

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOROZYONA UĞRAMIŞ ÇELİK KUTU PROFİLLERİN  
FARKLI FRP MALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLEREK  
EĞİLME VE BASINÇ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kader DİKMEN**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**  
**Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Zeynep YAMAN**  
**Ortak Danışman : Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**Şubat 2022**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOROZYONA UĞRAMIŞ ÇELİK KUTU PROFİLLERİN  
FARKLI FRP MALZEMELERLE GÜÇLENDİRİLEREK  
EĞİLME VE BASINÇ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Kader DİKMEN**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**

**Bu tez 03/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.**

**Jüri Başkanı**

**Üye**

**Üye**

**Üye**

**Üye**

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Kader DİKMEN

27.12.2021

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve her konuda desteğini almaktan çekinmediğim değerli danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Zeynep YAMAN ve Doç. Dr. Mahyar MAALI'ye teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarından dolayı Doç. Dr. Elif AĞCAKOCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma konusundan deneysel planlamaya kadar çalışmanın her aşamasında yol gösterici ve destekleyici olan Fibrobeton Yönetim Kurulu Üyesi Sn. Muhammed MARAŞLI'ya ve Fibrobeton Düzce Fabrika Müdür'ü Sn. H. Bülent LAFCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tanıştığımızdan bu yana korozyon konusunda her gün yeni bilgiler öğrendiğim Fibrobeton Ar-Ge Merkezi Danışman hocamız Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışma süresince desteklerini esirgemeyen başta Volkan ÖZDAL ve Sefa GÜNTEPE olmak üzere Fibrobeton Ar-Ge Merkezi çalışanlarına tek tek teşekkürlerimi sunarım. Güçlendirme çalışmaları kapsamında göstermiş olduğu yol ve yardımlarından dolayı Kalıphaneler Grup Şefi Sn. Ufuk İŞGÜZAR'a teşekkürlerimi sunarım. Çelik profillerin tasarımı ve temini konusunda yardımlarını esirgemeyen GRC Üretim Şefi Sn. Volkan AKMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmasının deneysel tüm basamakları Fibrobeton Yapı A.Ş. Ar-Ge Merkezi altyapısı kullanılarak tamamlanmıştır. Bu kapsamda tüm Fibrobeton ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca manevi desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme ve sevgili arkadaşım Muhammet Yağız COŞKUN'a teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ .....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xviii

### BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	1
-------------	---

### BÖLÜM 2.

KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Literatür Taraması .....	5
2.2. Yapı Malzemesi Olarak Çelik .....	35
2.2.1. Çelik yapı tasarım standartları .....	40
2.2.2. Çelik birleşim elemanları .....	41
2.2.2.1. Bulonlu birleşimler .....	42
2.2.2.2. Perçinli birleşimler.....	42
2.2.2.3. Kaynaklı birleşimler .....	42
2.2.3. Eleman enkesit özellikleri.....	44
2.2.4. Çelik yapıların avantaj ve dezavantajları .....	47
2.2.5. Çelik yapıların kullanım alanları .....	48
2.3. Çelik Yapı ve Korozyon.....	49
2.4. Korozyon.....	51
2.4.1. Korozyonun önemi.....	52

2.4.2. Korozyon oluşumu.....	54
2.5. Korozyon Atak Formları.....	57
2.5.1. Üniform korozyon (genel korozyon).....	57
2.5.2. Aralık korozyonu.....	57
2.5.3. Galvanik korozyon.....	58
2.5.4. Çukurcuk Korozyonu.....	59
2.5.5. Tane sınırı korozyonu.....	61
2.5.6. Stres (gerilimli) korozyon.....	61
2.5.7. Kazımalı korozyon.....	62
2.5.8. Atmosferik Korozyon.....	62
2.5.9. Mikrobiyolojik Korozyon.....	63
2.5.10. Yüksek sıcaklık korozyonu.....	65
2.5.11. Erozyon korozyonu.....	66
2.6. Korozyon Hızı Belirleme Yöntemleri.....	67
2.6.1. Kütle kaybı yöntemi.....	68
2.6.2. Elektokimyasal yöntemler.....	68
2.7. Korozyon Tespit Yöntemleri.....	71
2.8. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler/Korunma Yöntemleri.....	75
2.8.1. Tasarım.....	75
2.8.2. Malzeme seçimi.....	75
2.8.3. Elektrokimyasal yöntemler.....	76
2.8.4. Koruyucu kaplama.....	76
2.8.4.1. Püskürtme yöntemi ile metalik kaplama.....	77
2.8.4.2. Elektrolit Yöntemi ile Metalik Kaplama.....	77
2.8.4.3. Sıcak daldırma yöntemi ile metalik kaplama.....	78
2.8.4.4. İnorganik kaplamalar.....	79
2.8.4.5. Organik (boya) kaplamalar.....	79

### BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM.....	81
3.1. Materyal.....	82
3.1.1. S 235 çelik kutu profil.....	86

3.1.2. Karbon tek yönlü kumaş (CFRP).....	87
3.1.3. Bazalt tek yönlü kumaş (BFRP) .....	89
3.1.4. Cam tek yönlü kumaş (GFRP).....	90
3.1.5. Polyester reçine .....	92
3.2. Yöntem.....	93
3.3. Testler.....	103
3.3.1. Eksenel basınç testi .....	103
3.3.2. Üç noktalı eğilme testi .....	105
BÖLÜM 4.	
ARAŞTIRMA BULGULARI .....	107
4.1. Deneysel Sonuçların Korozyon Derecelerine Göre Karşılaştırılması ..	107
4.1.1. Korozyon hasarına uğramayan, kütlece %10 ve %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin basınç dayanımları .....	107
4.1.2. Korozyon hasarına uğramayan, kütlece %10 ve %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin eğilme dayanımları.....	109
4.2. Deneysel Sonuçların Güçlendirme Türüne Göre ve Korozyon Derecelerine Göre Karşılaştırılması.....	110
4.2.1. Korozyon hasarına uğramayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı .....	111
4.2.2. Korozyon hasarına uğramayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı .....	113
4.2.3. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı...	116
4.2.4. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı ..	118
4.2.5. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı...	121
4.2.6. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı ..	124

BÖLÜM 5.

TARTIŞMA VE SONUÇ ..... 129

KAYNAKLAR..... 133

ÖZGEÇMİŞ ..... 144

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
AISC	: American Institute of Steel Conctruction
ASD	: Allowable Strength Desing
ASTM	: Amerkan Test ve Malzemeler Derneği
BFRP	: Bazalt Fiber Takviyeli Polimer
C	: Karbon
cm	: Santimetre
cm <sup>3</sup>	: Santimetreküp
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CO	: Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
ÇYTHYE	: Çelik Yapıların Tasarımı, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar
Dn	: Boru Nominal Çapı
dk	: Dakika
Ecor	: Korozyon Potensiyeli
F	: Faraday Sabiti
Fe(OH) <sub>2</sub>	: Demir Hidroksit
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
Fu	: Kopma Dayanımı
Fy	: Akma Dayanımı
G	: Kırılma Enerjisi
g	: Gram
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
GKT	: Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
GPa	: Gigapascal
GSMH	: Gayri Safı Milli Hasıla

H <sub>2</sub>	: Hidrojen Gazı
HCl	: Hidroklorik Asit
HM-CFRP	: Yüksek Modüllü Karbon Fiber Takviyeli Polimer
I	: Atalet Momenti
i	: Atalet Yarıçapı
icor	: Korozyon Akımı
J	: Joule
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_f$	: Akma Mukavemeti
$\sigma_k$	: Kopma Mukavemeti
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
L	: Mesnet Açıklığı
Lc	: Korozyon Uzunluğu
LRFD	: Load Resistance Factor Desing
M	: Metalin mol kütlesi
m	: Metre
m <sup>2</sup>	: Metrekare
m <sup>3</sup>	: Metreküp
mm	: Milimetre
mm <sup>2</sup>	: Milimetrekare
mA	: Miliamper
Mn	: Mangan
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
n	: Atom değeri
NaCl	: Sodyum Klorür
Ni	: Nikel
O <sub>2</sub>	: Oksijen Gazı
P	: Fosfor
Pd	: Çukur Yoğunluğu
S	: Kükürt

s	: Saniye
Si	: Silisyum
St Steel	: Çelik
t	: Korozyona maruz kalma süresi
Tmax	: Kesme Mukavemeti
TS	: Türk Standartları
TUCSA	: Türk Yapısal Çelik Derneği
UHM-CFRP	: Ultra Yüksek Modüllü Karbon Fiber Takviyeli Polimer
Uv	: Ultraviyole
V	: Volt
YDKT	: Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım
W	: Mukavemet Momenti
$\mu$ A	: Mikroamper
$\mu$ m	: Mikrometre
°C	: Santigrat
%	: Yüzde
$\Delta$ E	: Potansiyel Fark
$\Delta$ I	: Akım Değişimi
$\Delta$ m	: Kütle Kaybı
$\Delta$ t	: Zaman Aralığı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Korozyon sürelerine bağlı çekme dayanımı grafiği.....	8
Şekil 2.2. Eğilme testi sonucunda çelik kiriş elemanı .....	10
Şekil 2.3. Fazla katmanlı onarımlar için bağ açma .....	11
Şekil 2.4. Güçlendirilmiş kirişin yan görünüşü .....	13
Şekil 2.5. Eğilme deneyi sonrası çelik profil .....	13
Şekil 2.6. (a) B3 kiriş numunesi, (b) B7 kiriş numunesi .....	15
Şekil 2.7. B1-B3 ve B7 kirişleri yük-deformasyon eğrisi .....	16
Şekil 2.8. B1-B2-B5 ve B6 kirişleri yük-deformasyon eğrisi .....	16
Şekil 2.9. CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin eğilme testi .....	17
Şekil 2.10. CFRP sargı düzenlemeleri .....	18
Şekil 2.11. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği .....	19
Şekil 2.12. Güçlendirilen kiriş detayı .....	22
Şekil 2.13. Hızlandırılmış korozyon hücresi düzeneği .....	23
Şekil 2.14. CFRP ile güçlendirilmiş profillerin eğilme testi sonrası .....	24
Şekil 2.15. Deforme olmuş kiriş numunelerinin sonlu elemanlar modeli .....	25
Şekil 2.16. Güçlendirme çalışmasında kullanılan CFRP kumaş .....	27
Şekil 2.17. Korozyona uğramış çelik kirişler .....	28
Şekil 2.18. CFRP ile güçlendirilen çelik I kirişler .....	28
Şekil 2.19. Korozyona uğramış kirişin üç noktalı eğilme test düzeneği .....	28
Şekil 2.20. Korozyona uğramış çelik kaynağı .....	31
Şekil 2.21. Korozyona uğramış çelik levhaların yüzey işlemi ve topografi taraması sonuçları .....	31
Şekil 2.22. CFRP güçlendirme şemaları .....	34
Şekil 2.23. Hızlandırılmış korozyon düzeneği .....	34
Şekil 2.24. Çelik üretim prosesi .....	36
Şekil 2.25. I Profilleri .....	37



Şekil 2.26. U Profilleri .....	37
Şekil 2.27. L Profilleri .....	37
Şekil 2.28. Kutu profilleri .....	38
Şekil 2.29. Özel üretim profilleri .....	38
Şekil 2.30. Gerilme-Şekil Değişirme grafiği .....	39
Şekil 2.31. Kompakt enkesitli basınç elemanının kapasitesinin elemanın boyuyla değişimi .....	45
Şekil 2.32. Üç noktalı ve dört noktalı eğilme düzenekleri şematik gösterimi .....	46
Şekil 2.33. 1915 Çanakkale Köprüsü .....	49
Şekil 2.34. Endüstriyel tesisler .....	49
Şekil 2.35. Çelik spor tesisi .....	49
Şekil 2.36. Levha ve köşebent birleşimi .....	51
Şekil 2.37. Aloha kazasında uçağın bindirme bağlantısında yorulma .....	53
Şekil 2.38. Korozyon reaksiyonunun oluşumu .....	56
Şekil 2.39. Genel korozyon .....	57
Şekil 2.40. Aralık korozyonu gerçekleşme mekanizması ve örneği .....	58
Şekil 2.41. Galvanik korozyon şeması ve elementlerin aktiflik-pasiflik sıralaması ..	58
Şekil 2.42. Petrol ve gaz hattındaki galvanik korozyon .....	59
Şekil 2.43. Çukurcuk korozyonu .....	60
Şekil 2.44. Çukurcuk korozyonu oluşum mekanizması .....	60
Şekil 2.45. Taneler arası korozyon hasarı .....	61
Şekil 2.46. Kazımalı korozyon- vibrasyon nedeni ile aşınma .....	62
Şekil 2.47. Mikrobiyolojik korozyon oluşum mekanizması .....	64
Şekil 2.48. Isı değiştiricilerde yüksek sıcaklık korozyonu .....	65
Şekil 2.49. Boru ek yerinde erozyon korozyonu .....	67
Şekil 2.50. Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri .....	69
Şekil 2.51. Polarizasyon direnci yönteminin uygulanması .....	70
Şekil 2.52. Kaynak bölgesi radyografik muayene .....	72
Şekil 2.53. Ultrasonik muayene .....	73
Şekil 2.54. Manyetik parçacıkla muayene şematik gösterimi .....	74
Şekil 2.55. Penetrant muayene .....	74
Şekil 2.56. Püskürtme yöntemi ile metalik kaplama .....	77

Şekil 2.57. Elektrolit çözelti banyosu .....	78
Şekil 2.58. Sıcak daldırma galvaniz prosesi .....	78
Şekil 3.1. Test profilleri çizimleri.....	83
Şekil 3.2. Test profilleri çizimleri.....	83
Şekil 3.3. Korozyon hasarına uğramayan profil örneği .....	85
Şekil 3.4. Korozyon hasarına uğrayan profil örneği .....	85
Şekil 3.5. Başlık levha kaynakları.....	86
Şekil 3.6. Kupon çekme deneyi .....	87
Şekil 3.7. Tek yönlü karbon kumaş .....	88
Şekil 3.8. Yatay yönde karbon kumaş .....	88
Şekil 3.9. Düşey yönde karbon kumaş .....	89
Şekil 3.10. Tek yönlü bazalt kumaş.....	89
Şekil 3.11. Yatay yönde bazalt kumaş .....	90
Şekil 3.12. Düşey yönde bazalt kumaş .....	90
Şekil 3.13. Tek yönlü cam kumaş .....	91
Şekil 3.14. Yatay yönde cam kumaş.....	91
Şekil 3.15. Düşey yönde cam kumaş .....	92
Şekil 3.16. Polyester reçinesi .....	93
Şekil 3.17. Korozyon hasarına uğrayacak kısımlar.....	93
Şekil 3.18. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği .....	94
Şekil 3.19. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği .....	94
Şekil 3.20. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği şematik görüntüsü.....	94
Şekil 3.21. Çalışmada kullanılan NaCl .....	95
Şekil 3.22. Başlıkların su yalıtım malzemesi ile kaplanması.....	95
Şekil 3.23. Kullanılan su yalıtım malzemesi.....	96
Şekil 3.24. Doğru akım güç kaynağı .....	96
Şekil 3.25. Hızlandırılmış korozyon havuzundan çıkarılan profiller.....	97
Şekil 3.26. Korozyon atıklarından temizlenen profil.....	98
Şekil 3.27. Katlar için kumaş kesimi .....	99
Şekil 3.28. Profil isimlendirme kartları.....	99
Şekil 3.29. Korozyona uğramış profillerin güçlendirilmeden öncesi .....	100
Şekil 3.30. İlk kat güçlendirme öncesi polyester reçine uygulaması .....	100

Şekil 3.31. Birinci kat güçlendirme uygulaması (CFRP).....	101
Şekil 3.32. Birinci kat güçlendirme uygulaması (BFRP).....	101
Şekil 3.33. İkinci kat güçlendirme uygulaması (BFRP) .....	101
Şekil 3.34. GFRP ile güçlendirmesi tamamlanmış profiller .....	102
Şekil 3.35. Güçlendirme çalışması.....	102
Şekil 3.36. Basınç test cihazı .....	103
Şekil 3.37. Güçlendirilmemiş profil basınç testi .....	104
Şekil 3.38. Güçlendirilmiş profil basınç testi.....	104
Şekil 3.39. Eğilme test cihazı .....	105
Şekil 3.40. Güçlendirilmemiş profil eğilme testi .....	106
Şekil 3.41. Güçlendirilmiş profil eğilme testi .....	106
Şekil 4.1. Kütlece %20 korozyon hasarlı profil basınç testi sonrası.....	108
Şekil 4.2a. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin yük-yer değiştirme grafiği .....	108
Şekil 4.2b. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin enerji sönümlenme kapasitesi grafiki .....	108
Şekil 4.3. Kütlece %20 korozyon hasarlı profil eğilme testi sonrası .....	109
Şekil 4.4a. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin yük-yer değiştirme grafiği .....	110
Şekil 4.4b. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin enerji sönümlenme kapasitesi grafiki .....	110
Şekil 4.5. K0-B1 ve K0-C-B1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği.....	111
Şekil 4.6. CFRP ile güçlendirilmiş korozyon hasarsız profilin basınç testi sonrası. 112	
Şekil 4.7a. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç) .....	112
Şekil 4.7b. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme kapasitesi grafiği.....	112
Şekil 4.8. Korozyonsuz durumda güçlendirme etkisi (basınç) .....	113
Şekil 4.9. K0-E1 ve K0-B-E1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği .....	114
Şekil 4.10. BFRP ile güçlendirilmiş korozyon hasarsız profilin eğilme testi sonrası .....	114

