | Yüksek        | Optimum mekanik performans    |
| >60                   | Düşüş eğilimi  | Düşüş eğilimi | Islatma zorluğu, boşluk riski |

### **6.1. Çekme ve Eğme Yükleri Altında Hasar Mekanizmaları**

Elyaf takviyeli UP kompozitlerde mekanik yükleme sırasında oluşan hasar türleri, elyaf tipi, yönlenmesi ve matris/elyaf ara-yüzey özelliklerine bağlıdır.

Çekme yükü altında hasar türleri aşağıdaki gibi olabilir. Matris mikro-çatlakları (ilk hasar başlangıcı), Elyaf-matris ara-yüzey ayrılması, elyaf kopması (yüksek elyaf hacimli sistemlerde baskın) ve delaminasyon (çok katmanlı ve dokuma yapılarda)

Eğme yükü altında hasar türleri aşağıdaki gibi olabilir. Basma tarafında matris burkulması, Çekme tarafında elyaf kırılması, katmanlar arası kayma ve delaminasyon şeklinde olabilir.

Kısa elyafli kompozitlerde hasar daha yayılı ve kademeli ilerlerken, sürekli elyafli sistemlerde hasar daha ani ve lokalize olmaktadır. Karbon elyaf takviyeli UP kompozitler, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci gösterirken, aramid elyafli sistemler darbe ve yorulma koşullarında daha kararlı tribolojik davranış sergilemektedir.

### **6.2. Üretim Yöntemi-Elyaf Yönlenmesi-Mekanik Performans İlişkisi**

Üretim yöntemi, elyaf yönlenmesi ve hacim oranı üzerinde belirleyici olduğundan, nihai mekanik performansı doğrudan etkilemektedir. Bu ilişki, kompozit tasarımında üretim

yöntemi seçiminin yalnızca maliyet değil, aynı zamanda mekanik ve tribolojik performans açısından da kritik olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki Tablo 11’de elyaf takviyeli kompozitlerin üretim yöntemine göre elyaf hacmi, mekanik özellik ilişkisi verilmiştir.

**Tablo 11. Üretim yöntemine göre elyaf hacmi, mekanik özellik ilişkisi**

| Üretim Yöntemi | Elyaf Yapısı                  | Elyaf Hacmi (%) | Çekme / Eğme Performansı | Tipik Kullanım                    |
|----------------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| El yatırma     | Kısa elyaf / dokuma           | 25–40           | Orta                     | Büyük/ düşük yük taşıyan parçalar |
| Vakum infüzyon | Sürekli elyaf / dokuma        | 45–60           | Yüksek                   | Yapısal paneller, denizcilik      |
| RTM            | Sürekli elyaf/ yönlendirilmiş | 45–60           | Çok yüksek               | Otomotiv, havacılık parçaları     |

## 7. SONUÇ

Elyaf takviyeli doymamış polyester esaslı kompozitler, düşük maliyet ve kolay işlenebilirlik avantajlarını geliştirilmiş mekanik performans ile birleştiren önemli mühendislik malzemeleridir. Saf UP reçineler gevrek davranış sergilediğinden yapısal uygulamalarda sınırlı kalırken, elyaf takviyesi sayesinde çekme, eğme ve darbe dayanımı önemli ölçüde artırılmaktadır. Özellikle sürekli ve yönlendirilmiş elyaf kullanımı, yük transfer mekanizmasını iyileştirerek yüksek özgül dayanım ve rijitlik değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır. Cam elyaf takviyeli sistemler maliyet/performans dengesi açısından yaygın olarak tercih edilirken, karbon elyafli kompozitler daha yüksek rijitlik ve yorulma dayanımı gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Aramid elyaflar ise yüksek tokluk ve darbe direnci ile enerji sönmüleme gerektiren alanlarda avantaj sunmaktadır. Bununla birlikte, kompozitin nihai performansında elyaf–matris ara yüzey

kalitesi belirleyici bir rol oynamaktadır. Güçlü bir ara yüzey yapışması, yük transferini artırmakta ve hasar mekanizmalarını azaltmaktadır. Üretim yöntemi de malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir. El yatırma yöntemi ekonomik olmakla birlikte daha yüksek boşluk oranına sahip olabilirken, vakum infüzyon ve RTM gibi kapalı kalıplama teknikleri daha düşük porozite ve daha kontrollü elyaf hacim oranı sağlamaktadır. Sonuç olarak, uygun elyaf seçimi, optimum hacim oranı ve kontrollü üretim parametreleri ile UP esaslı kompozitler, hem yapısal hem de endüstriyel uygulamalarda güvenilir ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

## KAYNAKÇA

- Abbas, M. A., & Al-Turaihi, A. S. (2025). A review of particulate fillers in unsaturated polyester composites: Property enhancement and applications. *The Iraqi Journal for Mechanical and Materials Engineering*, 24(3), 32–56.
- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekara, K. (2017). *Analysis and performance of fiber composites* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Chabros, A., Gawdzik, B., Podkościelna, B., Goliszek, M., & Pączkowski, P. (2019). Composites of unsaturated polyester resins with microcrystalline cellulose and its derivatives. *Materials*, 13(1), 62.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed.). New York, NY: Springer.
- Fictiv. (n.d.). *Composite layup manufacturing guide*. Retrieved from <https://www.fictiv.com/articles/composite-layup-manufacturing-guide>
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kevra. (n.d.). *Vacuum infusion guide*. Retrieved from <https://kevr.fi/guides/vacuum-infusion/?lang=en>
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Osborne Industries. (n.d.). *How the resin transfer molding process works*. Retrieved from <https://www.osborneindustries.com/news/resin-transfer-molding-process-works/>

- Poyraz, B. (2018). Kompozit malzeme üretiminde kullanılan polyesterlerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerine başlatıcı etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 1383–1396.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers.

# **ENDÜSTRİYEL PROSESLERDE MALZEME DAVRANIŞI VE İŞ SAĞLIĞI RİSKLERİ: TERMAL, MEKANİK VE KİMYASAL TEHLİKELERİN MALZEMEYE ETKİSİ**

**Özlem AYDIN<sup>1</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Endüstriyel proseslerde metal ve seramik malzemeler yüksek sıcaklık, korozif kimyasallar ve mekanik zorlanmaların birlikte etkili olduğu koşullarda çalışmakta; bu durum malzeme performansı, ekipman güvenliği ve iş sağlığını doğrudan etkilemektedir (Jose ve diğerleri., 2025).

Yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve termal yükler yüzey hasarı ve ani arızalara yol açabilmekte; kaynak işlemlerinde açığa çıkan metal dumanları ve ultra-ince partiküller kısa ve uzun vadeli solunum sistemi etkileri doğurabilmektedir (Pineda Huitron ve diğerleri, 2020 ; Cha ve diğerleri., 2022; Riccelli ve diğerleri., 2020).

Kimyasal kaplama ve yüzey işlemlerindeki agresif reaksiyonlar malzeme bütünlüğünü zayıflatmakta ve uçucu kimyasal buharlar irritatif ve kronik sağlık etkileri oluşturabilmektedir (Liu ve diğerleri, 2024; Yıldız ve diğerleri., 2024; Mo, Lu ve Shao, 2021; Seo ve diğerleri, 2024; Ulker, Ulker ve Hızıroğlu, 2021; Ciocan, 2015).

Literatür, termal, mekanik ve kimyasal tehlikeler ile malzeme bozunma mekanizmaları ve İSG riskleri arasındaki

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İstanbul Türkiye, ORCID: 0000-0002-9889-4035.

ilişkinin disiplinler arası değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Barbey, Bonvallot ve Clerc, 2024; Ben Salem ve diğerleri, 2025; Vitale, Demichela ve Barresi, 2025; ILO, 2019). Çoklu tehlikelere maruz kalan malzemelerde gelişen yüzey bozulmaları ve çatlak oluşumu ekipman bütünlüğünü zayıflatarak ciddi İSG sonuçlarına yol açabilmektedir (Chen ve diğerleri, 2022; Li ve diğerleri, 2025; Ndukwe ve diğerleri, 2025; OSHA, 1994).

Malzeme bozunması iş sağlığı riskleriyle çoğu zaman dolaylı ancak yüksek etkili biçimde ilişkilidir: ergimiş metal sıçramaları, refrakter çatlamaları ve kaynak dumanları doğrudan yaralanma ve hastalık riski oluştururken (Brochen ve diğerleri, 2016; Kahn ve McCrady-Kahn, 1981; Dueck ve diğerleri., 2021; Knott ve diğerleri, 2023; Uddeholms AB, 2018), basınçlı kap yorulması, korozyon kaynaklı cidar kayıpları ve kaynaklı birleşim kusurları ani kırılma ve patlama riskini artırmaktadır (Islam ve diğerleri, 2018; Liu ve diğerleri, 2024; Song ve diğerleri, 2023; An ve diğerleri, 2019).

Bu nedenle malzeme seçimi, yüzey mühendisliği, proses kontrolü ve bütünlük yönetimi güvenli işletmenin temel unsurlarıdır (Ayomoh ve Ongwae, 2025; Han ve diğerleri, 2024). Bu bağlamda malzeme bozunma mekanizmalarının yalnızca performans değil, potansiyel kaza senaryoları açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma, söz konusu ilişkiyi termal, mekanik ve kimyasal tehlikeler çerçevesinde sistematik olarak incelemektedir.

## 2. TERMAL TEHLİKELERİN MALZEME DAVRANIŞINA ETKİSİ VE İŞ SAĞLIĞI RİSKLERİ

### 2.1. Derleme yaklaşımı ve kapsam

Bu bölümde, endüstriyel proseslerde karşılaşılan yüksek sıcaklık ve termal çevrimlerin metal ve seramik esaslı malzemelerde yol açtığı başlıca termal bozunma mekanizmaları ele alınmaktadır. Oksidasyon, termal şok, termal yorulma ve sıcaklığa bağlı mikro yapısal değişimlerin malzeme bütünlüğü üzerindeki etkileri ile bunların olası arıza senaryoları ve iş sağlığı-güvenliği sonuçları tartışılmaktadır. Termal, mekanik ve kimyasal tehlikeler arasındaki bütüncül ilişki ise Tablo 1’de literatüre dayalı olarak sunulmuştur (Jose ve diğerleri, 2025; Vitale, Demichela ve Barresi, 2025; Chen ve diğerleri, 2022; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013; Ehrnstén, Andresen ve Que, 2024; Campari ve diğerleri, 2023).