Şekil 4.11a. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (eğilme).....	115
Şekil 4.11b. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme kapasitesi grafiği.....	115
Şekil 4.12. Korozyonsuz durumda güçlendirme etkisi (eğilme).....	115
Şekil 4.13. K10-B1 ve K10-C-B1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği.....	116
Şekil 4.14. CFRP ile güçlendirilmiş %10 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası.....	117
Şekil 4.15a. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç)....	117
Şekil 4.15b. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme kapasitesi grafiği...	117
Şekil 4.16. Kütlece %10 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (basınç).....	118
Şekil 4.17. K10-E1 ve K10-G-E1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği.....	119
Şekil 4.18. GFRP ile güçlendirilmiş %10 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası .....	120
Şekil 4.19a. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (eğilme) ...	120
Şekil 4.19b. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme kapasitesi grafiği...	120
Şekil 4.20. Kütlece %10 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (eğilme) .....	121
Şekil 4.21. K20-C-B2 ve K20-G-B2 profilleri yük-yer değiştirme grafiği.....	122
Şekil 4.22. GFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası .....	122
Şekil 4.23. CFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası .....	123
Şekil 4.24a. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç)....	123
Şekil 4.24b. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme grafiği .....	123
Şekil 4.25. Kütlece %20 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (basınç).....	124

Şekil 4.26. K20-E1, K20-B-E1, K20-C-E1 ve K20-G-E1 profilleri yük-yer değişirme grafiği.....	125
Şekil 4.27. GFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası .....	126
Şekil 4.28. CFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası .....	126
Şekil 4.29. BFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası .....	126
Şekil 4.30a. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değişirme grafiği (eğilme) ...	127
Şekil 4.30b. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümleme kapasitesi grafiği...	127
Şekil 4.31. Kütlece %20 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (eğilme) .....	128

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Test parametreleri.....	9
Tablo 2.2. Eğilme dayanımı sonuçları.....	11
Tablo 2.3. BFRP ile güçlendirme test parametreleri .....	12
Tablo 2.4. Eğilme dayanımı sonuçları.....	13
Tablo 2.5. CFRP ile güçlendirme deney matrisi .....	14
Tablo 2.6. Eğilme deneyi sonuçları.....	15
Tablo 2.7. Deney numuneleri ve test parametreleri .....	18
Tablo 2.8. Deneysel basınç dayanımları ve yer değiştirmeler .....	18
Tablo 2.9. Eğilme dayanımı sonuçları.....	23
Tablo 2.10. Çelik kirişin mekanik özellikleri.....	24
Tablo 2.11. CFRP ile güçlendirme test parametreleri .....	25
Tablo 2.12. Test numunelerinin yük kapasiteleri ve elastik sertliğinin karşılaştırılması.....	25
Tablo 2.13. Test numunelerinin yük kapasiteleri ve elastik sertliğinin karşılaştırılması.....	26
Tablo 2.14. CFRP kumaş özellikleri .....	27
Tablo 2.15. Korozyona uğramış çelik I kirişlerin özellikleri .....	27
Tablo 2.16. İki kiriş için analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması .....	29
Tablo 2.17. Korozyonun iki kiriş üzerindeki etkisinin karşılaştırılması .....	29
Tablo 2.18. CFRP güçlendirmesinin korozyona uğramış kiriş üzerindeki etkisinin karşılaştırılması.....	29
Tablo 2.19. Materyallerin mekanik özellikleri.....	31
Tablo 2.20. CFRP ve korozyona uğramış çelik arasındaki bağlanma davranışı ....	32
Tablo 2.21. Eğilme testi sonuçları.....	35
Tablo 2.22. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde akma gerilmesi ve çekme dayanımı .....	40

Tablo 3.1. Çekme deneyi test sonuçları .....	87
Tablo 3.2. S235 metalinin kimyasal bileşimi (%) .....	87
Tablo 3.3. Karbon tek yönlü kumaş özellikleri .....	88
Tablo 3.4. Bazalt tek yönlü kumaş özellikleri.....	89
Tablo 3.5. Cam tek yönlü kumaş özellikleri .....	90
Tablo 3.6. Takviyesiz reçinenin mekanik özellikleri.....	92
Tablo 3.7. Testlere göre profil güçlendirme yönleri.....	99
Tablo 4.1. Farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin basınç dayanımları .....	107
Tablo 4.2. Farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin eğilme dayanımları .....	109
Tablo 4.3. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları .....	111
Tablo 4.4. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları .....	113
Tablo 4.5. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları .....	116
Tablo 4.6. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları.....	119
Tablo 4.7. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları .....	121
Tablo 4.8. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları.....	125

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Korozyon, çelik yapı elemanları, korozyon hızı, güçlendirme, GFRP, CFRP, BFRP

Bu çalışmada, çelik yapı elemanlarının korozyona karşı dayanımını artırmak için kullanılan yöntemlerin etkinliği incelenmiş olup farklı derecelerde kütlece korozyon hasarına uğratılmış S 235 kalite çelik kutu profillerde yapılan GFRP, CFRP ve BFRP ile güçlendirmenin yük taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir.

Yüksek taşıma kapasiteleri ve sünek davranışları sebebiyle çelik taşıyıcı sistemler sektörde oldukça tercih edilen sistemlerdir. Çelik elemanların taşıma kapasiteleri çevresel etkenler neticesinde zarar görebilmektedir. En önemli zarar olan korozyon hasarı, taşıma kapasitelerinde ciddi düşüslere sebep olmaktadır. Korozyon mekanizması ile çelik yapı elemanlarında kütle kayıpları oluşur. Oluşan kütle kayıpları ile elemanların kullanım ömürleri, taşıma gücü kapasiteleri ve mukavemetleri azalır.

S 235 kalite çelik kutu profillerin korozyona karşı dayanımı ve korozyona uğramış durumda güçlendirilmesi, çelik yapı elemanlarında korozyondan korunma ve korozyon tespit yöntemleri araştırılmıştır. Yapılan deney düzeneği ile hızlandırılmış korozyona maruz bırakılan S 235 çelik kutu profillerinin kütlece farklı korozyon derecelerinde yük taşıma kapasitesindeki değişim incelenmiştir. Korozyon hızı Faraday denklemi ile takip edilmiştir. Akabinde kütlece %10 ve %20 korozyona uğramış kutu profiller GFRP, CFRP, BFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen profillerin aksenal basınç ve eğilme kuvvetleri altında güçlendirmenin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Araştırmada elde edilen bulgulara göre, CFRP ile güçlendirme %10 hasar durumunda basınç kuvveti altında %17,78 dayanımı artırırken eğilme kuvveti altında %34,43 artış göstermiştir. BFRP ve GFRP ile güçlendirme eğilme etkisi altındaki profillerde taşıma gücü kapasitesini artırmıştır. Yapılan çalışma sonucunda CFRP ile güçlendirmenin korozyon hasarı durumunda basınç elemanlarında ve kiriş elemanlarında etkin olduğu görülmüştür. BFRP ve GFRP ile güçlendirme kiriş elemanlarda taşıma gücü kapasitesini artıracığı görülmüştür. BFRP ile güçlendirilmiş kiriş elemanlarının enerji sönmleme kapasitesi diğer güçlendirme türlerine göre başarılı olmuştur.





# **INVESTIGATION OF BENDING AND PRESSURE BEHAVIOR OF CORRODED STEEL BOX PROFILES BY STRENGTHENING WITH DIFFERENT FRP MATERIALS**

## **SUMMARY**

Keywords: Corrosion, steel structure elements, corrosion rate, strengthening, GFRP, CFRP, BFRP

In this study, the effectiveness of the methods used to increase the corrosion resistance of steel structural elements was investigated, and the effect of GFRP, CFRP and BFRP reinforcement on the load bearing capacity of S 235 quality steel box profiles that were exposed to different degrees of mass corrosion damage was investigated.

Steel carrier systems are highly preferred systems in the sector due to their high bearing capacities and ductile behavior. Bearing capacities of steel elements can be damaged as a result of environmental factors. Corrosion damage, which is the most important damage, causes serious decreases in carrying capacities. Mass losses occur in steel structural elements with the corrosion mechanism. With the resulting mass losses, the service life, bearing capacity and strength of the elements are reduced.

Corrosion resistance and strengthening of S 235 quality steel box profiles, corrosion protection and corrosion detection methods in steel structural elements were investigated. With the experimental setup, the change in load carrying capacity of S 235 steel box profiles exposed to accelerated corrosion at different corrosion degrees by mass was investigated. The corrosion rate was followed by the Faraday equation. Subsequently, 10% and 20% corroded box profiles by mass is reinforced with GFRP, CFRP, BFRP. The effect of reinforcement on the bearing capacity of the reinforced profiles under axial compression and bending forces was investigated.

According to the findings obtained in the study, reinforcement with CFRP increased the strength by 17.78% under the compressive force in case of 10% damage, while it increased by 34.43% under the bending force. Strengthening with BFRP and GFRP has increased the bearing capacity of the profiles under the effect of bending. As a result of the study, it was observed that the reinforcement with CFRP was effective in the pressure elements and beam elements in case of corrosion damage. It has been observed that reinforcement with BFRP and GFRP will increase the bearing capacity of beam elements. The energy dissipation capacity of beam elements reinforced with BFRP has been successful compared to other reinforcement types.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Betonarme elemanların basınç dayanımları yüksek, çekme dayanımları düşüktür. Çelik yapı elemanlarının ise hem basınç hemde çekme dayanımları yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca deprem etkisi çelik yapılar ile en az seviyeye çekilmektedir. Çelik elemanların imalatı genellikle atölyelerde gerçekleştirildiğinden dayanımlar standart ve beklenen seviyelerdedir. Bu gibi avantajlarının yanı sıra çelik malzemelerin dayanımları korozyondan oldukça etkilenmektedir [1].

Sanayi kuruluşlarında en sık tercih edilen malzemelerden biri S 235 çeliğidir. S 235 çeliği sıcak üretim sonucu oluşan çeliğin tekrardan işleme alınarak soğuk çekme işlemi uygulanması sonucu oluşturulur. Soğuk çekme işlemi sonucunda malzemeye yeni özellikler kazandırılarak daha dayanıklı hale getirilmiş olur. Yapı malzemeleri, gemi inşasında, ağır sanayi inşaatlarında, mobilya ve çelik eşyalar gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [2], [3].

Metal veya metal alaşımlarının buldukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal tepkimeye girerek bozunması ve tahrip olması olayına korozyon denir [4]. Korozyon, metallerin ve alaşımların özelliklerini kaybederek daha kararlı bir hale geçmesi olayı olarak da tanımlanabilir [5]. Endüstriyel alanlarda birçok malzeme kullanım alanlarına göre bazı sıvılar ile temas etmektedir. Temaslar neticesinde malzemeler hasara uğrayabilmektedir. Sıvıların kimyasal özelliklerine bağlı olarak malzemeler farklı şekillerde kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara uğramaktadırlar [6]. Korozyon ile betonarme yapılarda ve çelik yapılarda karşılaşabileceğimiz gibi hayatımızın her noktasında karşılaşabiliriz. Korozyonun bu önemi; ekonomik açıdan; tahribata uğramış bir metalin tekrar kullanılabilir hale dönüştürülebilmesi, güvenlik açısından; korozyon nedeni ile metalin zayıflaması, görevini yerine getiremeyecek duruma

gelmesi ve kazalara yol açması, kaynakların korunması açısından; ileriye dönük olarak stokların oluşturulması şeklinde açıklanabilir [7].

Çelik yapılar agresif etkilere maruz kaldığında korozyona uğrayabilir. Bu ortamlardan en belirginini deniz ortamları gibi tuzlu sulardır. Çelik elemanlar elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda korozyona uğrayarak yüzey tabakalarından kütle kaybederler. Çelik elemanların enine kesitlerinde azalmalar yük taşıma kapasitelerinde düşüşe neden olur. Yük taşıma kapasitelerinde ki kayıpların telafisi için çelik elemanların güçlendirilmesi gerekmektedir [8].

Son yıllarda elyaf takviyeli kompozitler metallerin güçlendirilmesinde tercih edilmektedir. Çalışmalar genellikle metal kirişlerin elyaf takviyeli kompozitlerle güçlendirilmesi yönündedir. Metal boruların, ince cidarlı metal tankların elyaf takviyeli kompozitler ile onarımlarının yapılması ekonomik açıdan daha elverişli olduğu görülmüştür [9]. Bu kompozitler ile güçlendirmenin en önemli avantajları, kavisli ve güçlendirme levhalarının uygulanmasının neredeyse olanaksız olduğu profillerin güçlendirilmesine olanak sağlaması ve ölü yükte artışa neden olmamasıdır.

FRP (fiber takviyeli polimer) malzeme; takviye çubukları, teller ve örgü kumaşlar, kayış ve levhaların üretimi için de kullanılmaktadır. FRP malzemeler, camdan (G), karbon (C), bazalt (B) liflerin birbirine epoksi reçine, polyester veya vinil-ester ile bağlanması ile üretilir. Bu malzemeler GFRP (cam fiber takviyeli polimer), CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) ve BFRP (bazalt fiber takviyeli polimer) olarak ayırt edilirler [10].

Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek dayanım ve rijitlik özelliklerinden dolayı endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Polimer esaslı elyaf takviyeli kompozitlerde özellikle epoksi matrisli kompozitler, genel olarak mekanik özellikleri, kullanım alanları ve maliyetlerine göre karbon, cam elyaflar ve aramid takviye ürünü olarak kullanılmaktadır. Karbon elyaflar diğerlerinden yüksek dayanıma, rijitliğe ve hafifliğe sahip olmasına karşın yüksek maliyetlidir. E-Cam elyaflar karbon elyaflara göre daha düşük dayanım ve rijitliğe sahip olmasının yanında

düşük maliyetli olması kullanım alanını genişletmektedir. Diğer elyaflar kadar yüksek performans sergileyememesi nedeniyle düşük maliyetli ve daha iyi mekanik özelliklere sahip yeni elyaf takviyesi çalışmaları sürekli yapılmıştır [11].

Betonarme yapıları güçlendirmek için yaygın olarak kullanılan FRP'nin günümüzde çelik yapıları güçlendirmek amacıyla kullanımları araştırılmaktadır. Özellikle deniz ortamlarında, enine kesit alanlarında azalmaya uğrayarak aşınmış çelik yapıların güçlendirilmeye ihtiyaçları vardır [12]. FRP levhaların ince yapısı ve yüksek çelik mukavemeti karşısında güçlendirme için etkili olabilmesi için birden fazla katman ve çok etkili bir bağlanma direnci gerektirir. FRP kompozitler yüksek elastisite modülü, yüksek mukavemet, korozyon ve yorulma direnci ile bilinir.

Karbon lifi ile çelik malzeme arasında galvanik etkileşim olabilmektedir. Karbon fiber kompozit ile çeliğin teması halinde çelik yüzeyinde korozyon oluşabilir [13]. Bu sorunu önlemek amacıyla GFRP kompozit tabakası doğrudan teması önlemek için metal ve CFRP arasına yerleştirilmesi çalışılmıştır. GFRP kompozitleri yapıştırıcı ile birleştirmeyi iyileştirir ve CFRP nin ilk katmanı daha iyi uyumu sağlar. Bu sayede daha yüksek kırılma mukavemeti elde edilir [14].

Son yıllarda bazalt elyaflar, kullanım sahasının genişliği, yüksek dayanım ve rijitlik özellikleri, korozyon direnci ve maliyetlerinin karbon elyaflardan düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir. Çevre dostu olmasının yanında CFRP'nin maliyetinin beşte biri kadar maliyetinin olması dikkat çekicidir [15]. Bazalt elyaflar karbon elyaflardan daha yüksek sünekliğe sahip olmanın yanında daha iyi korozyon direnci sağlar. Isı ve yangın direncinin yanı sıra yüksek UV ışını direncide sunmaktadır [16].

Üstün mekanik ve mukavemet özellikleri CFRP kompozitleri çelik kirişler için önemli bir güçlendirme elemanı haline getirmektedir. CFRP'nin hasarlı çeliklerin onarım ve güçlendirmesine yönelik çalışmalar sınırlı sayıdadır. CFRP ile onarım çok düşük ölü ağırlık ve maliyet açısından verimli bir yöntemdir [17]. CFRP kullanılarak güçlendirmede ortaya çıkan temel problemler, çelik ile CFRP arasındaki bağlantıda

zayıflık ve CFRP ile çelik arasında oluşma ihtimali olan galvanik korozyon riskidir. Galvanik korozyon riskini önlemek için GFRP den yararlanılabilir [18].

CFRP ile çelik güçlendirme dayanıklılığı üzerine yapılan çoğu araştırmada maksimum maruz kalma süresi bir yıl ile sınırlı kalmakta veya çeliğin bozulması, çelik kalınlığının azaltılması ile simüle edilmektedir. Bu nedenle gerçek CFRP-çelik güçlendirmesinin zamana bağlı malzeme özellikleri farklı çevre koşullarındaki sistemlerin değerlendirilmesi kısıtlı olmuştur. Çözüm olarak tercih edilen hızlandırılmış etki testleri ile başarılı simülasyonlar yapılmaktadır.

Endüstriyel yapı veya herhangi bir malzemeyi normal koşullarda oluşacak korozyon sürelerinden daha kısa sürelerde dayanımlarının belirlenmesi amacıyla düzenlenmiş olan korozyon ve yaşlandırma test düzenekleri tasarlanmıştır.

Çalışmada kullanılan S 235 kalite çelik kutu profiller sahip oldukları kesit geometrisi ile aksenal yük altında yüksek performans sergilerler. Fakat kesme ve eğilme yükleri altında profil gövde ve başlığında istenmeyen lokal burkulmalar meydana gelebilir. Burkulma etkilerini en aza indirmek amacıyla farklı meshleme teknikleri ile elemanda güçlendirme çalışmaları yapılabilmektedir [19].

Bu çalışmada, S 235 kalite çelik kutu profiller % 3,5 NaCl ortamında hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmıştır. Kütlece % 10 ve % 20 korozyona uğrayan S 235 kutu profillerinin yük taşıma kapasitesindeki değişim incelenmiş olup korozyona uğrayan profiller GFRP, CFRP ve BFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işleminden sonra aksenal yük ve üç noktalı eğilme testlerine tabi tutulmuştur.

Bilindiği üzere çelik bir yapı elemanının herhangi bir bölgesinde korozyon neticesinde görevini yapamayacak derecede bozulmuş elemanın yenisi ile değiştirilmesi hem maliyet hemde zaman açısından önemli bir zarardır. Bu noktada bölgesel güçlendirmenin önemi dikkat çekmektedir. Yapılan güçlendirme neticesinde yapı elemanlarında korozyon sürecinin devam etmesi halinde maksimum yük değeri ve enerji sönümleme kapasitesindeki değişim incelenmiştir.

## **BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Literatür Taraması**

Yapıların ve yapı elemanlarının güçlendirmesini gerektirecek sebepler bulunmaktadır. Bu sebeplerden en önemlileri; yapıya etki eden yüklerin tasarım sırasında gerçek yük değerlerine göre küçük alınması, sonradan korozyon oluşumu ve yaşlanmayla meydana gelen bozulmalara bağlı olarak yük taşıma kapasitelerinde kayıplar oluşabilmektedir. Bu kayıpları en aza indirmek amacıyla güçlendirme çalışmaları yapılmaktadır.

Petrol ve gaz boru hatlarında metalik alt yapının bozulması birkaç nedene bağlıdır ve ana faktör korozyondur. Korozyonun ekonomik ve çevresel etkileri vardır. Karayolları, köprüler, petrol ve gaz işletmeleri, su ve atıl su işletmeleri gibi birçok sistemde tehlike arz etmektedir. Dünya çapında yıllık korozyon maliyetinin 1,8 trilyon doları aştığı tahmin edilmektedir [20].

Korozyon mekanizmasının oluşmasından dolayı kesit kaybına uğrayan veya artan trafik yüklerinden dolayı mevcut kesitleri yetersiz kalan sistemlerde, çözüm olarak kesitin yenisiyle değiştirilmesi ya da hasarlı bölgeye çelik plaka kaynaklanması ve bulonlanması yaygın olarak kullanılmaktadır. Önerilen çözümler trafik akışını uzun süre aksatması ve ekonomi gibi sebeplerden ötürü avantajlı olmamaktadır. Ayrıca yüksek maliyet, ilave edilen malzemelerin ağır olması, yorulma performansının düşük olması, bulon ya da kaynaklanma sırasında kesit zarar verilmesi ve istenmeyen gerilmelerin oluşması gibi sebeplerden dolayı bu güçlendirme teknikleri genellikle tercih edilmemektedir [21].

Yeni malzeme arayışları ile fiber teknolojisi güçlendirme alanına girmiştir. Fiber takviyeli polimer malzemeleri korozyona dayanıklı olması, hafif olması ve yorulma çatlaklarını önlemesi gibi nedenlerden dolayı güçlendirme çalışmalarında tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalarda FRP ve çelik arasındaki bağlantılarda sorunların yaşadığı vurgulanmıştır. FRP ile çelik arasındaki yük aktarımında; bağlantı boyu, yapıştırıcı tipi, FRP kalınlığı gibi parametreler önem arz etmektedir [22].

Örgülü kompozit kumaşlar kullanılarak kaynaklı boruların güçlendirilmesi uygulamalarının en eskisi çelik konstrüksiyonlu köprülerde görülmektedir. Köprü ayaklarında kullanılan çelik boruların hasara uğramaları durumunda veya takviyelerinde kompozit kumaşla kuvvetlendirilmiştir [23, 24, 25]. Metallerin yorulma hasarlarının giderilmesinde kompozit kumaş kullanımı ilk olarak uzay endüstrisi ve donanmasında görülmektedir. Ayrıca deniz aşırı petrol ve gaz endüstrisinde patlamalara dayanıklı, korozyon etkilere dayanım gerektiren bölgelerde metaller kompozit kumaşlarla güçlendirilmiştir [26].

Günümüzde korozyon nedeniyle kaybedilen taşıma gücü kapasitesini yeniden kazanmak için CFRP levhaların kullanımı popüler bir teknik olmuştur [27]. Köprüler, binalar ve açık deniz petrol tesisleri gibi birçok platformda ince cidarlı çelik elemanlardan yararlanılmaktadır. Çok sayıda çelik yapı korozyon, çökme ve çatlaklar gibi kötüleşen etkilere maruz kalmaktadır. Çelik elemanlarında korozyon mekanizması, kalınlık azalmasına neden olmaktadır. Bu elemanların yenisi ile değiştirilmesi bazı durumlarda imkansız olmakla birlikte değiştirilmesi durumunda yüklü maliyet ve zaman gerektirecektir. Bu nedenle çeliğin güçlendirilmesi için kullanılan geleneksel yöntem olan hasarlı bölgeye ek çelik plakaların yerleştirilmesi sistemde ölü yük artışına neden olmakla birlikte beraberinde birçok dezavantaj getirmektedir. Daha iyi bir güçlendirme tekniği olarak CFRP kompozit malzemeler tercih edilmektedir. CFRP yaygın olarak betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesine uygun bir malzeme olarak kullanılır. Yüksek gerilme mukavemeti, hafifliği ve yapısal diğer özellikleri bakımından agresif ortam koşullarına dayanıklılık sağlamaktadır [28].



Güçlendirmede kullanılan CFRP kompozit malzemeler genellikle FRP levhalar ve ıslak yatırmalı FRP kumaşlar olmak üzere iki farklı biçimde kullanılmaktadır. CFRP plakaları kullanılarak güçlendirilen çelik yapı elemanlarının eğilme mukavemetine ve güçlendirmenin etkinliğini incelemek üzere çalışmalar yapılmıştır.

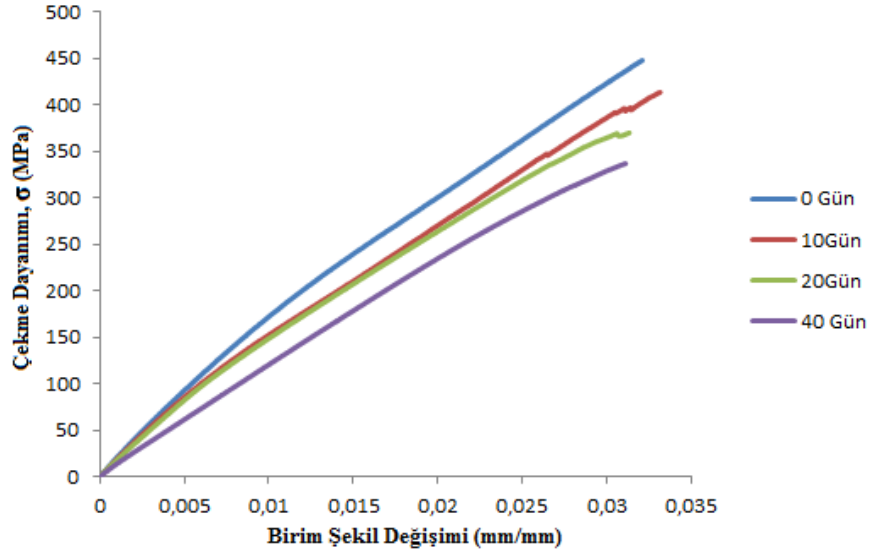
Zhao ve Zhang [29], içi boş çelik profillerin CFRP ile güçlendirilmesinin fizibilitesi hakkında çalışma yapmıştır. Elchalakani [30], korozyona uğramış çelik dairesel boşluklu profillerin CFRP levhalar kullanılarak güçlendirilmesi hakkında çalışma yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda güçlendirilmiş elemanın yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar kaydedilmiştir. Chen ve Das [31] ve Manalo ve ark. [32], ıslak yatırma tekniği ile CFRP kumaşları kullanarak aşınmış çelikleri güçlendirmiştir. Güçlendirilen elemanların arıza modları üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Cam elyafı; kireçtaşı, kil vb. hammaddelerle bir dizi oksitten ve genellikle silika oksitten oluşan işlenmiş bir malzemedir. Erimiş oksitleri 3-24 µm arasında farklılaşan filamentlere çekerek üretilmektedirler. Matris malzemesinin takviyesi olarak kullanılan çeşitli cam elyafı vardır. Bunlar; doğranmış fiberler, kıyılmış iplikler, kıyılmış iplik paspaslar, dokuma kumaşlar ve yüzey dokusudur. İnşaat mühendisliği uygulamalarında genellikle cam fiber iplikler ve dokuma kumaş formları kullanılmaktadır. E-cam elyafının diğer elyaf türlerine nispeten düşük maliyetli olması yaygın kullanım sebeplerinden biri olmuştur. Buna karşın diğer elyaflara göre daha düşük Young modülüne sahip olması, düşük nem ve alkali direnci ve gerilme kopmasından dolayı uzun vadeli dayanımlarının düşük olması dezavantajlarındandır [33].

Bazalt elyafları öncelikli olarak askeri savunma ve donanmalarda kullanılması ile endüstriye girerek kullanım alanı gün geçtikçe artmıştır. Bazalt elyafların karbon ve cam elyaflara alternatif olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bazalt volkanik taşların yüksek sıcaklıklarda ergitilmesiyle bazalt elyaflar elde edilmektedir. Bazalt elyafların kimyasal yapıları cam elyaflara benzemektedir. Çevresel asitlere karşı kararlılıkları yüksektir. Bazalt elyaflar -200°C ile 600°C sıcaklıkları aralığında kullanılabilir. Bu elyafların çekme dayanımlarının ve elastisite modülünün cam

elyaflardan yüksektir [34, 35, 36]. Bazalt elyafların kararlı yapısı korozif ortamlarda kullanıma elverişli olması bakımından cam elyaflara göre avantajlıdır.

Demirci ve ark, [11], vakum infüzyon yöntemi ile bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit levhalar üretip Akdeniz suyu doğal korozyon ortamında 0, 10, 20 ve 40 gün bekletilmiştir. Ardından ASTM D 3039/D 3039M standartlarına uygun hazırlanan levhalar çekme testine tabi tutulmuştur. Artan korozyon sürelerine göre çekme dayanımlarında ki azalmalar incelendiğinde 40 gün deniz suyu ortamında bekletilen bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin çekme dayanımında %26,5 kadar kayıp olduğu tespit edilmiştir. Çekme deneyi sonuçları Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Korozyon sürelerine bağlı çekme dayanımı grafiği

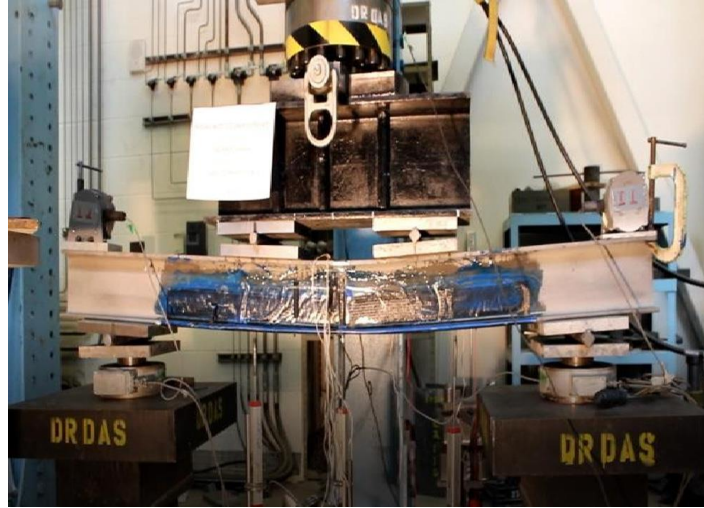
Bastani ve ark. [37] iki farklı FRP kumaşla güçlendirilmiş yapısal çelik kirişlerin performanslarını incelemiştir. CFRP ve BFRP kumaşlar ile güçlendirme çalışması yapılmıştır. Eğilme gerilme bölgesinde korozyon kusuru olan ve olmayan toplam sekiz adet çelik kiriş 4 noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, her iki FRP kumaşının kullanımının süneklikte azalmaya neden olduğunu, ancak BFRP kumaşı ile güçlendirilen kirişlerin sünekliğinin benzer kalınlıkta CFRP kumaşla güçlendirilmiş kirişlerden çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışma sonucunda ayrıca her iki FRP kumaşında kirişlerin nihai yükünü, akma yükünü ve elastik sertliğini artırmada etkili olduğunu ancak gereken BFRP kumaş katmanlarının

sayısının CFRP kumaş katman sayısından daha yüksek olması gerektiği gösterilmiştir. Çelik kirişlerin FRP kumaşları ile güçlendirilmesinde kopma davranışlarını içeren yapısal davranış sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yapılan bu çalışma bazalt kumaşların karbon kumaşlara rekabetçi ve yeşil bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Mitra ve ark. [38] çalışmalarında korozyon hasarının derinliğine göre derecelendirilmiş ve BFRP ile güçlendirme yapmışlardır. Çalışmada 9 adet çelik I profil kullanılmıştır. Bunlardan 3 adedi kontrol kirişidir diğer 6 adet kiriş BFRP ile güçlendirilmiştir. Üç farklı korozyon hasarında ve dört farklı BFRP katmanında sargılama yapılmıştır. Çelik kirişlerin başlık kalınlıkları korozyona bağlı olarak duvar kalınlığını simüle etmek üzere azaltılmıştır. Tüm kirişlere dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır (Şekil 2.2.). Kirişler 2000 mm uzunluğunda ve kiriş açıklığı 1500 mm dir. Tablo 2.1.'de test parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Test parametreleri [38]

Korozyon En Boy Oranı	Kiriş Tipi	Korozyon Şekli	Bazalt Katman Sayısı	Toplam Onarım Kalınlığı (mm)
-	Kontrol numunesi	-	-	-
1	Kontrol numunesi- korozyona uğramış	100x100	-	-
4	Kontrol numunesi- korozyona uğramış	400x100	-	-
1	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:1	100x100	7	3,15
1	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:1	100x100	10	4,5
4	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	400x100	7	3,15
4	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	400x100	10	4,5
4	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	400x100	15	6,75
4	BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	400x100	20	9



Şekil 2.2. Eğilme testi sonucunda çelik kiriş elemanı [38]

Farklı korozyon boyutlarına sahip çelik kirişler için bazalt elyaf başarı ile kullanılabilir. Çalışmada elyafların çapraz kayış şeklinde güçlendirilmesi BFRP'nin ayrılmasını önlemiştir. Korozyona uğramış kirişlerin nihai mukavemet kayıpları güçlendirme ile telafi edilmiştir. Optimum BFRP katman sayısı 15 olarak belirlenmiştir. Daha fazla sayıda katman uygulandığında erken bağ çözme başarısızlığı ile karşılaşılmaktadır (Şekil 2.3.). BFRP kumaş katman sayısının belirlenebilmesi için yeni bir yarı ampirik denklem önerilmiştir (Denklem 2.1).

$$n = 1,86a + 5 \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de n, optimum BFRP katman sayısını göstermektedir. Korozyon bölgesi en boy oranı a ile gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Fazla katmanlı onarımlar için bağ açma [38]

Tablo 2.2. Eğilme dayanımı sonuçları [38]

Kiriş Tipi	Bazalt Katman Sayısı	Akma Yüğü (kN)	Kopma Yüğü (kN)
Kontrol numunesi	-	273,3	322,2
Kontrol numunesi- korozyona uğramış	-	229,8	286,4
Kontrol numunesi- korozyona uğramış	-	225,4	267
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:1	7	247,4	318,6
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:1	10	249,4	341,9
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	7	246,9	295,1
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	10	253,7	311,6
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	15	258,5	331,7
BFRP ile güçlendirilen örnek- En boy oranı:4	20	-	-

Mitra ve ark. [39] yaptıkları önceki çalışmalarda fiber takviyeli polimerlerin, çelik kirişlerin korozyona uğramış halde güçlendirilmesinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Standart haddelenmiş W150X24 I profiller 2000 mm boyunda olacak şekilde testlerde kullanılmıştır. Çelik I profillerin flanşlarında %20 ve %40 korozyon kusuruna uğramasını temsil edecek şekilde kalınlık azaltması yapılmıştır. Numuneler 1. grup ve 2. grup olarak sırasıyla %40 korozyonu ve %20 korozyonu kapsayacak şekilde ayrılmıştır. Her iki grubun kontrol numunelerinden tek eksenli çekme deneyi için

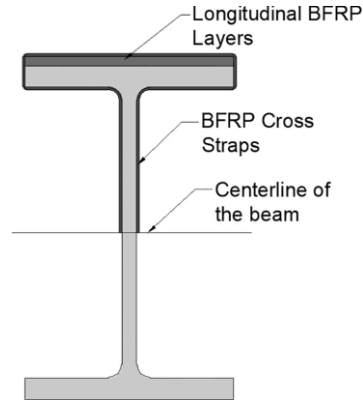
ASTM E8/E8M-15a standardına göre kupon numuneleri alınıp test yapılmıştır [40]. 1. grup için akma ve kopma dayanım değerleri sırasıyla 379 MPa ve 484 MPa dır. 2. grup için akma ve kopma dayanım değerleri sırasıyla 360 MPa ve 466 MPa dır. Elastisite modülleri 1. ve 2. grup için sırasıyla 205 GPa ve 203 GPa olarak bulunmuştur. Güçlendirme için tek yönlü bazalt elyaf kumaş tabakaları kullanılmıştır. Çift komponentli epoksi ile çeliğe kumaşlar tutturulmuştur. BFRP ile güçlendirme katmanlar halinde yapılmış olup bağ çözme hatasını engellemek amacıyla çapraz kayışlar kullanılmıştır. Korozyon kusuru çelik profilin üst flanşında dairesel bir yay alanı içerisinde oluşturulmuştur. Korozyon yüzdesi, üst flanştan çıkarılan çeliğin derinliği (4,08 mm) üst flanşın kalınlığının (10,2 mm) %40'ı şeklinde hesaplanmıştır.

Tablo 2.3.'te BFRP ile güçlendirme test parametreleri verilmektedir.