**Tablo 1. Endüstriyel proseslerde termal, mekanik ve kimyasal tehlikeler ile malzeme bozunma mekanizmaları, arıza senaryoları ve iş sağlığı ve güvenliği sonuçları arasındaki ilişki.**

| Tehlike                             | Bozunma Mekanizması                      | Arıza Senaryosu                          | İşg Sonucu                                      |
|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Yüksek sıcaklık / termal çevrim     | Oksidasyon / termal şok / termal yorulma | Çatlak / ölçek dökülmesi / parça kopması | Yanık / göz yaralanması / sıcak parça sıçraması |
| Değişken yük / titreşim / aşırı yük | Yorulma / plastik deformasyon / burkulma | Ani kırılma / yapısal çökme              | Ezilme / travma                                 |
| Korozif ortam                       | Genel korozyon / lokal korozyon          | Cidar incilmesi / sızdırmazlık kaybı     | Toksik / yanıcı salım / akut maruziyet          |
| Korozif Ortam + çekme gerilmesi     | Stres korozyon çatlaması (SCC)           | Kararsız kırılma                         | Patlama / ikincil kaza                          |
| Hidrojen içeren servis koşulları    | Hidrojen Gevrekleşmesi (HE)              | Beklenmedik gevrek kırılma               | KontROLSÜZ tehlikeli madde salımı               |

Endüstriyel proseslerde yaygın olan yüksek sıcaklık maruziyeti, malzeme davranışını belirleyen temel termal bozunma mekanizmalarını tetiklemektedir.

## **2.2. Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon**

Metal yüzeylerinin yüksek sıcaklıkta oksidasyona maruz kalması, özellikle sürekli ısı altında çalışan enerji, petrokimya ve üretim sistemlerinde yaygın ve kaçınılmaz bir bozunma mekanizmasıdır. Yüksek sıcaklık koşullarında metal ile çevredeki oksijen arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan oksit tabakaları zamanla kalınlaşmakta; bu büyüme süreci difüzyon kontrollü ilerleyerek yüzey bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Oksit tabakasının kalınlaşması ve yapısal heterojenliği, ölçek oluşumu, çatlama ve yüzeyden dökülme gibi hasar biçimlerine yol açabilmektedir (Samal, 2016; Zou ve diğerleri, 2025).

Karbon çeliklerinde  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  fazlarından oluşan çok tabakalı oksit yapısı, farklı termal genleşme katsayıları ve elastik özellikler nedeniyle oksit-altlık ara yüzeyinde gerilme birikimine neden olmaktadır. Bu gerilme birikimi, özellikle uzun süreli yüksek sıcaklık maruziyetinde oksit tabakasının aderansını azaltarak dökülmeyi hızlandırmakta ve altlık metalin yeniden oksidasyona açık hâle gelmesine yol açmaktadır (Cao ve diğerleri, 2021). Böylece oksidasyon ilerleyici bir süreç kazanarak malzeme kaybını ve kesit zayıflamasını artırabilmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda oksijen difüzyonuna bağlı büyüme gerilmeleri ile tekrarlı termal çevrimler, oksit tabakasında mikro çatlakların oluşmasına ve tabakanın yer yer ayrılmasına neden olabilmektedir. Bu durum taşıyıcı elemanlarda gerilme yığılmalarını artırarak ani kırılma riskini yükseltebilmektedir (Gu ve diğerleri, 2025; Li ve diğerleri, 2025). Özellikle termal çevrimler ve mekanik titreşimlerin birlikte etkili olduğu

koşullarda oksit parçalarının dökülmesi ve sıçraması, döküm ve yüksek sıcaklık proses alanlarında çalışanlar için yanık ve göz yaralanması gibi doğrudan İSG riskleri oluşturabilmektedir (Bertan ve Selim, 2025). Bunun yanında ilerleyen oksidasyon, yüzey kusurları üzerinden yorulma çatlaklarının başlatılmasını kolaylaştırarak yorulma ömründe belirgin düşüslere neden olabilmektedir (Li ve diğerleri, 2025).

### **2.3. Termal Şok ve Termal Yorulma**

Endüstriyel proseslerde ani ve tekrarlı sıcaklık değişimleri, termal şok ve termal yorulma mekanizmalarını tetiklemektedir. Hızlı ısıtma veya soğutma sırasında oluşan sıcaklık gradyanları yüzey bölgelerinde yüksek termal gerilmeler oluşturarak çatlak başlatma ve ilerlemesine neden olabilmektedir. Termal şok direnci; termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı ve mekanik dayanım gibi malzeme özelliklerine bağlıdır; bu nedenle seramikler ve refrakter malzemeler ani sıcaklık değişimlerine karşı daha hassas davranmaktadır. (Lu ve Fleck, 1998; Panda ve diğerleri 2002).

Tekrarlı ısıtma-soğutma çevrimleri altında oluşan geçici gerilmeler çatlak uçlarında birikimli hasara yol açarak mikro çatlakların birleşmesine ve mekanik bütünlüğün zayıflamasına neden olabilmektedir (Lu ve Fleck, 1998; Panda ve diğerleri 2002). Bu süreçler yüksek sıcaklık ekipmanlarında servis ömrünü sınırlandırmakta; uygun termal yükleme stratejileri ve izleme yaklaşımları İSG açısından önleyici rol oynamaktadır (Lu ve Fleck, 1998; Panda ve diğerleri 2002).

### **2.4. Sıcaklığa Bağlı Faz Dönüşümleri ve Mikroyapı Değişimi**

Yüksek sıcaklık ve tekrarlı ısı çevrimler, termal gerilmelerin yanı sıra faz dönüşümleri ve mikroyapısal değişimler yoluyla malzeme davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Kritik sıcaklıkların aşılmasıyla denge

fazlarının yeniden düzenlenmesi veya metastabil faz oluşumu gibi katı hâl dönüşümleri meydana gelebilmektedir (Distl ve diğerleri, 2021). Bu süreçler faz dağılımı ve arayüz yapısını değiştirerek iç gerilme durumunu ve mekanik özellikleri etkilemekte; özellikle çelik ve demir esaslı alaşımlarda sıcaklığa duyarlı dönüşümler ile uzun süreli yüksek sıcaklıkta çökme süreçleri servis davranışını belirleyebilmektedir (Li ve diğerleri, 2024; Wen ve diğerleri, 2024; Sourmail, 2001).

## **2.5. Ergimiş Metal Tehlikeleri**

Ergimiş metal sıçramaları, dökümhane ve metalurjik proseslerde karşılaşılan en ciddi iş sağlığı ve güvenliği risklerindendir. Ergitme ve dökme aşamalarında sıvı metalin yüksek ısı enerjisi, küçük proses sapmalarının dahi ani sıçramalara, ağır yanıklara ve patlamalara yol açmasına neden olabilmektedir (Bertan ve Selim, 2025; Şentürk, 2016).

## **3. MEKANİK TEHLİKELERİN MALZEMEYE ETKİSİ VE İŞ SAĞLIĞI RİSKLERİ**

Mekanik tehlikeler kapsamında öne çıkan bozunma mekanizmaları Tablo 1’de bütüncül model içinde sunulmuştur. Endüstriyel proseslerde tekrarlı ve değişken yüklemelere maruz kalan yapısal bileşenlerde mekanik hasar birikimi, servis ömrünü sınırlayan ve ani arızalara yol açabilen temel bir süreçtir. Bu hasar yalnızca yorulma ile sınırlı olmayıp, yükleme ve deformasyon koşullarına bağlı farklı mekanizmalar da gelişebilmektedir (Hectors ve diğerleri, 2023; Li ve diğerleri, 2020).

### **3.1. Yorulma ve Yapısal Arıza Riski**

Yorulma, tekrarlı veya değişken mekanik yükler altında çoğu zaman ön uyarı vermeden ani kırılmaya yol açabilen kritik bir arıza mekanizmasıdır (Basak, Bajwa ve Pramanik, 2025).

Basınçlı kaplar, kaldırma ekipmanları ve döner makineler gibi yüksek enerjili sistemlerde yorulma kırılmaları; patlama, çökme ve parça fırlaması gibi ağır kaza senaryolarına neden olarak ciddi iş sağlığı ve güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Bu nedenle yorulma, yalnızca bir dayanım problemi değil, doğrudan çalışan güvenliğini etkileyen kritik bir İSG riskidir (Basak, Bajwa ve Pramanik, 2025).

### **3.2. Aşırı Yükleme ve Plastik Deformasyon Kaynaklı Hasar Mekanizmaları**

Aşırı yükleme altında gelişen plastik deformasyon, yük taşıyan elemanlarda kesit etkinliği ve rijitliği azaltarak yerel kararsızlık riskini artırmaktadır. Sünek malzemelerde plastik şekil değişimi kırılma süreçleriyle doğrudan ilişkilidir ve sünek kırılma belirgin plastik deformasyon eşliğinde gelişebilmektedir (Pantazopoulos, 2019). İnce cidarlı elemanlarda burkulma ve artan yerel gerilmeler çatlak başlangıcını tetikleyerek ani kırılma veya göçmeye yol açabilmektedir. Kule vinç analizleri bu tür kararsızlıkların yorulma hasarı ve yapısal bütünlük kaybına yol açarak ciddi güvenlik olayları oluşturabildiğini göstermektedir (Zhang ve diğerleri, 2025; Pantazopoulos, 2019).

## **4. KİMYASAL TEHLİKELER VE MALZEME BOZULMASI**

Kimyasal etkiler ile malzeme bütünlüğü ve İSG sonuçları arasındaki ilişki Tablo 1’de bütüncül olarak sunulmuştur.

Endüstriyel ortamlarda kullanılan kimyasallar, metal ve seramiklerde korozyon, oksidasyon ve yüzey reaksiyonları yoluyla malzeme bütünlüğünü zayıflatmaktadır. Bu süreçler servis ömrünü kısaltmanın yanı sıra stres korozyon çatlaması üzerinden ani kırılma, sızıntı ve basınçlı sistemlerde ciddi kaza riskleri doğurabilmektedir. Kimyasal ortamlara maruz kalan

malzemelerde gelişen hasarın önemli iş sağlığı ve güvenliği sonuçları olduğu gösterilmiştir (Chen ve diğerleri, 2022; Ehrnştén, Andresen ve Que, Z, 2024).

#### **4.1. Korozyon Kaynaklı Hasar ve İş Sağlığı Riskleri**

Korozyon, metal malzemelerde kimyasal ve elektrokimyasal etkileşimler sonucu kesit kaybı ve dayanım azalmasına yol açan temel bir bozunma mekanizmasıdır. Endüstriyel tesislerde bu hasar çoğunlukla boru hatlarında cidar incelmesine bağlı sızıntılar, basınçlı kaplarda ani malzeme kaybı ve çatlak ilerlemesine bağlı arızalar şeklinde ortaya çıkmaktadır (Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013).