Tablo 2.3. BFRP ile güçlendirme test parametreleri [39]

Numune Adı- Grup Numarası	Korozyon Derinliği, %	Kiriş Tipi	BFRP Katman Sayısı	Çapraz Kayış Katman Sayısı	Toplam BFRP Kumaş Kalınlığı, mm
UB1/ 1.Grup	-	Kontrol numunesi	-	-	-
40CC/ 1.Grup	40	Kontrol numunes-%40 korozyon hasarlı	-	-	-
R40-5L-3C/ 1.Grup	40	BFRP ile güçlendirilmiş numune	5	3	2,3
R40-8L-3C/ 1.Grup	40	BFRP ile güçlendirilmiş numune	8	3	3,6
UB2/ 2.Grup	-	Kontrol numunesi	-	-	-
20CC/ 2.Grup	20	Kontrol numunes-%20 korozyon hasarlı	-	-	-
R20-2L-2C/ 2.Grup	20	BFRP ile güçlendirilmiş numune	2	2	0,9
R20-4L-2C/ 2.Grup	20	BFRP ile güçlendirilmiş numune	4	2	1,8

Çelik profil yüzeyi temizlendikten sonra bazalt elyaf kumaşlar 500 mm uzunluğunda ve 100 mm genişliğinde kesilip epoksi astar uygulamasının ardından çeliğe yapıştırılmıştır. Öncelikle uzunlamasına kumaşlar serilip daha sonra çapraz kayış katmanları serilmiştir (Şekil 2.4.). Güçlendirilen numuneler yedi gün sonra dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur (Şekil 2.5.). Eğilme dayanımı sonuçları Tablo 2.4.'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Güçlendirilmiş kirişin yan görünüşü [39]



Şekil 2.5. Eğilme deneyi sonrası çelik profil [39]

Tablo 2.4. Eğilme dayanımı sonuçları [39]

Numune Adı-Grup Numarası	Korozyon Derinliği, %	Kiriş Tipi	Akma Yüğü (kN)	Kopma Yüğü (kN)
UB1/ 1.Grup	-	Kontrol numunesi	384	398
40CC/ 1.Grup	40	Kontrol numunes-%40 korozyon hasarlı	319	365
R40-5L-3C/ 1.Grup	40	BFRP ile güçlendirilmiş numune	341	390
R40-8L-3C/ 1.Grup	40	BFRP ile güçlendirilmiş numune	357	398
UB2/ 2.Grup	-	Kontrol numunesi	349	381
20CC/ 2.Grup	20	Kontrol numunes-%20 korozyon hasarlı	329	355
R20-2L-2C/ 2.Grup	20	BFRP ile güçlendirilmiş numune	332	376
R20-4L-2C/ 2.Grup	20	BFRP ile güçlendirilmiş numune	333	386

Yapılan çalışma neticesinde köprü kirişleri güçlendirmesinde bazalt kumaşların kullanımının olumlu yönde katkı sağlayacağı görülmüştür. Çalışmada sunulan güçlendirme tekniğinin çelik kirişlerin korozyona uğrama durumunda yük taşıma kapasitelerini iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bağ çözme kusurunun giderilmesi için çapraz kayış yönteminin etkinliği görülmüştür. Çeşitli derinliklere sahip

korozyona uğramış çelik kirişlerin nihai mukavemeti, korozyona uğramayan kirişlerin mukavemetinden düşüktür. BFRP ile güçlendirilmiş korozyon hasarlı numunelerin dayanımlarında iyileşme görülmüştür. Bazalt elyaf kumaş katmanlarının sayısındaki artış ile güçlendirilmiş numunelerin nihai yük kapasitesindeki artış görülmüştür. Güçlendirilen kirişlerin kontrol kirişlerden daha sünek olduğu tespit edilmiştir.

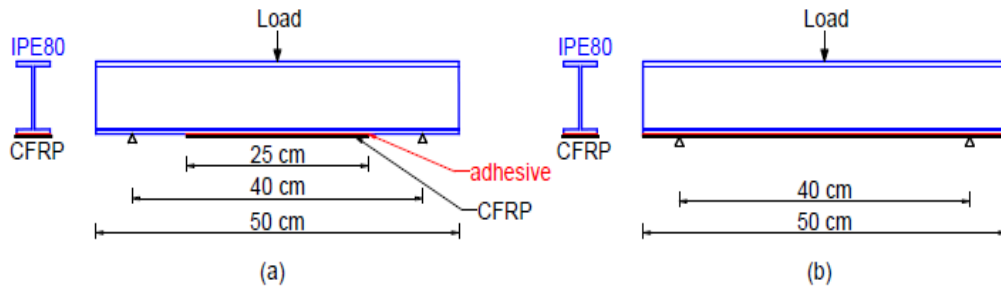
Mahdy ve ark. [12] yaptığı çalışmada güçlendirilmemiş halde hem korozyona uğramış hem de korozyona uğramamış IPE80 profilleri CFRP ile güçlendirip eğilme dayanımlarını incelemiştir. Çalışmasında numunelerden bazılarını sadece CFRP ile güçlendirmiştir bazılarını ise önce galvanik korozyonu önlemek amacıyla GFRP ile sarıp ardından CFRP ile sargılamıştır. GFRP ile yalıtım katmanı oluşturulmasının ardından CFRP ile güçlendirme işleminin eğilme dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Çelik profil ile karbon kumaşın olası galvanik korozyon reaksiyonunu önlemek için cam elyaftan bir yalıtım tabakasının kullanılması Photiou ve ark. [41] tarafından tavsiye edilmiştir. Korozyona uğratma işlemi üç gün boyunca hidroklorik asit (HCl) çözeltisine kirişleri batırarak gerçekleştirilmiştir.

Mahdy ve ark. yaptıkları çalışmada; CFRP olarak Sika Carbodur S512 plakalarını ve yapıştırıcı olarak iki bileşenli epoksi esaslı Sikadur-30LP ürününü kullanmışlardır. Derz ve duvar tamiri için kullanılan cam elyaf örgü bandı yalıtım amacıyla bu çalışmada deney parametresi olarak kullanılmıştır. Bu araştırmada CFRP kullanılarak aşınmış çelik elemanın güçlendirilme etkinliği deneysel bir program ile test edilmiştir. Deneylerde 50 cm uzunluğunda 7 adet kiriş numunesi 40 cm net açıklık olacak şekilde üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur (Şekil 2.6.). Test sonuçları Tablo 2.6.'da gösterilmektedir. Deney matrisi Tablo 2.5.'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5. CFRP ile güçlendirme deney matrisi [12]

Numune	Korozyon	CFRP	GFRP	CFRP Uzunluğu
B1 (Kontrol)	Yok	Yok	Yok	-
B2	Var	Yok	Yok	-
B3	Yok	Var	Yok	25 cm
B4	Var	Var	Yok	25 cm
B5	Yok	Var	Var	25 cm
B6	Var	Var	Var	25 cm
B7	Yok	Var	Yok	50 cm



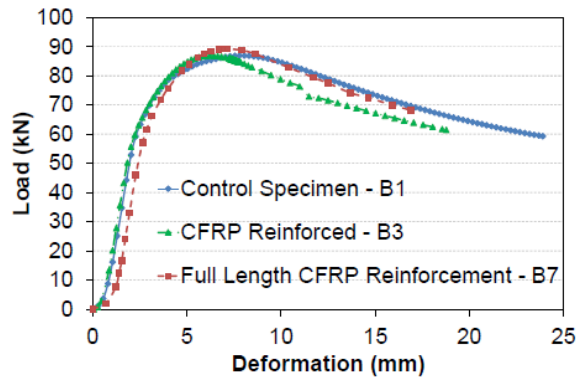


Şekil 2.6. (a) B3 kiriş numunesi, (b) B7 kiriş numunesi [12]

Tablo 2.6. Eğilme deneyi sonuçları [12]

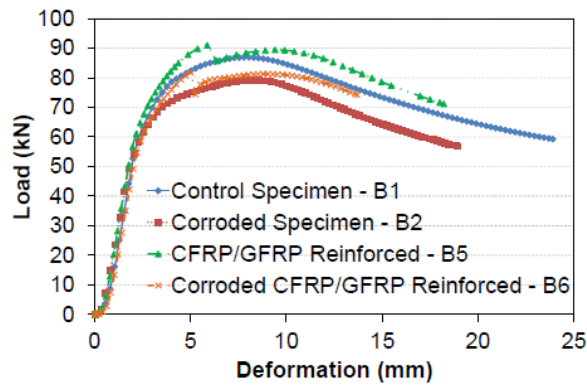
Numune	Kopma Yüğü (kN)
B1 (Kontrol)	86,9
B2	79,3
B3	86,9
B4	76,0
B5	91,0
B6	81,3
B7	89,2

B1 kontrol kiriş i ile B2 korozyona uğrayan kiriş in yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında B2 kiriş inin kapasitesinde %8,75 düşüş olduğu görülmektedir. B2 ve B4 kiriş leri korozyona uğramıştır ve B4 kiriş i CFRP ile güçlendirilmiştir. B4 kiriş inin güçlendirilmiş olmasına rağmen yük taşıma kapasitesinin B2 kiriş inden düşük olmasının nedeni farklı korozyon derecelerinde aşınmış olmalarıdır. B3 ve B7 kiriş leri korozyona uğratılmamıştır. B3 kiriş i 25 cm uzunluğunda CFRP ile sargılanırken B7 kiriş i 50 cm uzunluğunda CFRP ile sargılanmıştır. CFRP plakası uzunluğunun artması yük taşıma kapasitesinde sadece %2,64 artış sağlamıştır. Ayrıca B1 kontrol numunesi ile kıyaslandığında süneklikte düşüş olduğu görülmüştür (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. B1-B3 ve B7 kirişleri yük-deformasyon eğrisi [12]

GFRP katmanının eklenmesi yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkiye sahip olmuştur (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. B1-B2-B5 ve B6 kirişleri yük-deformasyon eğrisi [12]

Sonuçlar incelendiğinde GFRP ile güçlendirmenin yük taşıma kapasitesi üzerinde etkin olduğu görülmekte ancak bir katman GFRP ile dayanımlardaki artış az miktarda olmaktadır. Çalışma sonucunda GFRP katman sayısının artırılması gerektiği önerilmektedir.

Elchalakami ve ark. [20] tarafından yapılan çalışmalar sonucunda ciddi şekilde aşınmış dairesel kesitli çelik boru profillerin CFRP ile onarımının olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan çalışmada %20-40-60 ve 80 oranlarında kütlece yapay korozyona uğratan boru profiller CFRP ile güçlendirilip 3 eksenli eğilme testine tabi tutulmuştur (Şekil 2.9.). İlk güçlendirme planında 12 adet boru profil  $L_c/D_n=1.0-3.0$  ( $L_c$ = korozyon uzunluğu,  $D_n$ = borunun nominal çapı) aralığında olup güçlendirmesi

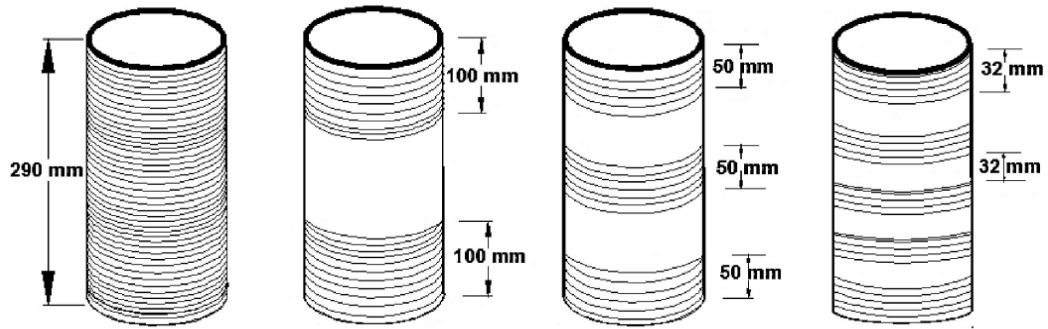
yapılmıştır. İkinci güçlendirme planında ise 4 boru profil tümünden bozunmuş halde olup güçlendirmesi yapılmıştır. İkinci planda  $L_c/D_n=8.0$  dir. Yapılan çalışmada profiller dış çap/et kalınlığı=20,32-93,6 aralığındadır. Güçlendirme sonrası eğilme testi sonuçlarına göre CFRP ile güçlendirmenin bileşik eğilme ve taşıma mukavemeti önemli ölçüde artmıştır. Güçlendirme serileri için sırasıyla yük taşıma kapasitelerindeki artış %97 ve %169 dur.



Şekil 2.9. CFRP ile güçlendirilmiş numunelerin eğilme testi [20]

Al-Mekhlafi ve ark. [42] paslanmaz çelik boruların CFRP kompozitlerle güçlendirilmesini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir.

CFRP ile güçlendirilen paslanmaz çelik boru profilleri aksel basınç yükü altında test edilmiştir. Deneyslerde iki tip boru profil kullanılmıştır. Dairesel kolon ölçüleri; 101x2mm ve 114x3,05mm dir. Burada ilk sayı dış boru çapı (D), ikinci sayı boru kalınlığı (ts) dir. Bu çalışmada üç farklı değişken dikkate alınmıştır (Tablo 2.7.). Bunlar; CFRP kalınlığı (tf), CFRP' nin borularda yerleşimi ve çap-kalınlık oranı (D/ts) dir. CFRP sargısı için üç farklı konfigürasyon kullanılmıştır (Şekil 2.10.). Boru profillerin eğilme burkulmasını önlemek için uzunlukları 290 mm olarak belirlenmiştir. Kullanılan tek yönlü karbon fiberin elastisite modülü 220 GPa, çekme mukavemeti ise 3000 MPa' dır. Aksel basınç testi 3000 kN kapasiteli bir cihaz ile 0,5 kN/s yükleme hızında yapılmıştır.



Şekil 2.10. CFRP sargı düzenlemeleri [42]

Tablo 2.7. Deney numuneleri ve test parametreleri [42]

Seri	Numune Adı	D (mm)	ts (mm)	D/ts	CFRP Katman Sayısı	tf (mm)	CFRP Konfigürasyon
S1	H0-37	114,3	3,05	37	0	0	Sargısız
	H1-37	114,3	3,05	37	1	0,29	Tam Sarma
	H2-37	114,3	3,05	37	2	0,58	Tam Sarma
	H3-37	114,3	3,05	37	3	0,87	Tam Sarma
S2	H0-50	101	2	50	0	0	Sargısız
	H1-50	101	2	50	1	0,29	Tam Sarma
	H2-50	101	2	50	2	0,58	Tam Sarma
	H3-50	101	2	50	3	0,87	Tam Sarma
S3	H2-50-P1	101	2	50	2	0,58	Kısmi Sarma-1
	H2-50-P2	101	2	50	2	0,58	Kısmi Sarma-2
	H2-50-P3	101	2	50	2	0,58	Kısmi Sarma-3

Deneysel basınç test sonuçları Tablo 2.8.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.8. Deneysel basınç dayanımları ve yer değiştirmeler[42]

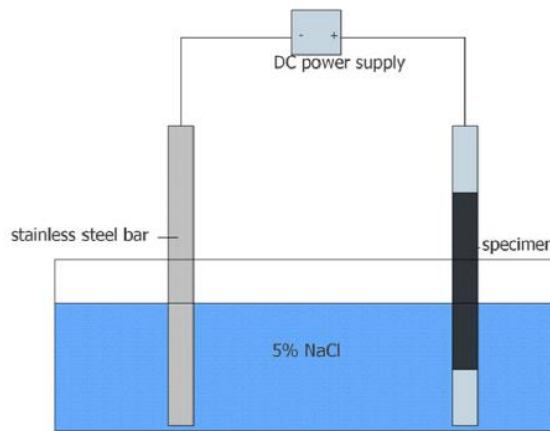
Seri	Numune Adı	Yer Değiştirme (mm)	P (kN)	Güçlendirme Oranı
S1	H0-37	7,8	384	1,00
	H1-37	9,8	473	1,23
	H2-37	10,8	501	1,30
	H3-37	11,4	531	1,38
S2	H0-50	2,5	237	1,00
	H1-50	6,1	305	1,29
	H2-50	7,7	324	1,36
	H3-50	5,9*	341	1,43
S3	H2-50-P1	2,5	249	1,05
	H2-50-P2	2,0	238	1,00
	H2-50-P3	2,5	235	0,99

\*Yük hücresindeki hata nedeniyle düşük sonuç vermiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde, kolon numunelerinin kısmi sargılanmasının mukavemet gelişiminde bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kısmi sargılanan numunelerde dışa doğru yerel burkulma hatası tespit edilmiştir. Tam CFRP sargı, nihai

dayanımda olumlu gelişim göstermiştir. Tam sargıda bir katmandan üç katmana kadar CFRP katman sayısının artması %29 ile %40 arasında mukavemet iyileştirmesi sağlamıştır.

Batuwitage ve ark. [43], çelik levhaları CFRP ile güçlendirerek hızlandırılmış korozyon koşullarına maruz bırakmıştır. Korozyonu hızlandırmak için elektrokimyasal yöntem kullanılmıştır. Doğru akım kaynağı kullanılarak 180 mA akım uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler anot olurken tankın içerisine yerleştirilen ve devre ile tamamlanan paslanmaz çelikler katot olmuştur. Okyanusta bulunan ortalama tuzluluk oranının üzerinde %5 NaCl çözeltisinde numuneler korozyona uğratılmıştır. Numuneler Faraday denklemi ile de hesaplanan sürelerde % 5, %10 ve %15 korozyona uğratılmıştır. Hızlandırılmış korozyon hücresi Şekil 2.11.'de şematik olarak gösterilmektedir. Şartlandırılan numuneler 1 mm/dk sabit yer değiştirme hızında 100 kN kapasiteli çekme cihazı ile çekme testine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numunelerde güçlendirme parametreleri olarak yüzey hazırlama yöntemi, astar uygulaması, CFRP katman sayısı ve maruziyet etkisi belirlenmiştir. Yüzey hazırlığı yöntemlerinden en etkilisinin kumlama olduğu görülmüştür. Astar tabakası uygulaması çift bantlı bağlantıların dayanıklılığını ve yük taşıma kapasitesini artırmaya yardımcı olmuştur. Hızlanan korozyon koşulları nedeniyle CFRP de zamanla bozulmalar meydana gelmiştir. Çok katmanlı CFRP sistemleri hızlandırılmış korozyon ortamında daha iyi dayanım göstermiştir.