Lokal korozyon ve stres korozyon çatlaması erken tespiti güç hasar mekanizmaları olup çoğu zaman ön uyarı oluşturmadan ani arızalara neden olabilmektedir. Bu arızalar yanıcı veya toksik akışkan salımıyla birleştiğinde rafineri ve kimyasal tesislerde yangın, patlama ve akut maruziyet risklerini artırmaktadır (Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013).

#### **4.2. Hidrojen Gevrekleşmesi ve İş Sağlığı Riskleri**

Hidrojen gevrekleşmesi (HE), hidrojen atomlarının adsorpsiyon ve difüzyon yoluyla metal kafesine girmesi sonucu mekanik özelliklerin bozulmasıyla karakterize edilen kritik bir hasar mekanizmasıdır. Hidrojenin tane sınırları ve diğer mikroyapısal bölgelerde birikmesi süneklik ve kırılma tokluğunu azaltarak çatlak başlatma ve ilerleme eğilimini artırmakta; kırılmalar çoğu zaman belirgin plastik deformasyon olmaksızın gerçekleştiği için erken tespiti güçleşmektedir (Chen ve diğerleri, 2024). Özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde ani gevrek veya yarı-gevrek kırılmalar görülebilmektedir (Chen ve diğerleri, 2024).

Endüstriyel uygulamalarda hidrojen; imalat süreçleri, korozyon ve katodik koruma mekanizmaları veya hidrojen

içeren ortamlardan absorpsiyon yoluyla metale girebilmektedir. Bu hasar boru hatları ve depolama tanklarında öngörülemeyen arızalara yol açarak tasarım ve işletme güvenliği açısından ciddi riskler doğurmaktadır (Campari ve diğerleri, 2023). Riskin azaltılmasında uygun malzeme seçimi, hidrojen girişini sınırlayan tasarım ve düzenli izleme temel önlemlerdir (Li ve diğerleri, 2024).

Bununla birlikte, endüstriyel ortamlardaki diğer kimyasal maddeler de farklı bozunma süreçleri yoluyla iş sağlığı ve güvenliği risklerini artırabilmektedir.

#### **4.3. Kimyasal Ortamların Yol Açtığı Malzeme Bozunması**

Hidrojen gevrekleşmesine ek olarak, asidik, oksitleyici ve reaktif kimyasallar metal ve seramiklerde kimyasal ve elektrokimyasal yüzey reaksiyonları yoluyla ilerleyici bozunmaya neden olabilmektedir. Bu süreçler, çevresel etkileşimlere bağlı yüzeysel yapısal değişimlerle ilişkilidir ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak gözlenmektedir (Chen ve diğerleri, 2022).

Bu tür bozunmalar çoğunlukla kademeli ilerlediğinden erken tespiti güçtür; sızıntı, tehlikeli madde salımı ve ikincil kaza risklerini artırabilmektedir. Malzeme bozunması ile kaza riski arasındaki bu ilişki, kimyasal maruziyetlerin malzeme dayanımı ile tesis ve iş sağlığı güvenliği bağlamında bütüncül değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Vitale, Demichela ve Barresi, 2025).

### **5. ENDÜSTRİYEL PROSESLERDE MALZEME SEÇİMİ VE İŞ SAĞLIĞI GÜVENLİĞİ**

Endüstriyel proseslerde malzeme seçimine bağlı bozunma mekanizmaları ile güvenlik odaklı tasarım

yaklaşımlarının iş sağlığı–güvenliği üzerindeki etkileri arasındaki ilişki Tablo 2’de kavramsal olarak özetlenmiştir (Literatüre dayalı; Chen ve diğerleri, 2022; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013; Francis ve Byrne, 2021; Kumar, Kumar, Singh, Singh ve Singh, 2017; San Marchi ve Somerday, 2012; Vitale, Demichela ve Barresi, 2025).

**Tablo 2. Agresif kimyasal ve çevresel koşullar altında gelişen malzeme bozunması ile güvenlik odaklı malzeme seçimi ve önleyici tasarım yaklaşımlarının azaltılmış iş sağlığı–güvenliği riskleriyle ilişkisini gösteren kavramsal şema.**

| Servis Koşulu                           | Hasar Mekanizması  | Malzeme / Tasarım Yaklaşımı            | Risk Azaltım Etkisi        |
|-----------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| Agresif kimyasal ortamlar               | Lokal korozyon     | PREN yüksek alaşımlar                  | Sızdırmazlık Kaybı ↓       |
| Klorürlü / H <sub>2</sub> içeren servis | SCC, HE            | Hidrojen uyumlu sünek malzeme          | Ani kırılma olasılığı ↓    |
| Partiküllü akışkan                      | Erozyon - korozyon | HVOF kaplama / dubleks paslanmaz çelik | Et kalınlığı kaybı ↓       |
| Yüksek sıcaklık - basınç                | Oksidasyon         | Ni – Cr esaslı alaşım                  | Ölçek dökülmesi ve arıza ↓ |

### **5.1. Kimyasal ve Proses Koşullarının Malzeme Seçimine Etkisi**

Endüstriyel proseslerde kimyasal ortamın bileşimi, malzemelerin kimyasal ve elektrokimyasal etkileşimlerle bozunmasında belirleyici bir faktördür. Korozyon, kontrolsüz ilerlediğinde ekipman arızasına ve tehlikeli madde salımı yoluyla ciddi iş sağlığı ve güvenliği risklerine neden olabilmektedir (Chen ve diğerleri, 2022; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk,, 2013).

Agresif ortamlarda akışkan özellikleri ile sıcaklık ve akış hızı gibi işletme parametreleri korozyonu hızlandırmakta; malzeme–ortam uyumsuzluğu arıza riskini artırmaktadır (Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk,, 2013).

Klorürlü ortamlarda paslanmaz çeliklerin lokal korozyon direnci, krom, molibden ve azot içeriğine bağlı PREN (Çukurcuk Korozyon Direnci Eşdeğer Sayısı) değeri ile ilişkilidir. PREN, paslanmaz çeliklerin çukurcuk korozyon direncini alaşım bileşimine dayalı olarak nicel biçimde ifade eden ampirik bir parametredir. PREN arttıkça çukurcuk ve yarık korozyon direnci yükselir. Bu nedenle 304L çelikler klorürlü ortamlarda sınırlı direnç gösterirken, 316L ve dubleks çelikler daha güvenli seçenekler sunmaktadır (Francis ve Byrne, 2021).

Yüksek sıcaklık ve oksitleyici atmosferlerin birlikte etkili olduğu koşullarda yalnızca korozyon direnci değil, oksidasyon davranışı ve oksit tabakasının kararlılığı da belirleyicidir. Ni–Cr esaslı ve Ni-temelli alaşımlar daha kararlı oksit tabakaları oluştururken, karbon çeliklerinde hızlı oksit büyümesine bağlı dökülme eğilimi artmaktadır (Zhang ve diğerleri., 2021; Nakhutsrishvili ve Tevzade, 2025; Zou ve diğerleri, 2025).

Erozyon–korozyon koşullarında partikül etkisi sinerjik malzeme kaybına yol açmakta; karbon–mangan çelikleri daha yüksek kayıp gösterirken dubleks ve süper dubleks çelikler daha düşük hasar hızları sunmaktadır (Neville, Hodgkiess ve Dallas, 1995; Stack ve Abdulrahman, 2010; Francis ve Byrne, 2021).

Aşındırıcı ortamlarda yüzey mühendisliği uygulamaları da önemlidir. HVOF (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt) yöntemiyle uygulanmış WC-10Co4Cr kaplamaların erozyon direncini artırarak et kalınlığı kaybını azalttığı ve sızıntı riskini sınırladığı gösterilmiştir (Kumar ve diğerleri, 2017).

Bu nedenle malzeme seçimi, hasar mekanizması ve iş sağlığı–güvenliği sonuçları birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

## **5.2. Güvenlik Odaklı Malzeme Seçim Kriterleri**

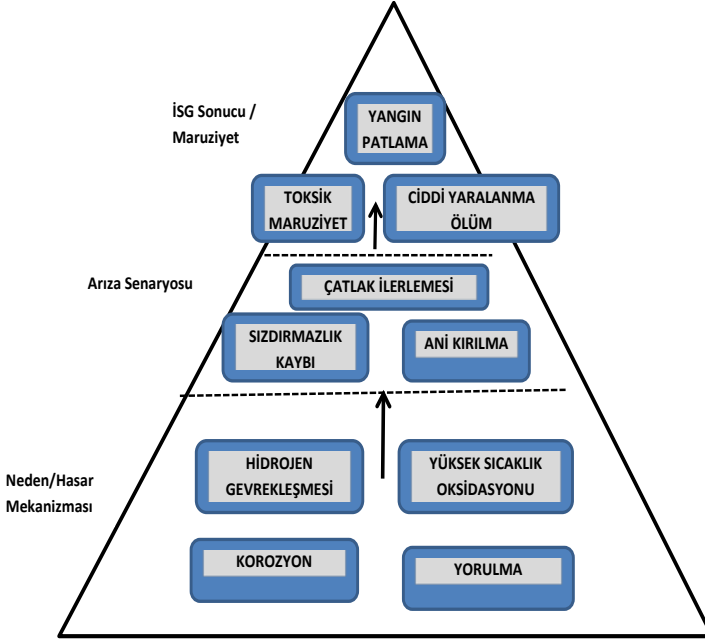
İş sağlığı ve güvenliği açısından malzeme seçimi, hidrojen gibi çevresel etkenlerin mekanik özellikleri olumsuz etkileyebildiği servis koşullarında yalnızca dayanım temelli kriterlere dayandırılmamalıdır. Hidrojenin süneklik ve kırılma tokluğunu azalttığı; özellikle yüksek dayanımlı çeliklerde düşük gerilmelerde dahi gevrek kırılma hassasiyetini artırabildiği gösterilmiştir (San Marchi ve Somerday, 2012; Abebe ve Altuncu, 2024).

Hidrojen gevrekleşmesine bağlı tokluk azalmasının bazı yüksek dayanımlı ve kriyojenik çeliklerde akma ve çekme dayanımının altında ortaya çıkabilmesi, “en yüksek dayanım = en yüksek güvenlik” varsayımının her koşulda geçerli olmadığını göstermektedir. Bu nedenle güvenlik odaklı seçim, çevresel etkilere karşı daha öngörülebilir, sünek kırılma eğilimi yüksek ve çatlak ilerlemesine toleranslı malzemelere yönelmelidir (Abebe ve Altuncu, 2024; Park ve diğerleri, 2025).

## **5.3. Önleyici Tasarım Yaklaşımları Bağlamında Malzeme Seçimi**

Endüstriyel ekipman güvenliği, yalnızca işletme önlemlerine değil, malzeme seçiminin tasarım aşamasında güvenlik performansını belirleyen bir unsur olarak ele alınmasına bağlıdır. Agresif kimyasal ortamlar ile yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında hasar toleransı yüksek ve öngörülebilir davranış sergileyen malzemelerin tercih edilmesi ani arıza riskini azaltmaktadır (San Marchi ve Somerday, 2012).