Şekil 2.11. Hızlandırılmış korozyon test düzeni [43]

Karbhari ve ark. [44], CFRP sistemlerinin çeşitli çevre koşullarına maruz kaldığında bozulma yaşayacağını deneysel çalışmalarında göstermiştir. Dawood ve Rizkalla [45], CFRP çift kayış bağlantılarını altı ay kadar ağır çevre koşullarında şartlandırıp incelemiştir. Ara yüz bağlantılarının dayanıklılığı için silan esaslı birleştirme ajanı ve bir cam elyaf tabakası kullanmıştır.

Wei ve ark. [46], cam elyaf takviyeli ve bazalt elyaf takviyeli kompozitleri deniz suyu ortamında beklettiklerinde ilk 30 gün mekanik özelliklerde düşüşler kaydedildiğini ve sonrasında kompozitlerde ağırlık artışlarının olmadığını ayrıca mekanik özelliklerde de düşüşlerin azaldığını hatta kayıpların olmadığını belirtmiştir.

Fiber ve polimer bağlantılarının mekanik özellikleri elyafların ve matrislerinin arasındaki yapışma, aderans ve mekanik uyumluluklarının yanında elyafların yükleme yönü ve aralarındaki açı ile belirlenmektedir. Lifler ve matris arasında güçlü aderans sağlamak için mekanik parametrelerin birbirleriyle uyum içinde olmalıdır. Oluşturulan kompozitlerin lineer elastik deformasyon davranışı elyaf takviyeler ile belirlenir. Fiberlerin uzama sınırına henüz ulaşmadan matristeki mikro çatlakların oluşumunun engellenmesi için matrisin uzama deformasyonunun fiberin uzama deformasyonundan daha büyük olması gerekmektedir. Ayrıca basma kuvveti etkisinde fiberlerin bükülmesini önlemek için matrisin minimum bir değerde sertlikte olması gerekir [47]. Sabit yükleme yönü ile fiberlerin bu yönde karşılık gelen bir düzenlemesi ile en yüksek değer elde edilmiş olur. Yükleme yönünün değişmesi durumunda yarı izotropik davranışlı dokuma ve dokuma olmayan çok eksenli kumaşlar gibi yapılar kullanılmalıdır [33].

Alam ve ark. [48] çalışmalarında kullanım alanları giderek artan kompozit elemanlar üzerine araştırma yapmıştır. İçi beton doldurulmuş çelik tüp kolonları genellikle araç çarpmaları neticesinde hasar almaktadır. Hasar alan bu kolonları karbon fiber takviyeli polimer ile güçlendirerek çarpma anında karbon fiber takviyeli polimerin etkinliği araştırılmıştır. Deney bilgisayar ortamında simüle edilmiştir. Sonuç olarak dışarıdan güçlendirilen kolonların, güçlendirilmemiş kolonlara oranla darbe dayanımlarının arttığı görülmüştür.

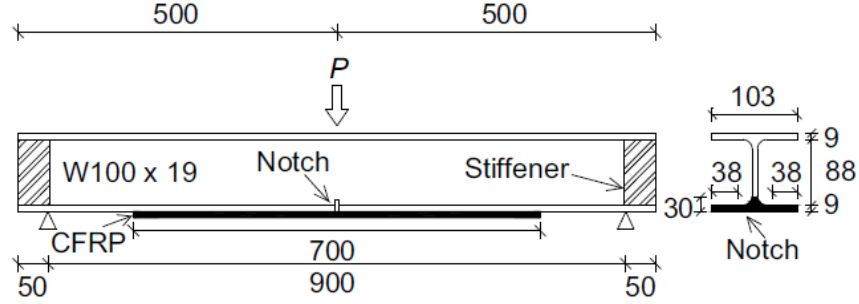
Fiber takviyeli polimer malzemeler ile yapılan güçlendirme çalışmalarında, elemanın rijitliğinin istenilen seviyelere çıkabilmesi tabaka sayısı ile doğru orantılıdır. Bu durumu maliyet açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Buna karşın son yıllarda yapılan çalışmalar, çelik yapıların güçlendirilmesinde Karbon fiber takviyeli polimer malzemenin kullanılmasıyla tabaka sayısının düşürülerek istenilen rijitliğe ulaşılabileceğini göstermiştir. İngiltere'deki Acton ve ABD'deki Ashland köprüleri, Karbon fiber takviyeli polimer malzemesi kullanılarak güçlendirilmiştir. Bu sayede köprü elemanlarındaki gerilmelerin azaldığı ayrıca yorulma ömrünün uzadığı görülmüştür [49]. Karbon fiber takviyeli polimer malzemelerinin diğerlerine göre daha büyük elastisite modülüne sahip olması sebebiyle güçlendirme işlemindeki aynı etki daha az katman sayısı ile elde edilebilmektedir.

Fiber kumaşlar ile yapılan güçlendirme çalışmalarında kritik durum, kompozit malzeme ile çelik yapı elemanı arasındaki yapışma yüzeyinde oluşabilecek ayrılmalardır. Karbon fiber takviyeli polimer kumaşlar genellikle epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yüzeye bağlanmaktadır. Çelik elemanın ve güçlendirme malzemesinin yüksek dayanımının yanında yapışma bölgesi oluşturulan sistemin en zayıf bölgesi olmaktadır.

Ergün yaptığı çalışmada [50], çelik malzeme ile güçlendirme için kullanılan kompozit malzeme arasındaki yapışma ara yüzeyinde meydana gelebilecek ayrılma hasarına çözüm önermiştir. Bu kapsamda karbon fiber takviyeli polimer kumaş ile çatlak uçlarını birleştirmek yerine öncelikle çatlağı mekanik özellikleri yüksek bir malzeme ile doldurup onardıktan sonra karbon fiber takviyeli polimer kumaşı ile kirişin alt başlığı boyunca belirli mesafe için uygulama yapmayı önermiştir. Bu sayede eleman içerisindeki süreksizlik giderilmiş olup kesitin tam çalışması sağlanmıştır. Kiriş ile kompozit arasındaki olası ayrılma engellenmiştir.

Fawzia ve ark. [51], CFRP ile güçlendirmede arayüz bağ davranışlarını tahmin etmek için sonlu elemanlar yöntemi ile bağ kayma modelleri geliştirmiştir.

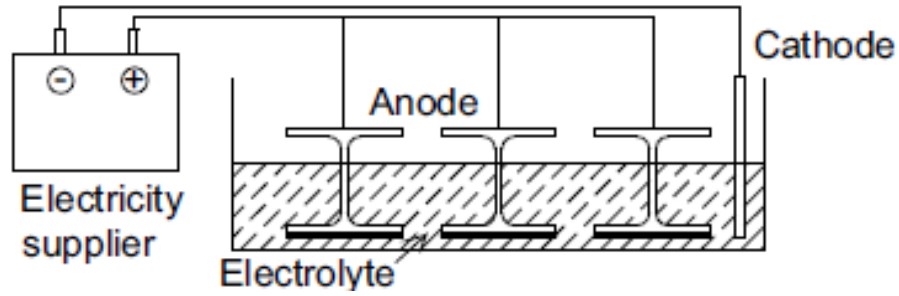
J.Kim ve Bumadian [52], CFRP levhalar ile güçlendirilmiş çelik kirişler için elektrokimyasal reaksiyonları incelemiştir. 21 adet W100x19 kirişinden 18 adet kiriş korozyona maruz bırakılmıştır (Şekil 2.12.). 1000 mm uzunluğundaki kirişlere yorulma çatlaklarını temsil etmesi amacıyla 30 mm lik çentik açılmıştır.



Şekil 2.12. Güçlendirilen kiriş detayı [52]

Korozyona uğratma işlemi elektrokimyasal reaksiyon hücresi ile için hızlandırılmış korozyon düzeneği kurulmuştur (Şekil 2.13.). Bu düzende anotlar korozyona uğraması istenen kirişler olurken, katotlar metal bir şerit seçilmiştir. Harici güç kaynağından 2A doğru akım ile %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde anot ve katotlar bağlanarak devre oluşturulmuştur. Elektrik üretildikten sonra anot kirişler elektron kaybederek korozyona uğramaya başlar. Korozyon miktarlarının belirlenmesi için kütle kaybı yöntemi kullanılmıştır. Elektrokimyasal teste tabi tutulmadan önce ve sonrasında numuneler tartılarak kütle kaybı belirlenmiştir. Faraday denklemi kullanılarak hesaplar yapılmıştır. CFRP levhalar ile güçlendirilen kirişler hızlandırılmış korozyon etkisine maruz bırakılmıştır. Elektrik potansiyeli, kütle kaybı, korozyon akımı yoğunluğu, korozyon hızı, eğilme kapasitesi, ara yüzey gerinim gelişimi, arıza mod ve kirişlerin kızılötesi spektroskopileri konularında incelemeler yapılmıştır. Elektrokimyasal etki süresi ile korozyon hasarı artar; bununla birlikte CFRP de erken bağ çözme kusuru gözlenmemiştir. Korozyon hasarı sonucunda yük taşıma kapasitesinde azalma görülür. Kızılötesi spektroskopi, CFRP sisteminin fonksiyonel grubunun korozyon artışının derecesi ile değişir. Korozyon hasarına maruz kalan çelik elemanlar için CFRP güçlendirmesi önerilmiştir.





Şekil 2.13. Hızlandırılmış korozyon hücresi düzeneği [52]

Yapılan çalışmada eğilme dayanımı sonuçları Tablo 2.9.'da gösterilmektedir. Kiriş numuneleri 1 mm/dk yükleme hızıyla eğilme testine tabi tutulmuştur.

Tablo 2.9. Eğilme dayanımı sonuçları [52]

Kiriş Numunesi	Maruziyet Süresi (Saat)	Kütle Kaybı (kg)	Nihai Yük (kN)
BCR0	0	0	62,9
BCR12	12	0,03	58,7
BCR24	24	0,15	54,0
BCR36	36	0,42	48,3
BCR48	48	0,46	46,8
BCR60	60	0,48	45,6
BCR72	72	1,17	43,0

Bastani ve ark. [53] tarafından yapılan çalışma CFRP kumaş kullanılarak güçlendirilmiş hasarlı çelik I kirişlerin yapısal davranışlarının incelenmesini kapsamaktadır. Güçlendirme işlemi ıslak yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Kirişlerde hasarlar, profilin alt flanşı incelti olarak simüle edilmiştir. Her bir kiriş numunesi 2000 mm uzunlukta ve mesnet açıklığı 1500 mm olarak belirlenmiştir. Dört noktalı eğilme testi ile sekiz adet kiriş incelenmiştir (Şekil 2.14.). Güçlendirilen çelik kirişlerin yapısal davranışı sonlu elemanlar yazılımı ve çıktıları ile laboratuvar numuneleri sonuçları arasında uyumlu korelasyonlar elde edilmiştir (Şekil 2.15.). İnce cidarlı çelik I kirişlerden beş adeti hasarlı olup CFRP ile güçlendirilmiştir. Diğer üç adet kirişten bir tanesi hasarsız, iki tanesi hasarlıdır. Test parametreleri Tablo 2.11.'de gösterilmektedir. Numune boyu yanal burkulmayı önleyecek şekilde belirlenmiştir. W150x24 kirişi seçilip ASTM E8/ E8M-15a [54]' a göre tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. Çıkan sonuçlar Tablo 2.10.'da gösterilmektedir. Tek yönlü CFRP kumaş kullanılarak epoksi reçine yardımıyla güçlendirme yapılmıştır. CFRP kompozit kumaşın özellikleri ASTM standardına göre kupon testleri ile kontrol edilmiştir. Nihai

dayanım sonuçları CFRP kompozit kumaşın esnekliğinin ve bozulma geriliminin olumlu olduğunu göstermektedir.

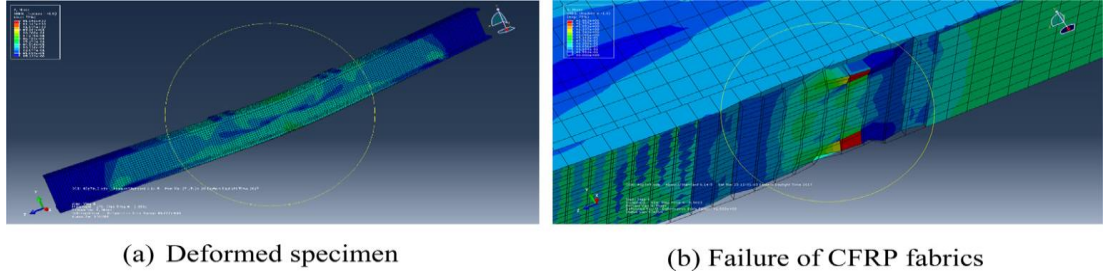
Tablo 2.10. Çelik kirişin mekanik özellikleri [53]

Kiriş Numunesi	Ortalama Akma Dayanımı- Fy (MPa)	Ortalama Kopma Dayanımı- Fu (MPa)	Ortalama Yerdeğiştirme (%)	Ortalama Yerdeğiştirme (%)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
	379	484	0,2	35	205	0,3



Şekil 2.14. CFRP ile güçlendirilmiş profillerin eğilme testi sonrası [53]

Kiriş numuneleri güçlendirme işleminin öncesinde kumlanmıştır. Kirişlerin alt flanşlarında 100 mm uzunluğunda 102 mm genişliğinde bir alan işlenerek inceltirilmiştir. İki farklı derinlik seviyesinde inceltme işlemi uygulanmıştır. Kiriş alt flanş kalınlığı 10,2 mm dir. Bu derinliğin % 20'si ve % 40'ı oranlarında inceltme işlemi yapılmıştır. Güçlendirme işlemi için çelik alt tabaka üzerine epoksi astar (yapışmasız bir alt tabaka elde etmek amacıyla) uygulanmıştır. Bir gün kürde bırakılıp ardından kuru karbon kumaşlar uygun uzunluklarda kesilmiştir. Epoksi reçine yardımıyla hasarlı çelik kirişin alt flanşına ıslak yatırma yöntemi ile döşenmiştir. Sıyrılmayı önlemek için iki çapraz sarma uygulanmıştır. İki çapraz sargılı kumaş arasında 20 mm'lik bir boşluğa izin verilmiştir. Güçlendirilmiş kiriş numuneleri herhangi bir yüklemmeden önce yedi gün boyunca sertleşip kürünü almaya bırakılmıştır.



Şekil 2.15. Deforme olmuş kiriş numunelerinin sonlu elemanlar modeli [53]

Tablo 2.11. CFRP ile güçlendirme test parametreleri [53]

Kiriş Numunesi	Numune Tipi	Hasar Yüzdesi (%)	CFRP Katman Sayısı	CFRP Kumaşların Toplam Kalınlığı (mm)*
CV-00	Kontrol Numunesi-Hasarsız	0	0	0
CD-20	Kontrol Numunesi-Hasarlı	20	0	0
CD-40	Kontrol Numunesi-Hasarlı	40	0	0
RB-20-2L	Güçlendirilmiş Hasarlı Numune	20	2	0,52
RB-20-4L	Güçlendirilmiş Hasarlı Numune	20	4	1,04
RB-40-3L	Güçlendirilmiş Hasarlı Numune	40	3	0,78
RB-40-5L	Güçlendirilmiş Hasarlı Numune	40	5	1,30
RB-40-7L	Güçlendirilmiş Hasarlı Numune	40	7	1,82

\*Bir kat CFRP kumaşın kalınlığı 0,26 mm'dir.

Tablo 2.12.'de numunelere ait sonuçlar gösterilmektedir. Tablo 2.13.'de deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yöntemi sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.12. Test numunelerinin yük kapasiteleri ve elastik sertliğinin karşılaştırılması [53]

Kiriş Numunesi	Akma Yüğü (kN)	Kopma Yüğü (kN)	Sertlik (kN/mm)
CV-00	273	325	35,4
CD-20	255	312	34,0
CD-40	223	286	31,5
RB-20-2L	270	321	35,5
RB-20-4L	281	336	35,8
RB-40-3L	240	298	34,1
RB-40-5L	251	317	35,6
RB-40-7L	275	339	35,9

Yük taşıma kapasitesinde iyileştirme, güçlendirilmiş bir kirişin elastik sertliği ve sünekliği kontrol hasarlı kiriş numunesi için önemli göstergelerdendir. Elastik sertlik

yük-sehim eğrisinin ilk doğrusal kısmından belirlenir. Bir kiriş nihai yük kapasitesi kadar ancak yük taşıyabilir. Yapılan çalışmada sonuçlar incelendiğinde, %20 hasarlı kiriş güçlendirmesinde iki kat CFRP kumaş yetersiz kaldığı görülmektedir. Dört katlı CFRP kumaş ile sargı, hasarsız kontrol numunesinden daha yüksek kapasite elde etmiştir. %40 hasarlı kirişler için yedi kat CFRP kumaş kalınlığı gerekmektedir. Ancak beş katmanda elastik sertlik için başarılı bir güçlendirme olabileceğini göstermektedir. Güçlendirilmiş çelik kirişlerin sünekliği iki yöntem kullanılarak hesaplanıp karşılaştırılmıştır.

Hasarsız kontrol numunesi ve iki farklı hasar seviyesindeki kontrol kirişleri, güçlendirilmiş kirişlere göre daha fazla yerdeğiştirme göstermiştir. CFRP katman sayısı artıkça her iki süneklik indeksinde artmıştır.

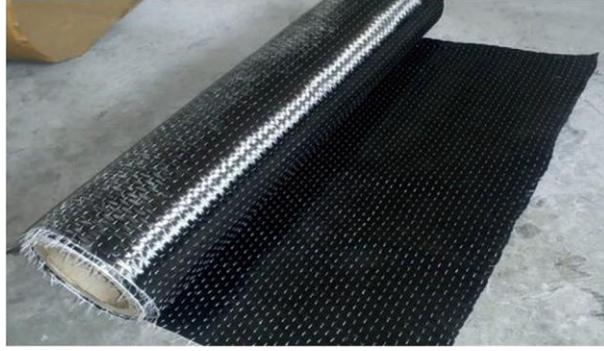
Tablo 2.13. Test numunelerinin yük kapasiteleri ve elastik sertliğinin karşılaştırılması [53]

Kiriş Numunesi	Sonlu Elemanlar Akma Yüğü (kN)	Deney sel Akma Yüğü (kN)	% Hata	Sonlu Elemanlar Kopma Yüğü (kN)	Deney sel Kopma Yüğü (kN)	% Hata	Sonlu Elemanlar Sertlik (kN/mm)	Deney sel Sertlik (kN/mm)	% Hata
CV-00	282	273	3,2	326	325	0,3	35,6	35,4	0,5
CD-20	263	255	3,1	315	312	0,9	34,2	34,0	0,5
CD-40	232	223	4,0	294	286	2,8	32,0	31,5	1,6
RB-20-2L	276	270	2,2	325	321	1,2	35,6	35,5	0,3
RB-20-4L	284	281	1,1	350	336	4,2	36,0	35,8	0,6
RB-40-3L	245	240	2,1	300	298	0,7	34,5	34,1	1,2
RB-40-5L	255	251	1,6	325	317	2,5	37,9	37,2	1,9
RB-40-7L	279	275	1,5	355	339	4,7	40,0	39,1	2,3

Bu çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeli, CFRP kumaşlarında meydana gelen yırtılma ve güçlendirilmiş kirilerin kopma davranışlarını yansıtmada başarılı olmuştur. Doğrulan sonlu elemanlar modeli ile çeşitli kusur seviyeleri için gerekli sayıda CFRP katman sayısı tahmin edilebildi.

Jagtap ve Pore [55], tamamen korozyona uğramış çelik I kirişin CFRP kumaşlarla güçlendirilmesi konusunda çalışma yapmıştır (Şekil 2.17.). Bir metrelik iki numune kirişi iki kat CFRP kumaş ile güçlendirilip deneyler yapılmıştır. Güçlendirme çalışmasında kullanılan CFRP tek yönlü dokuma kumaştır ve 0,43 mm kalınlığa sahiptir (Şekil 2.16.). Kullanılan CFRP kumaşa ait bilgiler Tablo 2.14.'de verilmektedir. Çelik kiriş ile CFRP kumaşı birleştirmek için kullanılan Hinpox C-

Resin ve Hinpoxxy C- Hardener çift bileşenli yapıştırıcıdır. Korozyona uğramış I profilin modeli ANSYS yazılımında ortalama kesit kalınlıklarına göre geliştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar sonuçları ve deneysel sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar taşıma gücü kapasitesinin CFRP kumaşlar kullanılarak artırılacağı yönünde olmuştur.



Şekil 2.16. Güçlendirme çalışmasında kullanılan CFRP kumaş [55]

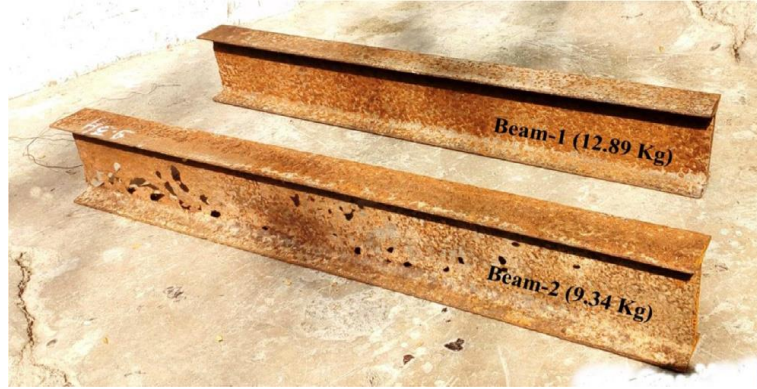
Tablo 2.14. CFRP kumaş özellikleri [55]

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Ağırlık (g/m <sup>2</sup> )	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Çekme Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	Filament Çapı (mikron)	Uzama (%)
1800	400	0,43	500	4000	240000	7	1,7

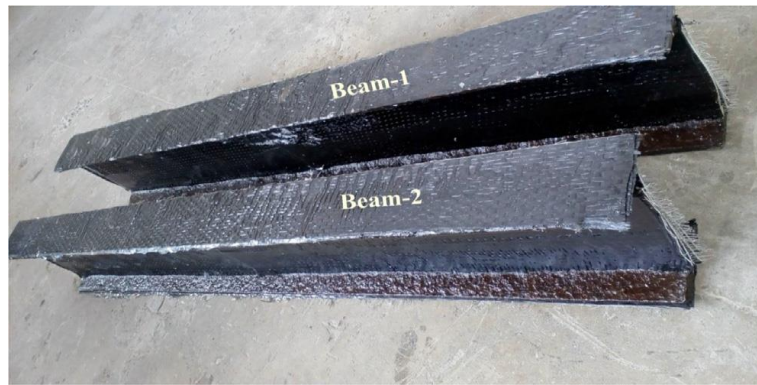
Korozyona uğramış kiriş numunelerine ait özellikler Tablo 2.15.'de gösterilmektedir. Bu kirişlerin tüm kesitleri CFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. CFRP uygulaması için yüzeyin temiz ve pürüzsüz olması önemlidir [55]. Kum püskürtme etkili bir yüzey hazırlama tekniğidir [56]. Yüzey hazırlığından sonra güçlendirilen kirişlere ait görsel Şekil 2.18.'de gösterilmektedir.

Tablo 2.15. Korozyona uğramış çelik I kirişlerin özellikleri [55]

	1.Kiriş	2.Kiriş
Ağırlık (g/m <sup>2</sup> )	12,89	9,34
Uzunluk (mm)	1000	1000
Yükseklik (mm)	149	147
Flanş Genişliği (mm)	74	73
Ortalama Flanş Kalınlığı (mm)	6,3	5,5
Ortalama Web Kalınlığı (mm)	5,2	2,85
Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	200000	200000
Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	250	250

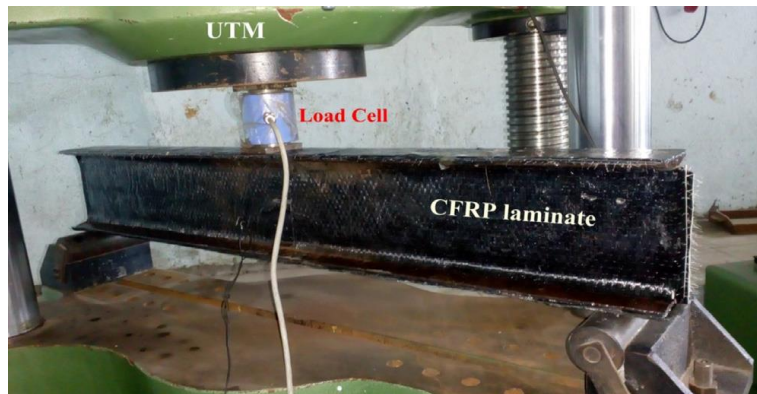


Şekil 2.17. Korozyona uğramış çelik kirişler [55]



Şekil 2.18. CFRP ile güçlendirilen çelik I kirişler [55]

Güçlendirme işleminden 48 saat sonra numuneler üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Maksimum 200 kN kapasiteli bir yük hücresi üzerinden yük uygulanmıştır (Şekil 2.19.).



Şekil 2.19. Korozyona uğramış kirişin üç noktalı eğilme test düzeneği [55]



Tablo 2.16. İki kiriş için analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması [55]

Özellikler	ANSYS ile Analitik Sonuçlar					Deneysel Sonuçlar	
	Yeni Kiriş	Korozyona Uğramış Kiriş-1/ CFRP'siz	Korozyona Uğramış Kiriş-1/ CFRP'li	Korozyona Uğramış Kiriş-2/ CFRP'siz	Korozyona Uğramış Kiriş-2/ CFRP'li	Korozyona Uğramış Kiriş-1/ CFRP'li	Korozyona Uğramış Kiriş-2/ CFRP'li
Ağırlık (Kg)	13,42	12,89	13,65	9,34	10,1	14,51	11,06
Taşıma Gücü (kN)	104,8	92,5	175,8	27,09	79	175	70,4
Akma Yüğü (kN)	21,8	20,4	33,7	14,4	27,2	-	-
Sapma (mm)	2,46	2,29	2,98	0,97	1,73	7,1	5,4

Tablo 2.16.'da analitik ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasını göstermektedir. Korozyona uğramamış yeni kiriş sonuçlarımızda analitik olarak görebiliriz. Deney için kullanılan kirişlerin ağırlığı CFRP ve yapıştırıcı eklendiği için fazla olmaktadır.

Tablo 2.17. Korozyonun iki kiriş üzerindeki etkisinin karşılaştırılması [55]

Özellikler	Yeni Kiriş	Korozyona Uğramış Kiriş-1	Yeni Kiriş ile Kiriş-1 % Değişim	Yeni Kiriş	Korozyona Uğramış Kiriş-2	Yeni Kiriş ile Kiriş-2 % Değişim
Ağırlık (Kg)	13,42	12,89	-3,94	13,42	9,34	-30,40
Taşıma Gücü (kN)	104,8	92,50	-11,73	104,8	27,09	-74,15
Akma Yüğü (kN)	21,8	20,4	-6,42	21,8	14,4	-33,94

Tablo 2.17.'de korozyon etkisinin analitik sonuçlarla Kiriş-1 ve Kiriş-2 için hasarsız yeni kiriş ile kıyaslaması yapılmıştır.

Tablo 2.18. CFRP güçlendirmesinin korozyona uğramış kiriş üzerindeki etkisinin karşılaştırılması [55]

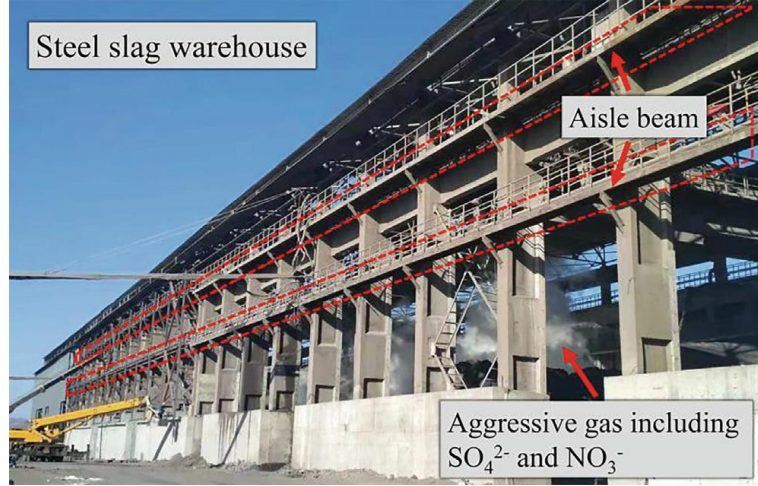
Özellikler	Korozyona Uğramış Kiriş-1			Korozyona Uğramış Kiriş-2		
	CFRP'siz	CFRP'li	% Değişim	CFRP'siz	CFRP'li	% Değişim
Ağırlık (Kg)	12,89	13,65	5,89	9,34	10,1	8,13
Taşıma Gücü (kN)	92,5	175,8	90,05	27,09	79	162,08
Akma Yüğü (kN)	20,4	33,7	65,19	14,4	27,2	88,88

Tablo 2.18.'de korozyona uğramış kirişlere CFRP güçlendirmesinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. CFRP ile güçlendirme Kiriş-1 in taşıma kapasitesini %90 artırmıştır. Akma kapasitesini ise %65,19 artırmıştır. Benzer şekilde Kiriş-2 için güçlendirme etkisi ile taşıma kapasitesi %162,08 artarken akma kapasitesi %88,88 artmıştır.

Çelik yapılar ömürleri boyunca yük taşıma kapasitelerinden kaybederler. Bu kayıplar yaşa ve çevresel koşullara bağlıdır. Korozyon, mukavemetin kaybedilmesinin ana nedenidir. Gerekli önlemler alınarak yapı korunmalıdır. Pek çok yöntem kullanılmakla beraber CFRP ile güçlendirme mukavemet açısından en iyi sonuçları vermektedir. Yapılan çalışmada güçlendirilmemiş durumda Kiriş-2'nin ağırlığının Kiriş-1'den %27 daha az olduğu görülmektedir. Kiriş-2, CFRP ile güçlendirildiğinde, güçlendirilmemiş kirişe kıyasla yük taşıma kapasitesinde %162 artış olmuştur. Kiriş-1, CFRP ile güçlendirildiğinde, güçlendirilmemiş kirişe kıyasla yük taşıma kapasitesinde %90 artış olmuştur. Ayrıca her iki kirişin akma yük kapasitesinde artış olmuştur. Analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında çok küçük farklılıklar mevcuttur.

Li ve ark. [57] CFRP ve çelik arasındaki bağlanma davranışına korozyon etkilerini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Çeliğin korozyon haritası, temassız 3 boyutlu tarama teknolojisi kullanılarak elde edilmiştir. Korozyon çukur yoğunluğu (Pd), çukur genişliği bir daldırma simülasyonu kullanılarak elde edilmiştir.  $F_u$ , kesme mukavemeti ( $T_{max}$ ) ve kırılma enerjisi (G) kesme test sonuçlarıyla elde edilip korozyon parametreleri ile ilişkileri kurulmuştur. Yapılan çalışmada üç temel malzeme kullanılmıştır: yapıştırıcı, korozyona uğramış çelik ve CFRP levha. Çift komponentli epoksi reçine yapıştırıcısı Sika 30 CN ürünü kullanılmıştır. Korozyona uğramış çelik erozyona 10 yıldan fazla maruz kalmış kirişten alınmıştır (Şekil 2.20.). Korozyona uğramamış numuneler ile karşılaştırma yapmak amacıyla 80 mm x 280 mm boyutlarında 11 parçaya bölünmüştür. CFRP levhalar genişliği 30 mm, tek yönlü plakalar olarak seçilmiştir. Yapıştırıcının, CFRP levhaların ve korozyona uğramış çelik levhaların mekanik özelliklerini incelemek amacıyla çekme testi uygulanmıştır (Tablo 2.19.).



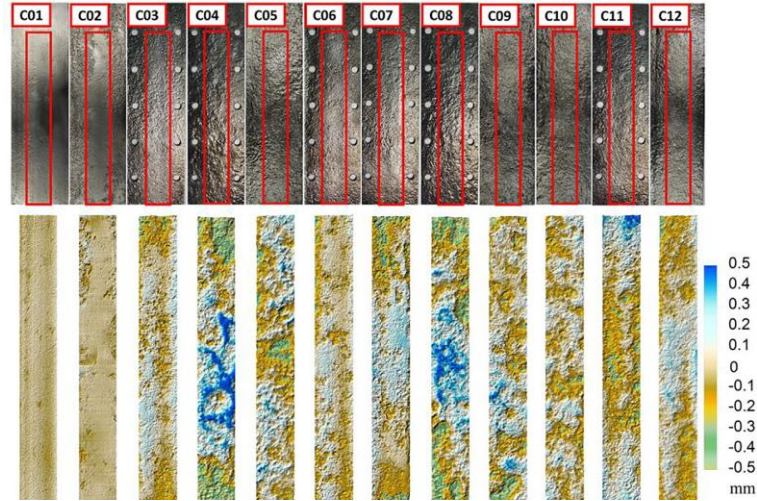


Şekil 2.20. Korozyona uğramış çelik kaynağı [57]

Tablo 2.19. Materyallerin mekanik özellikleri [57]

	Yapıştırıcı	Çelik	CFRP
Elastisite Modülü (GPa)	4,62	141,83	205,54
Çekme Dayanımı (MPa)	42,08	375,11	2656,67
Akma Dayanımı (MPa)	-	265,69	-

Korozyon yüzeylerde üniform ve üniform olmayan şekilde oluşabilir. Çalışmada kullanılan çelikler 3 boyutlu tarama ile görüntülenip değerlendirilmiştir. 0,01 mm çözünürlükte ve 0,1 mm ölçüm noktaları aralığında tarama yapılmıştır (Şekil 2.21.).



Şekil 2.21. Korozyona uğramış çelik levhaların yüzey işleme ve topografi taraması sonuçları [57]

Tablo 2.20. CFRP ve korozyona uğramış çelik arasındaki bağlanma davranışı [57]

Numune	Fu (kN)	Le (mm)*	Tmax (MPa)	G (N/m)
SC01	48,524	117	25,951	4,483
SC02	46,517	139	27,958	4,366
SC03	44,605	130	25,928	3,868
SC04	41,906	130	25,078	3,477
SC05	49,819	117	22,389	4,785
SC06	48,711	135	24,251	4,886
SC07	42,161	110	22,715	3,369
SC08	44,406	136	21,520	3,765
SC09	44,400	86	31,269	3,150
SC10	48,020	123	25,066	4,575
SC11	38,724	127	21,613	2,964
SC12	48,668	108	26,219	4,882

\*CFRP ve çelik arasındaki bağlantı uzunluğu (mm)

Tablo 2.20.'de CFRP ve korozyona uğramış çelik arasındaki bağlanma davranış verileri gösterilmektedir. CFRP/çelik tek bindirmeli numuneler için yüklü uçta kayma hatası olurken serbest ucun yakınındaki hata ise kesme gerilmesi ve sıyrılmaya etkisi hatası oluşturmuştur. CFRP/çelik tek bindirmeli numunelerin nihai yükü olan  $F_u$  önce artış göstermiştir ve sonra çukur yoğunluğu  $P_d$  stabilize edilen numunede hafifçe arttı ardından ortalama olarak çukur derinliği, çukur genişliği arttıkça azalış göstermiştir. Daha büyük çukur yoğunluğuna ve daha küçük bir çukur boyutuna sahip numuneler daha yüksek kesme mukavemetine sahip olmaktadır.  $F_u$  benzer bir şekilde, önce kırılma enerjisi artış gösterdi ve daha sonra çukur yoğunluğu değişiklik göstermediğinde hafif artış yaptı ardından bağımsız değişkenler olan ortalama çukur derinliği ve çukur genişliği arttığında azalış göstermiştir.