Bu kapsamda, termal, mekanik ve kimyasal tehlikelerin malzeme davranışı üzerindeki etkileri ile bunların arıza senaryoları ve iş sağlığı–güvenliği sonuçları arasındaki nedensel ilişki Şekil 1’de kavramsal olarak özetlenmiştir.



**Şekil 1. Endüstriyel proseslerde malzeme bozunma mekanizmaları, arıza senaryoları ve iş sağlığı–güvenliği sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren kavramsal model.**  
(Literatüre dayalı; Wood, Vetere Arellano ve Van Wijk, 2013; Chen ve diğerleri, 2022; Vitale, Demichela ve Barresi, 2025).

Literatür, malzeme bozunmasının çoğu durumda birden fazla mekanizmanın eşzamanlı veya ardışık etkisiyle geliştiğini göstermektedir. Termal süreçlerde oksidasyon ve termal yorulma yüzeyden başlayan hasarlarla çatlak oluşumunu hızlandırırken; mekanik yüklemelerde yorulma ve aşırı yükleme ön uyarı vermeden ilerleyebilmektedir. Kimyasal tehlikeler ise korozyon ve hidrojen gevrekleşmesi yoluyla malzeme bütünlüğünü kademeli biçimde zayıflatarak ani arıza olasılığını artırmaktadır.

Bu çerçevede malzeme seçimi, hasar mekanizması–arıza senaryosu–maruziyet zincirinin tasarım aşamasında birlikte değerlendirilmesini gerektirmekte; çevresel etkilere karşı

öngörülebilir ve hasar toleransı yüksek malzemelerin tercih edilmesi etkili bir risk azaltma stratejisi oluşturmaktadır.

## **6. SONUÇLAR**

Bu derlemede, endüstriyel proseslerdeki termal, mekanik ve kimyasal tehlikelerin malzeme davranışı üzerindeki etkileri ve bunların iş sağlığı ve güvenliği (İSG) riskleriyle ilişkisi bütüncül olarak değerlendirilmiştir. Literatür, oksidasyon, yorulma, korozyon ve hidrojen gevrekleşmesi gibi bozunma mekanizmalarının çoğu durumda eşzamanlı veya ardışık geliştiğini göstermektedir.

Termal etkiler yüzey kaynaklı hasarlarla çatlak oluşumunu hızlandırırken; mekanik yüklemeler ön uyarı vermeden ani kırılmalara yol açabilmektedir. Kimyasal etkileşimler ise malzeme bütünlüğünü kademeli biçimde zayıflatarak arıza olasılığını artırmaktadır.

Bu bulgular, güvenliğin yalnızca operasyonel önlemlerle değil, tasarım aşamasında bozunma mekanizmaları ve hasar toleransı dikkate alınarak yapılan malzeme seçimiyle güçlendirilebileceğini göstermektedir. Yüksek dayanım tek başına güvenliği garanti etmemekte; çevresel etkilere karşı öngörülebilir ve sünek davranış sergileyen malzemeler güvenlik-kritik uygulamalarda daha uygun bir yaklaşım sunmaktadır. Bu nedenle malzeme seçimi, İSG yönetiminin temel teknik bileşenidir.

## KAYNAKÇA

- Abebe, B. A. ve Altuncu, E. (2024). A review on hydrogen embrittlement behavior of steel structures and measurement methods. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 8(2), 91–101. doi:10.35860/iarej.1414085
- An, G., Park, J., Ohata, M. ve Minami, F. (2019). Fracture assessment of weld joints of high-strength steel in pre-strained condition. *Applied Sciences*, 9(7), 1306. doi:10.3390/app9071306
- Ayomoh, M., ve Ongwae, B. A. (2025). A systematic review of asset integrity and process safety management sustainability for onshore petrochemical installations. *Sustainability*, 17, 286. doi:10.3390/su17010286
- Barbey, C., Bonvallot, N. ve Clerc, F. (2024). Health outcomes related to multiple exposures in occupational settings: A review. *Safety and Health at Work*, 15(4), 382–395. doi:10.1016/j.shaw.2024.10.004
- Basak, A. K., Bajwa, D. S. ve Pramanik, A. (2025). Fatigue behaviour of mechanical joints: A review. *Metals*, 15, 25. doi:10.3390/met15010025
- Ben Salem, M. H., Soucy, G., Marceau, D., Godefroy, A. ve Charest, S. (2025). Review of the properties and degradation mechanisms of refractories in aluminum reduction cells. *Metals*, 15, 278. doi:10.3390/met15030278
- Bertan, B. ve Selim, H. (2025). Monitoring and identifying occupational health and safety risks in various foundry processes using the ELMERI method. *Processes*, 13(4), 1132. doi:10.3390/pr13041132

- Brochen, E., Clasen, S., Dahlem, E. ve Dannert, C. (2016). Determination of the thermal shock resistance of refractories. *Refractories Worldforum*, 8(1), 79–85.
- Cao, G., Gao, X., Pan, S., Shan, W., Wang, H. ve Liu, Z. (2021). In-situ observation of cracking and healing behavior of high-carbon steel during oxide scale growth. *ISIJ International*, 61(8), 2284–2291. doi:10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-658
- Campari, A., Ustolin, F., Alvaro, A. ve Paltrinieri, N. (2023). A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 35316–35346. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.05.293
- Cha, E.-W., Jeon, D., Kang, D., Kim, Y.-K. ve Kim, S.-Y. (2022). Chemical pneumonitis caused by the inhalation of zinc oxide fumes in an arc welder. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7954. doi:10.3390/ijerph19137954
- Chen, J., Qiao, Y., Meng, F. ve Wang, Y. (2022). Corrosion and degradation of materials. *Coatings*, 12, 969. doi:10.3390/coatings12070969
- Chen, Y.-S., Huang, C., Liu, P.-Y., Yen, H.-W., Niu, R., Burr, P., Moore, K. L., Martínez-Paneda, E., Atrens, A. ve Cairney, J. M. (2024). Hydrogen trapping and embrittlement in metals: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 136, 789–821. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.04.076
- Ciocan, A. (2015). Emissions of hydrochloric acid vapors generated by pickling process from cold rolling mill of steel strips. *The Annals of “Dunarea de Jos” University*

*of Galati, Fascicle IX: Metallurgy and Materials Science*, (4), 43–46.

- Distl, B., Hauschildt, K., Pyczak, F. ve Stein, F. (2021). Solid–solid phase transformations and their kinetics in Ti–Al–Nb alloys. *Metals*, 11(12), 1991. doi:10.3390/met11121991
- Dueck, M. E., Rafiee, A., Mino, J., Nair, S. G., Kamravaei, S., Pei, L. ve Quémerais, B. (2021). Welding fume exposure and health risk assessment in a cohort of apprentice welders. *Annals of Work Exposures and Health*, 65(7), 775–788. doi:10.1093/annweh/wxab016
- Ehrnstén, U., Andresen, P. L. ve Que, Z. (2024). A review of stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in PWR primary water. *Journal of Nuclear Materials*, 588, 154815. doi:10.1016/j.jnucmat.2023.154815
- Francis, R. ve Byrne, G. (2021). Duplex stainless steels—Alloys for the 21st century. *Metals*, 11(5), 836. doi:10.3390/met11050836
- Gu, Y., Chen, Y., Shen, S. ve Fang, D. (2025). High-temperature experiments and simulation methods for oxidation behavior research of thermostructural materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 198, 109150. doi:10.1016/j.compositesa.2025.109150
- Han, Z., Liu, J., Li, J., Kang, H. ve Xie, G. (2024). Integrated application of dynamic risk-based inspection and integrity operating windows in petrochemical plants. *Processes*, 12, 1509. doi:10.3390/pr12071509
- Hectors, K., Vanspeybroeck, D., Plets, J., Bouckaert, Q. ve De Waele, W. (2023). Open-access experiment dataset for

- fatigue damage accumulation and life prediction models. *Metals*, 13(3), 621. doi:10.3390/met13030621
- International Labour Organization. (2019). *Safety and health at the heart of the future of work: Building on 100 years of experience*. Geneva: International Labour Office. Retrieved from <https://www.ilo.org/>
- Islam, M., Sohaib, M., Kim, J. ve Kim, J.-M. (2018). Crack classification of a pressure vessel using feature selection and deep learning methods. *Sensors*, 18(12), 4379. doi:10.3390/s18124379
- Jose, S. A., Lapierre, Z., Williams, T., Hope, C., Jardin, T., Rodriguez, R. ve Menezes, P. L. (2025). Wear- and corrosion-resistant coatings for extreme environments: Advances, challenges, and future perspectives. *Coatings*, 15, 878. doi:10.3390/coatings15080878
- Kahn, A. M. ve McCrady-Kahn, V. L. (1981). Molten metal burns. *Western Journal of Medicine*, 135(1), 78–80.
- Knott, P., Csorba, G., Bennett, D. ve Kift, R. (2023). Welding fume: A comparison study of industry used control methods. *Safety*, 9(3), 42. doi:10.3390/safety9030042
- Kumar, K., Kumar, S., Singh, G., Singh, J. P. ve Singh, J. (2017). Erosion wear investigation of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coating on slurry pipeline materials. *Coatings*, 7(4), 54. doi:10.3390/coatings7040054
- Li, Q., Ghadiani, H., Jalilvand, V., Alam, T., Farhat, Z. ve Islam, M. A. (2024). Hydrogen impact: A review on diffusibility, embrittlement mechanisms, and characterization. *Materials*, 17(4), 965. doi:10.3390/ma17040965

- Li, W., Ma, Z., Yang, Z. ve Wang, S. (2025). Effect of high-temperature oxidation on mechanical properties of TC11 titanium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 3634–3646. doi:10.1016/j.jmrt.2025.04.071
- Li, Y., Lv, H., Yuan, Q., Tan, J., Feng, Z., Chen, Z. ve Xu, J. (2025). High-temperature alloys: Recent advances from conventional alloys to complex concentrated systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 3298–3318. doi:10.1016/j.jmrt.2025.04.027
- Li, Z., Wang, X., Chen, T., Feng, F., Liu, P. ve Lu, Y. (2020). Experimental and numerical evaluation on deformation and fracture mechanism of cast duplex stainless steel tubular specimen. *Materials*, 13(15), 3430. doi:10.3390/ma13153430
- Liu, Q., Zhang, Z., Lacidogna, G., Xu, Y. ve Xu, J. (2024). Fatigue crack growth monitoring and investigation on G20Mn5QT cast steel and welds via acoustic emission. *Applied Sciences*, 14(20), 9612. doi:10.3390/app14209612
- Liu, Y., Wang, X., Zhang, Z., Li, J. ve Sun, B. (2024). Hot-dip galvanizing process and the influence of metallic elements on composite coatings. *Journal of Composites Science*, 8, 160, 1-23. doi:10.3390/jcs8050160
- Lu, T. J. ve Fleck, N. A. (1998). The thermal shock resistance of solids. *Acta Materialia*, 46(13), 4755–4768. doi:10.1016/S1359-6454(98)00127-X
- Mo, Z., Lu, S. ve Shao, M. (2021). Volatile organic compound (VOC) emissions and health risk assessment in paint and coatings industry in the Yangtze River Delta, China.

*Environmental Pollution*, 269, 115740.  
doi:10.1016/j.envpol.2020.115740

- Nakhutsrishvili, I. ve Tevzadze, R. (2025). Oxidation kinetics of FeCr and FeCrAl alloys: Influence of secondary processes (Continuation). *Alloys*, 4(1), 2. doi:10.3390/alloys4010002
- Ndukwe, A. I., Deekae, M. B., Ejike, W. M., Okon, K., Ozoh, C. C., Chiemela, U. D. ve Achonwa, G. (2025). Metal corrosion in high temperature conditions: A review. *Zastita Materijala*, 66(2), 292–312. doi:10.62638/ZasMat1203
- Neville, A., Hodgkiess, T. ve Dallas, J. T. (1995). A study of the erosion–corrosion behaviour of engineering steels for marine pumping applications. *Wear*, 186–187, 497–507. doi:10.1016/0043-1648(95)07145-8
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (1994). *Process safety management: Guidelines for compliance* (OSHA 3133). U.S. Department of Labor.
- Panda, P. K., Kannan, T. S., Dubois, J., Olagnon, C. ve Fantozzi, G. (2002). Thermal shock and thermal fatigue study of ceramic materials on a newly developed ascending thermal shock test equipment. *Science and Technology of Advanced Materials*, 3(4), 327–334. doi:10.1016/S1468-6996(02)00029-3
- Pantazopoulos, G. A. (2019). A short review on fracture mechanisms of mechanical components operated under industrial process conditions: Fractographic analysis and selected prevention strategies. *Metals*, 9(2), 148. doi:10.3390/met9020148
- Park, J., An, G., Park, J., Seong, D. ve Jo, W. (2025). The effect of hydrogen embrittlement on fracture toughness of

- cryogenic steels. *Metals*, 15, 1139. doi:10.3390/met15101139
- Pineda Huitron, R. M., Ramírez López, P. E., Vuorinen, E., Nazen Jalali, P., Pelcastre, L. ve Kärkkäinen, M. (2020). Scale formation on HSLA steel during continuous casting part I: The effect of temperature–time on oxidation kinetics. *Metals*, 10(9), 1243. doi:10.3390/met10091243
- Riccelli, M. G., Goldoni, M., Poli, D., Mozzoni, P., Cavallo, D. ve Corradi, M. (2020). Welding fumes, a risk factor for lung diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2552. doi:10.3390/ijerph17072552
- Samal, S. (2016). High-temperature oxidation of metals. In Z. Ahmad (Ed.), *High temperature corrosion* (pp. 101–121). Rijeka, Croatia: InTech. doi:10.5772/63000
- San Marchi, C., ve Somerday, B. P. (2012). *Technical reference for hydrogen compatibility of materials* (SAND2012-7321). Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Seo, S.-J., Shin, S.-M., Yoon, W. ve Byeon, S.-H. (2024). A health risk assessment of workers exposed to organic paint solvents used in the Korean shipbuilding industry. *Toxics*, 12(12), 903. doi:10.3390/toxics12120903
- Song, C., Li, Y., Wu, F., Luo, J., Li, L. ve Li, G. (2023). Failure analysis of the crack and leakage of a crude oil pipeline under CO<sub>2</sub>-steam flooding. *Processes*, 11(5), 1567. doi:10.3390/pr11051567
- Sourmail, T. (2001). Precipitation in creep resistant austenitic stainless steels. *Materials Science and Technology*, 17(1), 1–14. doi:10.1179/026708301101508972

- Stack, M. M. ve Abdulrahman, G. H. (2010). Mapping erosion–corrosion of carbon steel in oil exploration conditions: Some new approaches to characterising mechanisms and synergies. *Tribology International*, 43, 1268–1277. doi:10.1016/j.triboint.2010.01.005
- Şentürk, A. (2016). *Döküm sektöründe iş sağlığı ve güvenliğinin değerlendirilmesi* (İş sağlığı ve güvenliği uzmanlık tezi). Ankara: T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü.
- Uddeholms AB. (2018). *Heat treatment of Uddeholm tool steels* (Edition 10). Uddeholms AB.
- Ulker, O. C., Ulker, O. ve Hiziroglu, S. (2021). Volatile organic compounds (VOCs) emitted from coated furniture units. *Coatings*, 11, 806. doi:10.3390/coatings11070806
- Vitale, M., Demichela, M. ve Barresi, A. A. (2025). Material degradation and NaTech risk: A case study to discuss bidirectional vulnerability in industrial systems. *Applied Sciences*, 15(21), 11361. doi:10.3390/app152111361
- Wen, C., Li, Z., Wu, H. ve Gu, J. (2024). Study of phase transformations and interface evolution in carbon steel under temperatures and loads using molecular dynamics simulation. *Metals*, 14(7), 752. doi:10.3390/met14070752
- Wood, M. H., Vetere Arellano, A. L. ve Van Wijk, L. (2013). *Corrosion-related accidents in petroleum refineries: Lessons learned from accidents in EU and OECD countries* (EUR 26331 EN). Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2788/37909
- Yıldız, U. T., Varol, T., Pürçek, G. ve Akçay, S. B. (2024). A review on the surface treatments used to create wear and

corrosion resistant steel surfaces. *Politeknik Dergisi*, 27(1), 227–236. doi:10.2339/politeknik.1001951

Zhang, Q., Mei, B., Yang, H., Hu, X., An, W., Yue, Y., Xu, Y. ve Wang, Z. (2025). Stress measurement and analysis of structural parameters of flat arm tower crane under different working conditions. *Buildings*, 15(7), 1137. doi:10.3390/buildings15071137

Zhang, S., Dong, D., Wang, Q., Dong, C. ve Yang, R. (2021). High-temperature oxidation resistance of alumina-forming austenitic stainless steels optimized by refractory metal alloying. *Metals*, 11(2), 213. doi:10.3390/met11020213

Zou, R., Xiao, X., Deng, Y. ve Shi, Y. (2025). Investigating the high-temperature oxidation mechanisms of carbon steel Q275. *Frontiers in Materials*, 12, 1662645. doi:10.3389/fmats.2025.1662645

# **ÇELİK YAPILARDA KOROZYON–MEKANİK ETKİLEŞİM: HASAR MEKANİZMALARI, YÜZEY MODİFİKASYON VE KORUMA STRATEJİLERİ İLE KALAN ÖMÜR TAHMİNİ**

**Özlem AYDIN<sup>1</sup>**

## **1. GİRİŞ**

Çelik yapılar; enerji, denizcilik, havacılık, otomotiv petrokimya ve ağır sanayi uygulamalarında temel taşıyıcı sistemler olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte sürtünme, aşınma ve korozyon kaynaklı hasarlar, endüstriyel ekipman arızalarının %80'inden fazlasından sorumludur (Wang ve diğerleri, 2025).

Özellikle agresif ortamlarda çalışan çelik bileşenlerde mekanik yükleme ile elektrokimyasal bozunmanın eş zamanlı gerçekleşmesi, malzeme performansını hızla düşürmektedir. Deniz ortamlarında yüksek tuzluluk, nem ve mikrobiyal aktivite korozyon hızını artırmakta ve yapısal güvenilirliği ciddi biçimde azaltmaktadır (Wang ve diğerleri, 2025).

Korozyon yalnızca yüzeysel bir malzeme kaybı değil, aynı zamanda mekanik özelliklerde doğrudan bozulmaya neden olan bir süreçtir. Uzun süreli atmosferik korozyona maruz kalmış Q235 çeliğinde yapılan deneysel çalışmada, yaklaşık %12 seviyesinde korozyon oranında nihai çekme dayanımının %15.08, akma dayanımının %10.45 ve kırılma birim uzamasının %36.21 oranında azaldığı gösterilmiştir (Wan, Ma ve Wang,

---

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, Gedik Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İstanbul Türkiye, ORCID: 0000-0002-9889-4035.

2026). Bu sonuç, korozyonun yalnızca kesit azalmasına değil, aynı zamanda süneklik kaybına da yol açtığını ortaya koymaktadır. Daha da önemlisi, korozyon kaynaklı kalınlık kaybı ile taşıma kapasitesi arasındaki ilişkinin doğrusal karakter gösterdiği belirtilmiştir (Wan, Ma ve Wang, 2026). Bu durum, yapısal bütünlük değerlendirmesinde yalnızca geometrik kaybın değil, malzeme mekanik parametrelerindeki değişimin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Geleneksel yüzey koruma yöntemleri (örneğin elektro kaplama ve sıcak daldırma galvanizleme) birleşik mekanik–kimyasal etkilere karşı sınırlı koruma sağlamaktadır (Wang ve diğerleri, 2025). Bu nedenle son yıllarda PVD, CVD, lazer kaplama ve plazma püskürtme gibi ileri yüzey mühendisliği teknikleri ön plana çıkmıştır. Bu teknikler, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve gelişmiş kimyasal stabilite sağlayarak çeliğin tribolojik ve korozyon direncini önemli ölçüde artırmaktadır (Wang ve diğerleri, 2025).

Bununla birlikte literatürde aşınma direnci ve korozyon direnci çoğunlukla ayrı ayrı incelenmiş; tribokorozyon koşullarında oluşan sinerjik hasar mekanizmalarını bütüncül biçimde ele alan sistematik çalışmaların sınırlı olduğu vurgulanmıştır (Wang ve diğerleri, 2025).

Bu çalışmanın amacı, çelik yapılarda görülen elektrokimyasal korozyon, tribolojik aşınma, yüksek sıcaklık oksidasyonu ve akış kaynaklı hasar mekanizmaları arasındaki etkileşimi sistematik biçimde incelemek ve bu hasar türlerinin mikro yapı, mekanik özellikler ile yapısal güvenilirlik üzerindeki etkilerini bütüncül bir çerçevede değerlendirmektir. Ayrıca yüzey mühendisliği uygulamalarının hasar azaltmadaki rolü ve korozyon–mekanik etkileşim modelleri üzerinden kalan ömür tahmin yaklaşımları tartışılacaktır.