Photiou ve ark. [18] yapay olarak bozulmuş çelik kirişin karbon/cam kompozit sistemiyle güçlendirilmesini incelemiştir. Hasarlı veya standart altı çelik yapıları güçlendirmek için hafif, yüksek mukavemet ve korozyon direncine sahip FRP kompozitler önerilmektedir. Bir çelik kirişin eğilme yükü taşıma kapasitesi, CFRP kompozitlerinin gerilim flanşlarına yapıştırılmasıyla önemli ölçüde artırılmıştır. Bu çalışmada, dikdörtgen kesitli yapay olarak bozulmuş çelik kirişin ultra yüksek modüllü (UHM-CFRP) ve yüksek modüllü CFRP (HM-CFRP) levhalar ile güçlendirilmesinin etkinliği dört noktalı eğilme testi ile değerlendirilmiştir. UHM-CFRP kompozitleri ile kompozit malzemenin sertliği önemli ölçüde çelikten daha yüksek olmakta ancak nihai gerilme değeri de dikkate alınmalıdır. Çalışmada dört adet çelik kiriş kullanılmıştır. Deformasyonu simüle etmek için 1800 mm uzunluğundaki kirişlerin alt flanşlarından

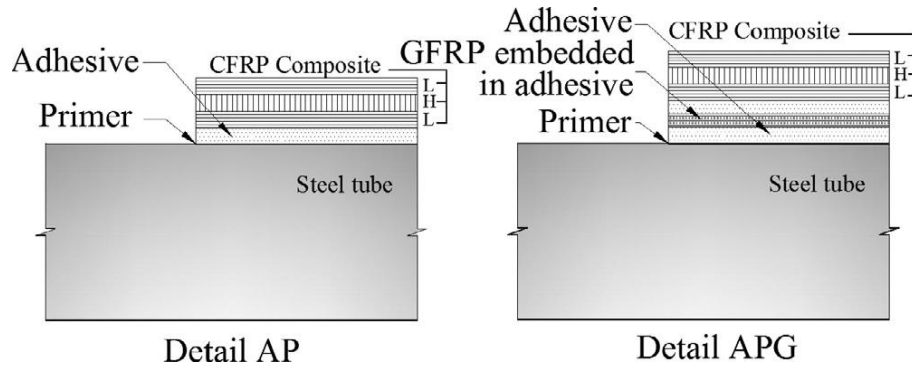
2,5 mm kalınlıkta işlenerek azaltma yapılmıştır. Dört adet kirişten yarısı UHM-CFRP ile güçlendirilirken (U ve düz geometride) diğer yarısı HM-CFRP ile güçlendirilmiştir.

Karbon lifi ile çelik malzeme arasında galvanik etkileşim olabilmektedir. Karbon fiber kompozit ile çeliğin teması halinde çelik yüzeyinde korozyon oluşabilir [13]. Bu sorunu önlemek amacıyla GFRP kompozit tabakası doğrudan teması önlemek için metal ve CFRP arasına yerleştirilmesi çalışılmıştır. Ek olarak, GFRP kompozitleri yapıştırıcı ile birleştirmeyi iyileştirir ve CFRP nin ilk katmanı daha iyi uyum sağlar. Bu sayede daha yüksek kırılma mukavemeti elde edilir. Bunun nedeni, kesme gerilmesinde daha kademeli bir değişikliğin olmasıdır. Yük CFRP kompozitine aktarılırken çelikten yapıştırıcı ve GFRP katmanları öncelikli olarak zarar görür [14].

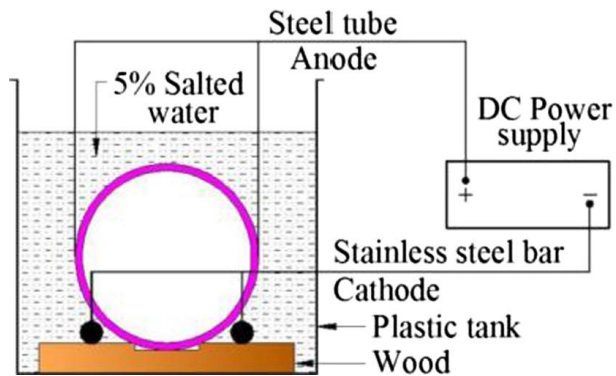
UHM-CFRP ile güçlendirilen kirişler HM-CFRP ile güçlendirilen kirişlere göre daha az sünek davranış göstermiştir. HM-CFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasiteleri %10 daha yüksek olmuştur. U şekilli güçlendirme düz güçlendirmeye göre bağ çözme başarısı bakımından avantaj sağlamıştır.

Kabir ve ark. [58] deniz suyu etkisine maruz kalan CFRP ile güçlendirilmiş çelik dairesel içi boş kesit elemanının dayanıklılığını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Yapılan araştırmalar karbon ve çelik arasındaki GFRP kumaş tabakasının çelik yüzeyde izole epoksi film ve nem bariyeri oluşturarak galvanik korozyondan koruyucu olduğunu göstermektedir. Deneysel çalışmada GFRP alt katmanı üzerine CFRP ile güçlendirilen çelik numuneleri hızlandırılmış korozyon düzeneği ile %10 kütlece korozyona uğratılmıştır. Ardından dört noktalı eğilme testi ile güçlendirmenin dayanıklılığa etkisi incelenmiştir. Güçlendirmede BASF marka CF130 tipi tek yönlü CFRP kullanılmıştır. Kullanılan CFRP 0,176 mm nominal kalınlığa sahiptir. BASF marka MBrance Saturant çift komponentli epoksi ürünü yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Deneylerde 101,6 mm dış çaplı dairesel kesitli boruların et kalınlıkları 4 mm dir. Toplam on dört özdeş çelik boru profili hazırlanmıştır. Her bir profilin uzunluğu 1300 mm olup eğilme testi için açıklık 1200 mm kabul edilmiştir. Güçlendirme şemaları, iki farklı bağ konfigürasyonundan oluşmaktadır (Şekil 2.22.). AP detayında tek yönlü GFRP kumaş galvanik korozyon bariyeri olarak kullanılmıştır.

Güçlendirme işlemlerinden önce temizlik ve yüzey aderansını artırmak amacıyla boru profil yüzeyi 0,425 mm kum ile kumlanmıştır. AP ve APG detaylı numunelerin güçlendirilmesinde CFRP levha, boru uzunluğunca birinci katman olarak sarıldıktan sonra ikinci katman çember yönünde sarılmıştır. Üçüncü katman tekrar profil boyunca sarılarak güçlendirilmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra hızlandırılmış korozyon düzeneği 2,0 A'lık doğru akım ile %5 NaCl ortamında kurulmuştur. Çelik numuneler anot bölgesi olurken paslanmaz çelik çubuklar katot bölgesi olmuştur (Şekil 2.23.). AP ve APG detaylı numuneler %10 kütlece korozyona 25 günde ulaşmıştır. Kirişler hızlandırılmış korozyon süresinin ardından 230 kN kontrollü yük altında dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Tablo 2.21.'de test edilen kirişlerin deneysel sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 2.22. CFRP güçlendirme şemaları [58]



Şekil 2.23. Hızlandırılmış korozyon düzeneği [58]

Tablo 2.21. Eğilme testi sonuçları [58]

Numune	Numune Sayısı	Sargı Detayı	Maruz Kalma Durumu	Maruziyet Süresi	Nihai Yük (kN)
B2	2	AP	Ortam Sıcaklığı	n/a	76,75
		APG			78,40
S5B-1	2	AP			101,70
		APG			102,00
S3A-1	2	AP			104,90
		APG			106,70
S2B-2	2	AP	Hızlandırılmış	25 gün	75,85
		APG	Korozyon		80,50
S3B-3	2	AP	Ortamındaki		95,30
		APG	Ortam Sıcaklığı		86,30
S2B-1	2	AP	Hızlandırılmış	25 gün	73,55
		APG	Korozyon 50°C		71,00
S3B-2	2	AP	Ortam Sıcaklığı		85,40
		APG			83,00

Hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak CFRP ile güçlendirilmiş çelik yapıların tam tasarım ömrü için dayanıklılığa etkisi araştırılmıştır. Faraday yasası kullanılarak kütle kaybı belirlenmiştir. GFRP ile kaplı veya gömülü GFRP'siz kirişlerde 50°C de %10 kütle kaybında önemli mukavemet düşüşleri gözlemlenmiştir. Her iki sıcaklıkta şartlandırılmış kirişler plastik bölgede kontrol kirişine göre önemli bir sertlik düşüşü göstermiştir. CFRP ile güçlendirilmiş elemanlar için tasarım nihai yükünü hesaplamak için tuzlu su ortamında çelik boru şeklindeki elemanlar, dayanıklılık tasarım faktörü değerini 0,70 olarak önermişlerdir.

## 2.2. Yapı Malzemesi Olarak Çelik

Demir diğer elementlerle tepkimeye girmesi kolay bir metaldir. Doğada bileşik halinde yaygın olarak demir ile karşılaşabiliriz. Ham demirin üretiminin başlamasından sonra yapı malzemesi olarak çelik, köprülerde kullanılmaya başlanmıştır. 1875 yılından itibaren dövme çelik ve dökme çelik sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Çekme mukavemetinin yüksek olduğu dövme ve dökme çelik ile daha büyük köprüler inşa edilmiştir. Köprü inşasında kullanılan çelik daha sonra sanayi tesisleri, depolar, enerji üretim tesisleri vb. alanlarda kullanılmıştır [59].

Saf demirin fiziksel ve kimyasal özellikleri sebebiyle yapı malzemesi olarak kullanılması mümkün olmamaktadır. Yapıda içerisinde karbon, silisyum, krom, magnezyum, bakır, nikel ve molibden vb. elementleri bulunduran demir alaşımları

kullanılır. Mekanik olarak işlenebilen demir alaşımlarına çelik denir. Çeliğin mekanik özelliklerini belirleyici parametre içeriğindeki karbon miktarıdır. Çelik içindeki karbon miktarı arttıkça çeliğin mukavemeti ve sertliği artmaktadır. Fakat sertlik arttıkça süneklik azalmaktadır. Çelik cinsleri içindeki karbon miktarına göre sınıflandırılmaktadır.

- Orta karbonlu çelikler; %0,3-%0,5 oranında karbon içerir.
- Yüksek karbonlu çelikler; %0,55-%0,95 oranında karbon içerir.
- Özel çelikler; Nikel, mangan, silisyum, tungsten, krom gibi maddeler eklenerek birtakım özellikler kazandırılan çeliklerdir [60].

Ham demir iç yapısı itibari ile karbon, fosfor ve silisyum içermektedir. Ham demirin işlenebilmesi için ısıl işlem uygulanmaktadır. Isıl işlem kireç ilavesi ile gerçekleşir ve oluşan bazik cüruf ile bağ oluşumu sağlanır. Isıl işlemlerin tamamlanmasından sonra haddeleme aşaması başlamaktadır. Çelik haddeleme işlemi ile istenilen şekilde ve kimyasal özelliklerde üretimi sağlanmış olur. Şekil 2.24.'de çelik üretim prosesi görülmektedir [61].

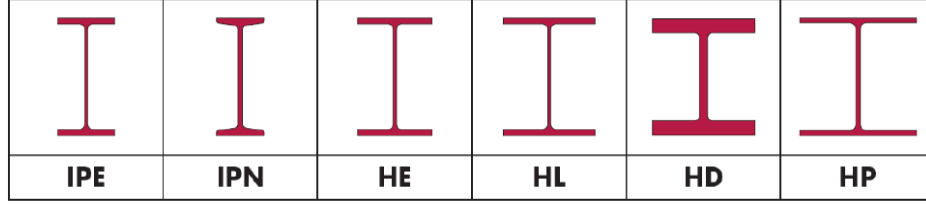


Şekil 2.24. Çelik üretim prosesi [62]

Çelik hadde ürünlerin, tasarlanan malzemelerin şekilleri kesit etkilerini ekonomik biçimde aktaracak standart boyutlarda imal edilmesi amaçlanmaktadır. Tesislerde gerçekleştirilen standart boyutlama işlemlerine “haddeleme”, boyutlandırılmış çelik

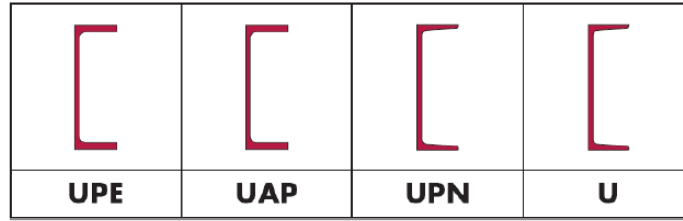
malzemeye “hadde ürünleri” denir [63]. Şekil 2.25., 2.26., 2.27., 2.28. ve 2.9.’da bazı çelik hadde ürünlerinden örnekler gösterilmiştir [64].

I Profiller; h yüksekliği 80-600 mm, başlıklarının eğimi normal I profillerde % 14’e eşittir.



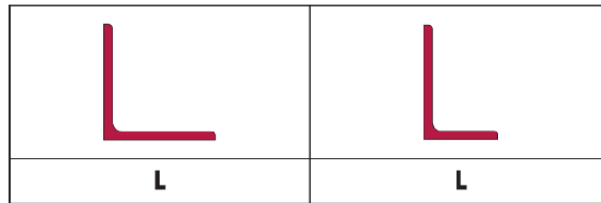
Şekil 2.25. I Profilleri [64].

U Profiller; h yüksekliği 30-400 mm, başlık genişliği 33-110 mm, gövde kalınlığı 50-140 mm ve başlıklarının eğimi % 5-8 arasında değişir.



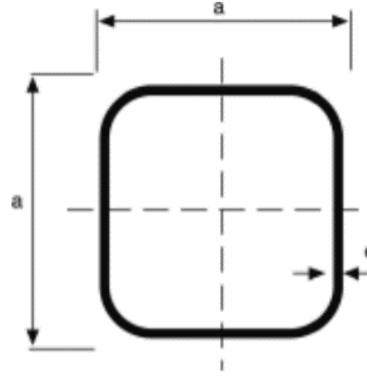
Şekil 2.26. U Profilleri [64]

L Profiller; Köşebent veya korniyer profilleridir. Kesit boyutları 20x30x3 mm ile 100x200x16 mm arasında değişir.



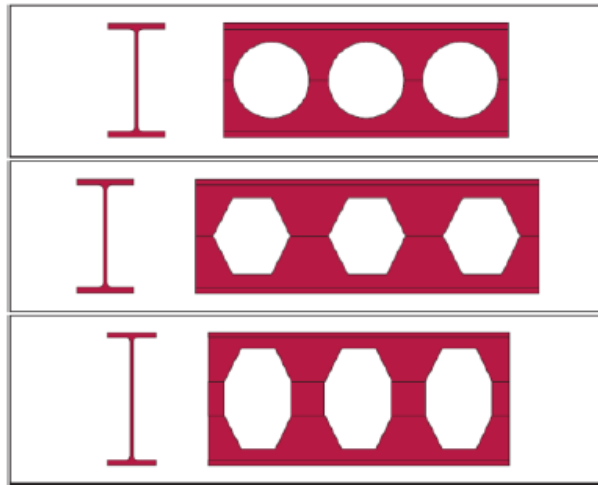
Şekil 2.27. L Profilleri [64]

Kutu Profiller; Yük taşıyıcı eleman olarak genellikle kolonlarda kullanılır. Kenar uzunluğu 20-180 mm, et kalınlığı 1,2-12,5 mm arasında değişir.



Şekil 2.28. Kutu profilleri [65]

Özel Üretim Profilleri; Uygulama projesinin gerektirdiği şekillerde profiller haddelenerek veya bükülerek özel profiller elde edilebilir. Hafiflik açısından I profilin gövdesi boyunca zigzaglı olarak kesilerek elde edilen iki parçanın kaydırılıp ek parça kullanılarak kaynak yardımıyla tekrar birleştirilmesi sonucu petek kirişler oluşturulabilir [64].

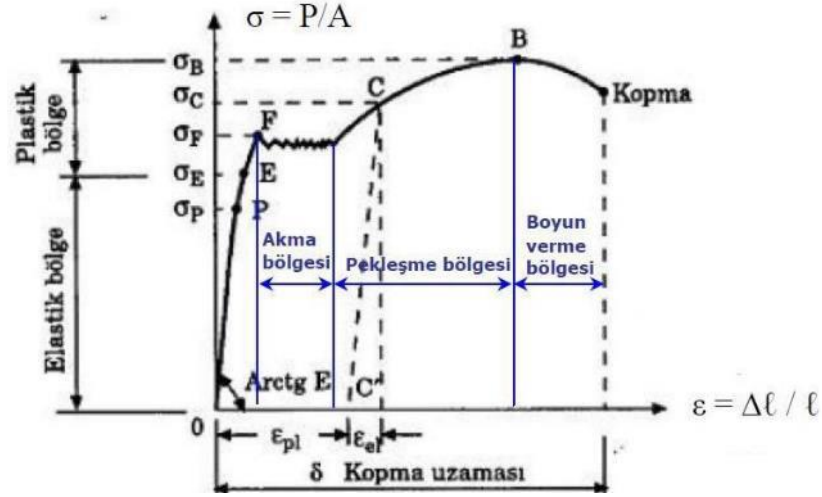


Şekil 2.29. Özel üretim profilleri [64]

Çelik türleri kimyasal bileşimleri ve gösterdikleri işlemlere göre farklı karakteristik özellikler gösterir. Mekanik özellikler çeliğin elektriksel ve fiziksel özelliklerine göre en önemlileridir. Çelik türlerine göre değişen mekanik özelliklerden bazıları, çekme dayanımı, akma sınırı, uzama, büzülme, darbe dayanımı ve sertliktir.