## 2. ÇELİK YAPILARDA KOROZYON VE HASAR MEKANİZMALARI

Çelik yapılarda meydana gelen korozyon, malzeme ile çevre arasındaki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda gelişen bir bozunma sürecidir. Bu süreç metalik yapı elemanlarının servis ömrünü azaltarak yapısal güvenilirliği olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle korozyon hasarının anlaşılması ve kontrol edilmesi, yapıların güvenli işletimi ve servis ömrünün korunması açısından büyük önem taşımaktadır (Křivý, 2022).

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan çelik bileşenler atmosferik ortam, deniz ortamı, yüksek sıcaklık ve akışkan ortamları gibi farklı korozyon koşullarına maruz kalabilmektedir. Bu ortamlarda atmosferik korozyon, akış hızlandırılmış korozyon, yüksek sıcaklık oksidasyonu ve lokal korozyon gibi farklı mekanizmalar gelişebilmektedir. Çelik yapılarda görülen başlıca korozyon türleri ve yapısal etkileri Tablo 1’de özetlenmiştir (Křivý, 2022; Manu ve diğerleri, 2025; Wu, Luo ve Zhou, 2023; Frankel, 1998).

**Tablo 1. Çelik yapılarda görülen başlıca korozyon türleri ve yapısal etkileri**

| Korozyon Türü                | Oluşum Mekanizması                                             | Yapısal Etki                        | Tipik Ortam                      |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Atmosferik Korozyon          | Nem, oksijen ve kirleticilerle elektrokimyasal reaksiyon       | Kesit kaybı, yüzey paslanması       | Endüstriyel ve kıyı atmosferi    |
| Akış Hızlandırılmış Korozyon | Akışkanın koruyucu oksit tabakasını uzaklaştırması             | Boru duvarı incilmesi               | Enerji santralleri, boru hatları |
| Lokal Korozyon               | Mikro yapısal heterojenlikler, inklüzyonlar veya klorür etkisi | Çukurcuk oluşumu, ani kırılma riski | Deniz ortamı                     |
| Yüksek sıcaklık Oksidasyonu  | Yüksek sıcaklıkta oksit tabakası oluşumu                       | Mekanik özelliklerde bozulma        | Enerji ve endüstriyel tesisler   |

## **2.1. Atmosferik Korozyon**

Atmosferik korozyon, çelik yapıların en yaygın karşılaştığı bozunma mekanizmalarından biridir. Atmosferde bulunan nem, oksijen ve kirlleticiler metal yüzeyinde elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine neden olur. Bu reaksiyonlar sonucunda çelik yüzeyinde pas tabakası oluşur ve zamanla malzeme kaybı meydana gelir. Atmosferik ortamlarda gerçekleşen bu korozyon süreci, çeliğin kesit alanında azalmaya ve taşıma kapasitesinde düşüşe neden olarak yapısal güvenilirliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Wu, Luo ve Zhou, 2023).

Atmosferik korozyon sürecinde çevresel parametreler önemli rol oynamaktadır. Özellikle bağıl nem, sıcaklık, sülfür dioksit ( $SO_2$ ) ve klorür iyonları korozyon hızını önemli ölçüde artırabilmektedir. Endüstriyel ve kıyı bölgelerinde gözlenen yüksek korozyon hızlarının temel nedeni bu kirleticilerin atmosferde yüksek konsantrasyonlarda bulunmasıdır (Wu, Luo ve Zhou, 2023; Yan ve diğerleri, 2020). Ayrıca atmosferik korozyon sürecinde gaz, sıvı ve katı fazların ara yüzeylerinde gerçekleşen kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar korozyon mekanizmasının gelişiminde belirleyici rol oynamaktadır (Wu, Luo ve Zhou, 2023).

Uzun süreli atmosferik maruziyet çalışmalarında çelik yüzeyinde oluşan pas tabakasının zamanla yapısal olarak değiştiği görülmektedir. İlk aşamada gevşek ve gözenekli yapıdaki korozyon ürünleri oluşurken, ilerleyen yıllarda daha kompakt ve koruyucu özellikte oksit tabakaları gelişebilmektedir. Bununla birlikte agresif ortamlarda oluşan korozyon ürünleri genellikle yeterli koruyucu özellik göstermediğinden korozyon süreci devam etmektedir (Wu, Luo ve Zhou, 2023).

## **2.2. Akış Hızlandırılmış Korozyon**

Akış hızlandırılmış korozyon (Flow-Accelerated Corrosion – FAC), özellikle boru hatları, ısı değiştiriciler ve enerji üretim tesislerinde görülen önemli bir malzeme bozunma mekanizmasıdır. Bu korozyon türü, akışkan hareketinin metal yüzeyindeki koruyucu oksit tabakasını aşındırması sonucu ortaya çıkmaktadır (Al-Abed Allah ve diğerleri, 2026).

Akışkanın yüksek hızlarda hareket etmesi, yüzeyde oluşan koruyucu oksit tabakasının çözünmesine ve metal iyonlarının akışkan içerisine taşınmasına neden olur. Bu durum özellikle boru dirsekleri, daralma bölgeleri ve türbülansın yüksek olduğu akış alanlarında duvar incelmeye yol açabilmektedir (Al-Abed Allah ve diğerleri, 2026).

FAC mekanizması; akış koşulları, sıcaklık, çözünmüş oksijen miktarı ve malzemenin alaşım bileşimi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Özellikle karbon çeliklerinde krom gibi alaşım elementlerinin bulunması, yüzeyde daha kararlı oksit tabakalarının oluşmasını sağlayarak bu tür korozyona karşı direnci artırabilmektedir (Al-Abed Allah ve diğerleri, 2026).

## **2.3. Lokal Korozyon ve Yapısal Hasar**

Çelik yapılarda görülen bir diğer önemli korozyon türü lokal korozyondur. Bu korozyon türü genellikle malzeme içindeki mikro yapısal heterojenlikler, inklüzyonlar veya yüzey kusurları nedeniyle belirli bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Lokal korozyonun en yaygın türleri çukurcuk korozyonu ve yarık korozyonudur (Křivý, 2022).

Lokal korozyon, genel korozyona göre çok daha tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Çünkü bu tür korozyonlarda hasar belirli bölgelerde yoğunlaşarak kısa sürede ciddi kesit kayıplarına yol açabilmektedir. Bu durum özellikle boru hatları

ve taşıyıcı çelik elemanlarda ani kırılmalara neden olabilmektedir (Křivý, 2022; Manu ve diğerleri, 2025; Ebara, 2010; Frankel, 1998).

Boru hatlarında meydana gelen lokal korozyon hasarları, duvar incilmesi ve basınç dayanımının azalması ile sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle endüstriyel sistemlerde korozyon hasarının erken tespiti ve düzenli izleme çalışmaları büyük önem taşımaktadır. Ayrıca lokal korozyon mekanizmalarının anlaşılması ve bu hasarların yapısal bütünlük üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi, çelik yapıların güvenli hizmet ömrünün belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. (Křivý, 2022; Manu ve diğerleri, 2025).

#### **2.4. Yüzey Modifikasyon Ve Koruma Stratejileri**

Çelik yapıların servis ömrünü artırmak ve korozyon kaynaklı hasarları azaltmak amacıyla çeşitli yüzey modifikasyon ve koruma yöntemleri geliştirilmektedir. Bu yöntemler genel olarak kaplama sistemleri, yüzey alaşımlama teknikleri ve elektrokimyasal koruma yöntemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Uygun yüzey koruma stratejilerinin uygulanması, çelik yüzey ile çevre arasındaki elektrokimyasal etkileşimleri sınırlandırarak korozyon hızını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Manu ve diğerleri, 2025).

Korozyon koruma yaklaşımlarının temel amacı, metal yüzey ile agresif ortam arasındaki doğrudan teması engellemek veya elektrokimyasal reaksiyonları kontrol altına almaktır. Bu kapsamda organik kaplamalar, metalik kaplamalar ve seramik esaslı kaplamalar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle epoksi, poliüretan ve çinko esaslı kaplama sistemleri, çelik yapıların atmosferik ve endüstriyel ortamlarda maruz kaldığı korozyon etkilerini önemli ölçüde azaltabilmektedir (Manu ve diğerleri, 2025).

Son yıllarda geliştirilen ileri yüzey modifikasyon teknikleri, geleneksel kaplama yöntemlerine göre daha yüksek korozyon direnci ve daha iyi yüzey performansı sağlayabilmektedir. Özellikle termal sprey uygulamaları zorlu ortamlarda güçlü bir koruyucu tabaka oluştururken, lazer yüzey işlemleri yüzey mikro yapısını daha homojen ve yoğun hâle getirerek korozyon direncini artırabilmektedir. Ayrıca fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri ile elde edilen ince film kaplamalar yüksek sertlik, iyi aderans ve gelişmiş kimyasal kararlılık sağlayabilmektedir. Bu nedenle söz konusu teknikler, yüksek performans gerektiren endüstriyel uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır (Manu ve diğerleri, 2025; Wang ve diğerleri, 2025; Sun, 2023).

Bununla birlikte, yalnızca kaplama uygulamaları her zaman yeterli koruma sağlamayabilmektedir. Bu nedenle korozyon kontrolünde kaplama sistemleri, inhibitörler, bakım uygulamaları ve gerektiğinde katodik koruma gibi ek yöntemlerle birlikte değerlendirilmektedir. Özellikle daha aktif bir malzemenin kullanılması ya da uygun koruma sistemlerinin birlikte tasarlanması, metal yüzeydeki korozyon reaksiyonlarının sınırlandırılmasına yardımcı olmaktadır. Uzun hizmet ömrü beklenen sistemlerde, metalik ve organik koruma katmanlarının birlikte kullanılması veya yüksek performanslı kaplamaların katodik koruma ile desteklenmesi daha etkili çözümler sunabilmektedir (Manu ve diğerleri, 2025; Křivý, 2022).

Sonuç olarak, yüzey modifikasyon ve koruma stratejilerinin doğru şekilde seçilmesi çelik yapıların korozyon direncini artırmakta ve yapısal bileşenlerin servis ömrünü uzatmaktadır. Bu nedenle korozyon hasarının yapısal bütünlük ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerinin anlaşılması, çelik yapıların güvenli işletimi açısından büyük önem taşımaktadır (Manu ve diğerleri, 2025; Křivý, 2022).

### **3. KOROZYONUN MEKANİK DAVRANIŞ VE YAPISAL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

Çelik yapılar yüksek dayanım, iyi süneklik ve uygun maliyet gibi özellikleri nedeniyle enerji, altyapı, boru hatları ve endüstriyel tesisler gibi birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte metalik malzemeler çevre ile temas hâlinde termodinamik olarak daha kararlı oksit bileşiklerine dönüşme eğilimindedir ve bu durum korozyon olarak adlandırılan bozunma sürecine yol açmaktadır. Korozyon yalnızca yüzeysel malzeme kaybı ile sınırlı olmayıp aynı zamanda metalik yapıların mekanik ve fonksiyonel özelliklerini de olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Feliu ve García-Galvan, 2025; Ma ve diğerleri, 2025).

Korozyon süreçleri çelik yapı elemanlarının mekanik davranışını farklı mekanizmalar üzerinden etkileyebilmektedir. En yaygın etkilerden biri kesit kaybıdır. Uzun süreli korozyon etkisi altında metal yüzeyinde oluşan korozyon ürünleri zamanla malzemenin kalınlığını azaltarak kesit alanının küçülmesine neden olmaktadır. Kesit alanındaki bu azalma, yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesinin düşmesine ve yapısal güvenilirliğin azalmasına yol açmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, özellikle uzun süre atmosferik ortamlara maruz kalan çelik yapı elemanlarında korozyon oranı arttıkça akma dayanımı ve nihai çekme dayanımının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir (Wan, Ma ve Wang, 2026).

Korozyonun mekanik davranış üzerindeki bir diğer önemli etkisi, malzeme yüzeyinde düzensizliklerin oluşması ve buna bağlı olarak gerilme dağılımının değişmesidir. Özellikle lokal korozyon türleri, metal yüzeyinde çukurcuk veya yarık şeklinde hasarlar oluşturarak belirli bölgelerde gerilme yoğunlaşmalarının meydana gelmesine neden olabilmektedir.

Bu tür lokal hasarlar, malzeme yüzeyinde mikro çatlak oluşumunu kolaylaştırarak yapı elemanlarının yorulma dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Ayrıca korozyon sonucu oluşan düzensiz yüzey morfolojisi ve lokal malzeme kayıpları, çelik yapı elemanlarının mekanik özelliklerinde bozulmaya ve taşıma kapasitesinin azalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle boru hatları, çelik kolonlar ve basınçlı kaplar gibi kritik mühendislik bileşenlerinde korozyon hasarının izlenmesi ve değerlendirilmesi yapısal güvenilirliğin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır (Křivý, 2022; Wu, Luo ve Zhou, 2023; Wan, Ma ve Wang, 2026).

Korozyonun mekanik davranış üzerindeki etkileri yalnızca kesit kaybı ve lokal gerilme yoğunlaşmaları ile sınırlı değildir. Uzun süreli korozyon süreçleri, malzemenin mikro yapısında değişimlere ve yüzey özelliklerinde bozulmalara yol açarak çelik yapı elemanlarının genel performansını da etkileyebilmektedir. Korozyon ürünlerinin oluşumu ve yüzeyde meydana gelen düzensiz tabaka yapısı, yük aktarım mekanizmasını değiştirerek malzemenin deformasyon davranışını etkileyebilmekte ve yapısal elemanların servis performansında azalmaya neden olabilmektedir. Ayrıca korozyonun ilerlemesiyle birlikte malzeme yüzeyinde oluşan hasarların büyümesi, yük taşıyan elemanlarda stabilite kaybı ve dayanım azalması gibi problemlere yol açabilmektedir. Bu nedenle çelik yapı elemanlarında korozyon etkilerinin yalnızca malzeme kaybı açısından değil, aynı zamanda mekanik davranış ve yapısal performans üzerindeki etkileri bakımından da değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Al-Abed Allah ve diğerleri, 2026; Manu ve diğerleri, 2025; Wu, Luo ve Zhou, 2023).

### **3.1. Korozyonun Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi**

Korozyon süreçleri çelik yapı elemanlarının taşıma kapasitesini zamanla azaltabilmektedir. Korozyon sonucu meydana gelen malzeme kaybı, yapı elemanlarının kesit alanının küçülmesine neden olmakta ve buna bağlı olarak elemanların yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Özellikle deniz ortamlarında veya agresif çevresel koşullarda çalışan çelik yapılarda bu tür kesit kayıpları yapısal güvenilirliği doğrudan etkileyebilmektedir. Yapısal kapasitenin büyük ölçüde elemanın kesit boyutlarına bağlı olduğu ve korozyonun bu boyutları zamanla azaltarak yapısal dayanımı düşürdüğü literatürde açıkça belirtilmektedir (Melchers, 2005; Guedes Soares ve Garbatov, 1999).

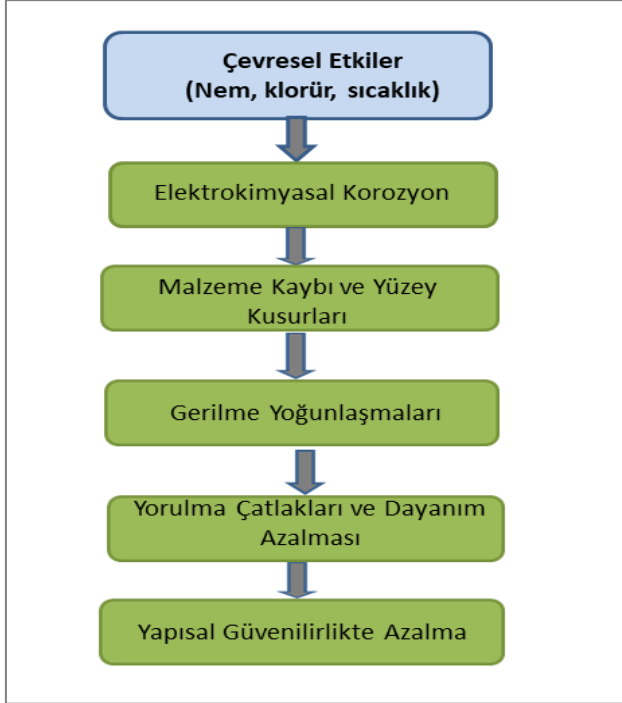
Buna ek olarak lokal korozyon türleri, özellikle çukurcuk korozyonu, yapısal elemanlarda yerel zayıflama bölgeleri oluşturarak taşıma kapasitesinde daha hızlı bir düşüşe yol açabilmektedir. Bu tür hasarlar boru hatları, deniz platformları ve basınçlı kaplar gibi kritik mühendislik yapılarında yapısal bütünlüğün kaybedilmesine neden olabilecek önemli riskler oluşturmaktadır. Bu nedenle çelik yapı elemanlarında meydana gelen korozyon hasarlarının düzenli olarak izlenmesi ve yapısal güvenilirlik değerlendirmelerinde dikkate alınması büyük önem taşımaktadır (Melchers, 2005; Manu ve diğerleri, 2025).

### **3.2. Korozyonun Yorulma Davranışı ve Kırılma Mekanizmaları Üzerindeki Etkisi**

Korozyon, çelik yapı elemanlarında yalnızca statik dayanımı değil aynı zamanda yorulma davranışını da önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Korozyon sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü, çukurcuklar ve mikro çatlaklar, malzeme yüzeyinde gerilme yoğunlaşmalarının oluşmasına neden olarak yorulma çatlaklarının başlama süresini kısaltabilmektedir. Bu durum özellikle tekrarlı yükler altında çalışan köprüler, boru

hatları ve deniz yapıları gibi mühendislik sistemlerinde yorulma ömrünün önemli ölçüde azalmasına yol açabilmektedir. (Pantazopoulos, 2019; Amirifard ve diğerleri, 2022; Larrosa ve diğerleri, 2017; Turnbull, 2014).

Çelik yapılarda korozyon ve mekanik etkilerin birlikte yol açtığı hasar süreci Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 1. Çelik Yapılarda Korozyon – Mekanik Etkileşim Süreci**  
(Pantazopoulos, 2019; Larrosa ve diğerleri, 2017; Liu ve diğerleri, 2023)

Korozyon–yorulma etkileşimi sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan lokal hasarlar, çatlak başlama bölgeleri olarak davranmakta ve çatlakların daha hızlı ilerlemesine neden olabilmektedir. Yapılan çalışmalar, korozyon ortamında çalışan çelik yapı elemanlarında yorulma dayanımının önemli ölçüde düştüğünü ve çatlak ilerleme hızlarının artabildiğini

göstermektedir. Özellikle korozyon sonucu oluşan çukurcukların, yorulma çatlaklarının başlama noktası olarak görev yaptığı ve bu durumun malzemenin kırılma davranışını önemli ölçüde değiştirebildiği literatürde belirtilmektedir (Pantazopoulos, 2019; Manu ve diğerleri, 2025; Amirifard ve diğerleri, 2022; Larrosa ve diğerleri, 2017; Liu ve diğerleri, 2023).

Ayrıca korozyon ve mekanik yüklerin eş zamanlı etkisi, kırılma mekanizmalarının karmaşık hâle gelmesine neden olabilmektedir. Bu tür durumlarda yorulma çatlaklarının oluşumu, çevresel etkiler ve elektrokimyasal reaksiyonlar tarafından hızlandırılabilen ve malzemenin servis ömrü beklenenden daha kısa olabilmektedir. Bu nedenle korozyon ortamlarında çalışan çelik yapı elemanlarının tasarımında yalnızca statik dayanımın değil, aynı zamanda korozyon–yorulma etkileşiminin de dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır (Pantazopoulos, 2019 ; Křivý, 2022).

### **3.3. Korozyon Hasarının İzlenmesi ve Kalan Ömür Tahmini**

Çelik yapı elemanlarında meydana gelen korozyon hasarının güvenli işletme açısından değerlendirilmesi yalnızca mevcut malzeme kaybının belirlenmesi ile sınırlı değildir. Korozyonun malzeme kaybına ve yapısal zayıflamalara yol açabildiği bilinmektedir. Bu nedenle korozyon hızının izlenmesi ve yapı elemanlarının kalan servis ömrünün tahmin edilmesi güvenli işletim açısından büyük önem taşımaktadır (Nugroho ve diğerleri, 2023).

Korozyon hasarının izlenmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri tahribatsız muayene teknikleridir. Ultrasonik kalınlık ölçümü, eddy akım testleri ve fiber optik sensör sistemleri gibi yöntemler sayesinde metal yüzeyinde meydana gelen kalınlık kayıpları ve lokal korozyon hasarları

erken aşamada tespit edilebilmektedir. Özellikle fiber optik sensörlerin kullanıldığı modern izleme sistemleri, çelik boru hatları ve deniz yapılarında gerçek zamanlı korozyon izleme imkânı sağlayarak bakım süreçlerinin daha etkin şekilde planlanmasına katkıda bulunmaktadır (Chen ve diğerleri, 2025).

Son yıllarda korozyon izleme çalışmalarında yapısal sağlık izleme (Structural Health Monitoring – SHM) yaklaşımları da önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Sensör tabanlı izleme sistemleri, veri analizi yöntemleri ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak yapı elemanlarının servis koşulları altında maruz kaldığı korozyon hasarının sürekli olarak takip edilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu tür veri temelli yaklaşımlar sayesinde korozyon hasarının gelişimi daha doğru şekilde analiz edilebilmekte ve bakım stratejileri daha etkin biçimde planlanabilmektedir (Hussein ve diğerleri, 2026; Worden ve Farrar, 2013).

Korozyon hasarının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer önemli yaklaşım ise korozyon hızına dayalı kalan ömür tahmin modelleridir. Bu modellerde belirli zaman aralıklarında yapılan kalınlık ölçümleri kullanılarak malzeme kaybı oranı belirlenmekte ve bu veriler yardımıyla yapı elemanlarının gelecekteki servis ömrü tahmin edilmektedir. Örneğin deniz ortamında çalışan çelik yapılarda yapılan çalışmalar, duvar kalınlığının düzenli olarak izlenmesinin korozyon ilerlemesinin kontrol edilmesi ve yapısal güvenilirliğin korunması açısından önemli bir araç olduğunu göstermektedir (Salgueiro ve diğerleri, 2024 ; Melchers ve Jeffrey, 2008).

#### **4. SONUÇLAR**

Bu çalışmada çelik yapılarda meydana gelen korozyon–mekanik etkileşimi; korozyon türleri, yüzey modifikasyon teknikleri ve kalan ömür tahmin yaklaşımları çerçevesinde

literatür temelli olarak değerlendirilmiştir. Yapılan incelemeler, korozyonun yalnızca yüzeysel bir malzeme kaybı oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda malzemenin mekanik özelliklerini ve yapısal güvenilirliğini önemli ölçüde etkileyen karmaşık bir bozunma süreci olduğunu göstermektedir.

Atmosferik korozyon, akış hızlandırılmış korozyon ve lokal korozyon gibi farklı mekanizmalar çelik yapı elemanlarında farklı hasar türlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Özellikle lokal korozyon türleri, belirli bölgelerde yoğunlaşan malzeme kaybı nedeniyle yapısal elemanlarda ani dayanım kayıplarına yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra uzun süreli korozyon etkileri, kesit kaybı ve yüzey düzensizlikleri aracılığıyla çelik yapı elemanlarının taşıma kapasitesini azaltmakta ve yorulma davranışını olumsuz yönde etkilemektedir.

Korozyon ve mekanik yüklerin birlikte etkidiği koşullarda hasar mekanizmaları daha karmaşık hâle gelmektedir. Korozyon sonucu oluşan çukurcuklar ve yüzey kusurları gerilme yoğunlaşmalarına neden olarak yorulma çatlaklarının daha erken başlamasına ve çatlak ilerleme hızlarının artmasına yol açabilmektedir. Bu durum özellikle köprüler, boru hatları, deniz yapıları ve basınçlı kaplar gibi tekrarlı yükler altında çalışan mühendislik sistemlerinde servis ömrünün önemli ölçüde azalmasına neden olabilmektedir.

Çelik yapıların korozyona karşı korunmasında yüzey mühendisliği uygulamaları önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel kaplama sistemlerinin yanı sıra fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), lazer yüzey işlemleri ve termal sprey kaplamaları gibi ileri yüzey modifikasyon teknikleri, çelik yüzeylerde daha yüksek korozyon ve aşınma direnci sağlayarak yapı elemanlarının servis ömrünü uzatabilmektedir. Bununla birlikte uzun hizmet ömrü gerektiren

sistemlerde kaplama sistemlerinin inhibitörler, bakım stratejileri ve katodik koruma gibi yöntemlerle birlikte uygulanması daha etkin koruma sağlamaktadır.

Son yıllarda korozyon hasarının izlenmesi ve kalan ömür tahmini konuları mühendislik uygulamalarında önemli bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Tahribatsız muayene teknikleri, sensör tabanlı yapısal sağlık izleme sistemleri ve veri temelli analiz yöntemleri sayesinde korozyon hasarının gelişimi daha doğru şekilde izlenebilmekte ve bakım stratejileri daha etkin biçimde planlanabilmektedir. Özellikle düzenli kalınlık ölçümlerine dayalı kalan ömür tahmin modelleri, çelik yapıların yapısal güvenilirliğinin değerlendirilmesinde önemli araçlar sunmaktadır.

Sonuç olarak çelik yapılarda korozyon–mekanik etkileşiminin anlaşılması, yapısal güvenilirliğin korunması ve servis ömrünün doğru şekilde tahmin edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmaların özellikle aşınma-korozyon etkileşimi süreçleri, çoklu hasar mekanizmalarının etkileşimi ve veri temelli kalan ömür tahmin modelleri üzerine yoğunlaşması, çelik yapıların daha güvenli ve sürdürülebilir şekilde işletilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- Al-Abed Allah, M., Arroussi, M., Siddiqui, O. K., Yusuf, M., Hunter, T. N., Shams, A. ve Toor, I. U. H. (2026). Flow-accelerated corrosion in nuclear power plants: A detailed review on mechanisms, mitigation, and management. *Engineering Failure Analysis*, 183, 110203. doi:10.1016/j.engfailanal.2025.110203
- Amirifard, M., Zarei Hanzaki, A., Abedi, H. R., Eftekhari, N. ve Wang, Q. (2022). Toward superior fatigue and corrosion fatigue crack initiation resistance of Sanicro 28 pipe super austenitic stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 1672–1685. doi:10.1016/j.jmrt.2022.01.109
- Chen, J., Zhang, R., Li, Q., Wang, H., Ma, Q., Fan, Q., Fan, L. ve Lin, Z. (2025). Non-uniform corrosion monitoring of steel pipes using distributed optical fiber sensors in the fluctuation zone of a coastal wharf. *Sensors*, 25(10), 3194. doi:10.3390/s25103194
- Ebara, R. (2010). Corrosion fatigue crack initiation behavior of stainless steels. *Procedia Engineering*, 2, 1297–1306. doi:10.1016/j.proeng.2010.03.141
- Feliu, S., Jr. ve García-Galvan, F. (2025). Corrosion and protection of metallic materials. *Metals*, 15(4), 346. doi:10.3390/met15040346
- Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals: A review of the critical factors. *Journal of The Electrochemical Society*, 145(6), 2186–2198. doi:10.1149/1.1838615
- Guedes Soares, C. ve Garbatov, Y. (1999). Reliability of maintained, corrosion protected plates subjected to non linear corrosion and compressive loads. *Marine*

*Structures*, 12(6), 425–445. doi:10.1016/S0951-8339(99)00028-3

- Hussein, A. M., Abdul Rahim, S. B., Mustapha, F. B. ve Krishnan, P. S. (2026). Current challenges and future outlooks of pipeline structural health monitoring: A review. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 32(1), 35–61. doi:10.5505/pajes.2025.82781
- Křivý, V. (2022). Corrosion in steel structures: A review. *Materials*, 15(15), 5244. doi:10.3390/ma15155244
- Larrosa, N. O., Akid, R. ve Ainsworth, R. A. (2017). Corrosion-fatigue: A review of damage tolerance models. *International Materials Reviews*. doi:10.1080/09506608.2017.1375644
- Liu, X., Zhang, Y., Wang, H. ve Li, Q. (2023). Fatigue life prediction of high strength steel with pitting corrosion. *Metals*, 13(11), 1839. doi:10.3390/met13111839
- Ma, R., Su, R., Cui, C., Liu, Y., Hu, H. ve Chen, A. (2025). Corrosion characteristics and mechanical properties degradation of stressed high-strength steel wires in acidic environment. *Case Studies in Construction Materials*. doi:10.1016/j.cscm.2025.e04773
- Manu, K. C., Madhushree, C., Chandini, M. S., Shree, N., Hemanth, S. ve Jeevan, T. P. (2025). Corrosion in steel structures: A review. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 73(1), 189–198. doi:10.18311/jmmf/2025/46985
- Melchers, R. E. (2005). The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures. *Corrosion Science*, 47(10), 2391–2410. doi:10.1016/j.corsci.2005.04.004
- Melchers, R. E. ve Jeffrey, R. J. (2008). Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure.

*Reliability Engineering & System Safety*, 93(3), 423–432.  
doi:10.1016/j.res.2006.12.006

- Nugroho, A. C. P. T., Sasmito, C., Fuadi, A. P., Hendrik, D., Rahadi, C. W. K., Permana, R. D. ve Fuadi, N. M. R. (2023). Corrosion rate analysis and prediction of the remaining life of the research vessel to improve ship safety aspects. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 22(2), 68–75. doi:10.20961/mechanika.v22i2.75062
- Pantazopoulos, G. A. (2019). A short review on fracture mechanisms of mechanical components operated under industrial process conditions: Fractographic analysis and selected prevention strategies. *Metals*, 9(2), 148. doi:10.3390/met9020148
- Salgueiro, F., Ribeiro, M., Carvalho, A., Covas, G., Baltzersen, Ø. ve Proença, C. S. (2024). Monitoring of wall thickness to predict corrosion in marine environments using ultrasonic transducers. *NDT*, 2, 255–269. doi:10.3390/ndt2030016
- Sun, Y. (2023). Surface engineering & coating technologies for corrosion and tribocorrosion resistance. *Materials*, 16(13), 4863. doi:10.3390/ma16134863
- Turnbull, A. (2014). Corrosion pitting and environmentally assisted small crack growth. *Proceedings of the Royal Society A*, 470(2169), 20140254. doi:10.1098/rspa.2014.0254
- Wan, Y., Ma, J. ve Wang, C. (2026). Research on the remaining life assessment method of corrosive steel pipe structures in substations based on thickness measurement and testing. *Journal of Measurements in Engineering*. doi:10.21595/jme.2026.25092

- Wang, X., Zhang, Y., Liu, H., Chen, L. ve Zhao, Q. (2025). A review on tribological wear and corrosion resistance of surface coatings on steel substrates. *Coatings*, 15(11), 1314. doi:10.3390/coatings15111314
- Worden, K. ve Farrar, C. R. (2013). *Structural health monitoring: A machine learning perspective*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Wu, H., Luo, Y. ve Zhou, G. (2023). The evolution of the corrosion mechanism of structural steel exposed to the urban industrial atmosphere for seven years. *Applied Sciences*, 13(7), 4500. doi:10.3390/app13074500
- Yan, L., Diao, Y. ve Gao, K. (2020). Analysis of environmental factors affecting the atmospheric corrosion rate of low-alloy steel using random forest-based models. *Materials*, 13(15), 3266. doi:10.3390/ma13153266

**MALZEME VE METALURJİ MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA  
BİLİMSEL ARAŞTIRMALAR**

**yaz**  
yayınları

YAZ Yayınları  
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3  
İscehisar / AFYONKARAHİSAR  
Tel : (0 531) 880 92 99  
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com