Yapısal çeliklerin yük altındaki dayanımlarını tarif etmek için akma sınır değeri, çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinden yararlanır. Akma sınır değeri ve çekme mukavemetinin değerleri eksenel çekme deneyi ile tayin edilir. Çeliğin mekanik özellikleri çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği yardımıyla belirlenir. Şekil 2.30.'da gerilme-şekil değiştirme grafiği verilmiştir [59].



Şekil 2.30. Gerilme-Şekil Değiştirme grafiği [59]

Çekme deneyinde çeliğe sabit artan yük ile çekme kuvvetine tabi tutulur ve çelikte meydana gelen boy değişimi ölçülmektedir. Çelik boyunda olan değişim ile kuvvet arasındaki ilişkiden yük-birim deformasyon diyagramı oluşturulmaktadır. Yapısal çeliğin iki ana özelliğinden biri akma gerilmesi diğeri ise çekme dayanımıdır. Gerilme-şekil değiştirme grafiğinde akma dayanımının belirgin olarak görüldüğü çelik türü yumuşak yapı çelikleridir. Buna karşın yüksek mukavemetli çeliklerde akma dayanımı belirgin olarak görülmemektedir. Burada akma dayanımını belirlemek için 0.002 mm/mm den kalıcı plastik şekil değiştirme çizgisi başlangıç eğimine paralel çizilip eğriyi kestiği nokta akma dayanımı olarak kabul edilir [66].

Yapı çeliği olarak günümüzde en çok S235 (St37), S275 (St44), S355 (St52) çelik türleri kullanılmaktadır. Bu çelik türlerinden genellikle tercih edilen S235 (St37) çelik sınıfının kopma mukavemeti  $F_u=360 \text{ N/mm}^2$  (St37,  $\sigma_k=3700 \text{ kg/cm}^2$ ), akma mukavemeti ise  $F_y = 235 \text{ N/mm}^2$  (St37,  $\sigma_f = 2400 \text{ kg/cm}^2$ ) olarak verilmektedir [67].

Aşağıda Tablo 2.22.'de sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde karakteristik akma gerilmesi ve çekme dayanımı verilmiştir.

Tablo 2.22. Sıcak haddelenmiş yapısal çeliklerde akma gerilmesi ve çekme dayanımı [68]

Standart ve Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık, t (mm)			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	F <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	F <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	F <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	F <sub>u</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
S235 EN 10025-2	235	360	215	360
S275 EN 10025-2	275	430	255	410
S355 EN 10025-2	355	510	335	470
S450 EN 10025-2	440	550	410	550

Yapısal çelik, homojen ve üretimi sürekli denetim altında tutulabilen endüstriyel bir üründür. Bu nedenle hesaplarda kullanılan güvenlik katsayıları küçüktür. Elastisite modülü büyük olup sünek bir malzemedir.

### 2.2.1. Çelik yapı tasarım standartları

Ülkemizde kullanılan çelik yapı tasarımı ile ilgili standartlardan ilk akla gelen emniyet gerilmeleri yöntemini esas alan TS 648 Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları'dır. 1980 yılında yürürlüğe girmiştir. TS 4561 Çelik Yapıların Platik Teoriye Göre Hesap Kuralları standard 1985 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu standartta çelik malzemesinin plastik şekil değiştirme durumu esas alınmıştır. Halen yürürlükte olmasına rağmen TS 648 aktif olarak kullanım dışı kalmıştır. TS 4561 daha önce yürürlükten kaldırılarak yerine TS EN 1993-1-1 (TSE tarafından Türkçe'ye çevrilen Eurocode 3) geçmiştir. TS 648'in kullanılan hesap yöntemleri ve malzeme alanında dünyada meydana gelen gelişmelere karşı güncelliğini yitirmiş olması nedeniyle 2016 Eylül ayında Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar Yönetmeliği yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik ülkemizde çelik yapılar için hazırlanmış ilk kapsamlı yönetmelik olma özelliğini taşıdığı için önemlidir [69]. Yapı tasarımı hususunda ülkelerin fiziki ve çevresel şartlarına göre yönetmelik ve standartları yeniden düzenlemesi, ulusal ekler ile güncellemesi beklenmektedir. Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik ile çelik yapı tasarımındaki uyum sağlanmaya çalışılmıştır. Mevcut yönetmeliklerin haricinde Türk Yapısal Çelik Derneği de çelik şartnameleri hazırlayarak çelik yapı sektörüne yön vermektedir [70].

TS 648 yönetmeliği, uluslararası düzeyde güncel ve geçerliliği kanıtlanmış Amerikan Yönetmeliği AISC 360-10 ve AISC 360-16 temel alınarak geliştirilmiştir. AISC 360-10 yönetmeliğinde iki farklı tasarım yöntemi uygulanmaktadır; ASD “Allowable Strength Design - Güvenli Dayanım Yöntemi” ve LRFD “Load and Resistance Factor Design - Yük ve Dayanım Katsayıları Yöntemi” dir. Bu yöntemler ÇYTHYE’de “GKT - Güvenlik Katsayıları ile Tasarım” ve “YDKT - Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım” olarak kullanılmıştır [71]. Yapı güvenliği için tasarım dayanımları gerekli dayanım değerlerine eşit veya daha büyük olmalıdır. İki yöntemde de etki etmesi planlanan yükler belirli yük katsayıları ile çarpılır ve gerekli dayanım değerleri hesaplanır.

Eurocode 3: Çelik Yapıların Tasarımı (Design of Steel Structures) yönetmeliği Avrupa’da uzun yıllar kullanılan ve temelinde sınır durumlarına göre tasarım olan, tüm sınır durumu için detaylı tasarım kuralları içeren bir tasarım yönetmeliği olması nedeniyle çokça ülkede kabul edilmiştir. ÇYTHYE’nin yürürlüğe girmesinden önce, ülkemizde ve Avrupa’da inşa edilen birçok nitelikli çelik yapının tasarımında Eurocode 3’ün kullanıldığı söylenebilir. Bu yönetmelik hali hazırda özellikle özel projelerde ülkemizde kullanılmaktadır. Eurocode 3’te tanımlanan tasarım yöntemiyle ÇYTHYE’de tanımlanan YDKT yönteminin tasarım mantıkları benzerdir [72, 73].

### **2.2.2. Çelik birleşim elemanları**

Profillerin ve levhaların birleştirilmesi ile çelik yapılar meydana gelir. Yapıyı oluşturan elemanları, statik ve mukavemet yönünden birlikte çalışacak şekilde birleştiren elemanlara birleştirme vasıtası adı verilir. Perçin ve bulon ile kaynak birleştirme vasıtalarıdır. Günümüzde genellikle kaynak ve bulon kullanılmaktadır. Perçin, St33 çelikten yapılmış ve kaynak yapılmasına müsade edilmeyen elemanların birleşim yerlerinde kullanılır [74]. Birleşim elemanlarının kullanım amaçları; eleman boyunu uzatmak, eleman enkesitini artırmak, sistemde düğüm noktaları oluşturmak ve mesnetleri oluşturmak şeklinde sıralanabilir.

### 2.2.2.1. Bulonlu birleşimler

Çelik yapılarda sıklıkla kullanılan birleşim türüdür. Kaynağa göre daha kolay ve pratik bir çözümdür. Bulonlar silindirik gövdeli, anahtar ile sıkıştırılmaya müsait altıgen başlıklı, uç kısmında dişleri olan ve sıkıştırmak için somun adı verilen parçası bulunan cıvatalardır. Sıkıştırma yapmadan önce somunun altına pul yerleştirilir. Bulonlar, normal bulonlar ve yüksek mukavemetli bulonlar olmak üzere ikiye ayrılır. Normal bulonlar kaba bulonlar ve uygun bulonlar olarak çeşitlenmektedir. Yüksek mukavemetli bulonlar ise genellikle öngermeli olarak kullanılmaktadır.

Kaba Bulonlarda, bulon çapı, delik çapından 1 mm çıkarılarak hesap edilir. Diş açılmamış kısmın dışında kalan gövde kısmı işlenmemiştir. Kolon ekleri, dolu gövdeli kiriş ekleri, moment aktaran birleşimler ve çok katlı yapılarda kullanımlarına yönetmelik tarafından izin verilmez. Uygun Bulonlarda, bulon çapı delik çapına eşittir. Gövde kısmı tornalanarak düzgün işlenmiştir.

### 2.2.2.2. Perçinli birleşimler

Perçinler bir daha çözülemeyecek birleşimlerde kullanılır. Normal bulonlardaki gibi gövdede makaslama, delik çevresinde ezilmeye göre kuvvet taşımaktadırlar. Silindirik gövde ve dairesel başlık kısımlarından oluşmaktadır. Levhaya gövde kısmı yerleştirildikten sonra dövülerek alt kısmı kapak başı denilen şekle dönüştürülmektedir. Yerine konmamış perçin çapı, yerine konmuş perçin çapından 1 mm küçüktür ve perçin yerine yerleştirilip dövüldükten sonra deliği tamamen doldurmalıdır. Perçinin yerleştirilmesi dövülerek ya da özel tabancalar ile yapılmaktadır. Perçinin yerleştirildiği delik perçin çapından 1 mm fazla olmalıdır [59].

### 2.2.2.3. Kaynaklı birleşimler

Kaynaklı birleşimler hasar vermeden ayrılamayan birleştirme türlerindedir. Malzemelerin ısı, basınç veya her ikisinde uygulanarak birleştirilmesi yöntemidir. Bazı

kaynak yöntemlerinde kaynak elektrodu, kaynak teli gibi ilaveler kullanılmaktadır. Başlıca iki tür kaynak vardır; Basınç kaynakları ve Ergitme kaynaklarıdır.

- Basınç kaynakları

Parçaların birleştirilecek kısımları plastik kıvama gelinceye kadar ısıtılır ardından basınç veya darbe ile birleştirilir. Bu yöntem demircilerin ocakta elemanları ısıtıp, örs üzerinde çekiç ile vurup birleştirdiği yöntem olarak örneklendirilebilir. Basınç kaynaklarınının çelik yapılarda uygulanması pek söz konusu değildir. Modern çelik yapılarda tek kullanımı elektrik direnç kaynağı şeklindedir. Elektrik direnç kaynağında kaynak için gerekli ısı elektrik akımına kısa devre yaptırılarak sağlanabilir. Nokta kaynak ile hafif çelik yapılarda ince levhaların birleştirilmesi ve elektrik arkı saplama kaynağı ile başlıklı saplamaların profillere kaynaklanması elektrik direnç kaynağı yönteminin uygulamalarıdır.

- Ergitme kaynakları

Bu kaynak türünde, kaynaklanacak bölgeler ile ilave metal ergime derecesine kadar ısıtılır ve birleşen kısımların soğuması neticesinde birleşim gerçekleşmiş olur. Elektrik enerjisi, gaz alevi, lazer ışını ve elektron ışını ısı kaynağı olarak kullanılabilir. Ergitme kaynakları elektrik arkı kaynağı ve gaz kaynağı olmak üzere başlıca iki türe ayrılır. Çelik yapılar için taşıyıcı olan kaynak türü elektrik arkı kaynaklarıdır ve uygulama metoduna göre 4 ana gruba ayrılabilir.

1. Standart elektrik arkı kaynağı
2. Özlü elektrodlu elektrik arkı kaynağı
3. Toz altı elektrik arkı kaynağı
4. Gaz altı elektrik arkı kaynağı

Standart elektrik arkı kaynağı pratik ve yaygın olarak kullanılan kaynak çeşididir. Elektrod kaynağı olarak da bilinen kaynak metodunda, elektrod bir kablo ile kaynak makinesinin (-) kutubuna ve kaynaklanacak parça ise (+) kutubuna bağlıdır. Birleşimi

yapılacak parçalara elektrod yaklaştırıldığı anda parçalar arasında elektrik arki oluşur, arkin oluşturduğu yaklaşık 4000°C kadarlık yüksek ısıdan dolayı ergiyen elektrodun ucundaki metal damlacıkları birleşimi istenen parçaların arasındaki boşluğu doldurur.

Ergitme kaynağı ile yapılan kaynak dikişleri, “küt kaynak” ve “köşe kaynak” olmak üzere iki çeşide ayrılmaktadır. Aynı düzlemdeki iki levhanın aralarında bir miktar boşluk olacak şekilde bir araya getirilmesinden sonra araya çekilen kaynak dikişlerine küt kaynak dikişi denilmektedir. Köşe kaynak ise elemanların 90° veya en az 60° açı yapan yüzeylerin arasına çekilen kaynak dikişidir [59].

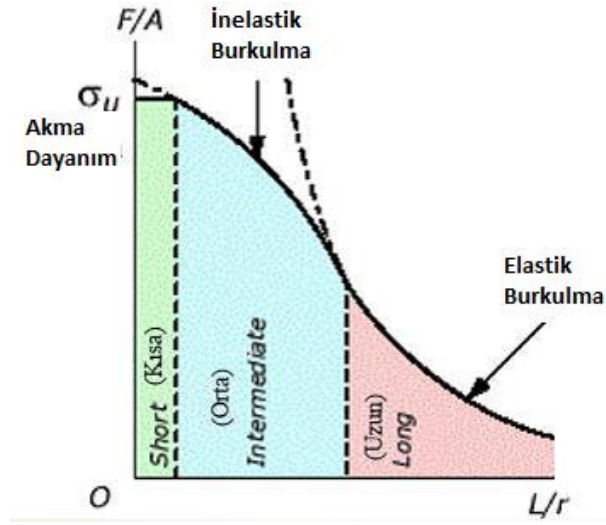
### 2.2.3. Eleman enkesit özellikleri

Eksenleri boyunca sadece aksenal basınç kuvveti taşıyan elemanlara çelik basınç elemanları denir. Çelik basınç elemanlarına örnek vermek gerekirse, çaprazlı çerçevelerin kolonları, kafes sistemlerde basınca çalışan çubukları, binaların düşey yük taşıyıcıları olan kolonlar sayılabilir. Yapısal çelik elemanlarının sadece basınç kuvveti altında olduğu durumlar vardır. Kesit zoru olarak sadece aksenal doğrultusunda basınç yüküne maruz kalan elemanlara basınç çubukları denmektedir. Sektörde genellikle kolon tiplerinde I profiller, kutu ya da boru profiller ve yapma kesitli profiller kullanılmaktadır. Kafes sistemlerde ise tek köşebent, sırt sırta köşebent, T profiller, kutu veya boru profiller tercih edilmektedir.

Çerçeve sistemlerin en kritik elemanları olan kolonlarda görülebilecek göçme modu yapının kararlılığını kaybedip hasarın beklenenden büyük olmasına neden olabilir. Bu sebeple kolon tasarımları olması ihtimal tüm sünek ve gevrek göçme modları hesap edilerek yapılmalıdır.

Kompakt en kesitli kısa boylu çelik basınç elemanının yük taşıma kapasitesi akma yüküne eşit alınabilir. Boyu uzun veya narin enkesitli olan çelik yapı elemanın basınç davranışını genellikle burkulma belirlemektedir. Kompakt enkesitli basınç elemanları; burulurak, eğilerek ve burularak burkulabilirler. Elemanların genel burkulma modları enkesitlerin şekillerine bağlıdır. Ayrıca ince cidarlı, narin en kesitli çelik basınç

elemanı genel burkulma yükünün daha altında bir yükte elemanın parçalarının yerel burkulmaya uğraması nedeniyle yük taşıma kapasitesini kaybedebilir. Özetle çelik basınç elemanlarının davranışını belirleyen temel sınır durumu burkulmadır. Şekil 2.31.'de kompakt enkesitli çelik basınç elemanının aksel yük taşıma kapasitesinin (F), elemanın boyu ile (L) değişim grafiği görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere çelik basınç elemanının davranışını belirleyen sınır durum elemanın boyu ile doğrudan bağlıdır.



Şekil 2.31. Kompakt enkesitli basınç elemanının kapasitesinin elemanın boyuyla değişimi [75]

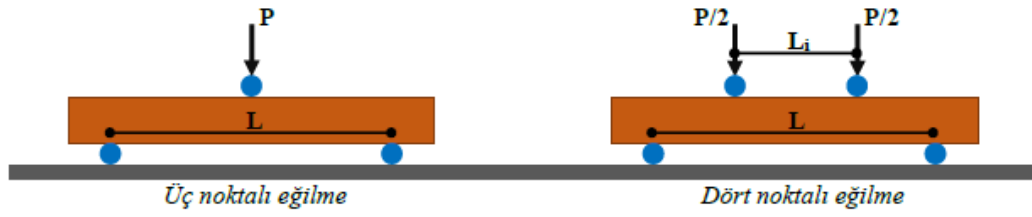
Kompakt kısa elemanların davranışını kontrol eden sınır durum akmadır buna karşın elemanın boyunda uzama oldukça burkulma sınır durumları davranışı kontrol etmeye başlar. Çelik yapı elemanının aksel basınç kuvveti etkisinde akma yüküne ulaşabilmesi için elemanın tamamında veya enkesit parçalarında akmadan önce burkulma gözlemlenmemelidir [76].

Eksenel basınç kuvveti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, narin ve narin olmayan enkesitler olarak ayrılırlar.

Eğilme momenti etkisindeki enkesitler, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesitler olarak üçe ayrılmaktadırlar. Kiriş elemanlarında yükleme ve mesnetleme biçimlerine göre eğilme momenti, kesme kuvveti, burulma momenti ve aksel kuvvet oluşabilmektedir.

Düsey yüklerle eğilme etkisine maruz kalan kirişlerin iç kuvvet modları eğilme momenti ve kesme kuvveti çifti olmaktadır.

Eğilme deneyi iki destek üzerine serbest bir biçimde yerleştirilen prizmatik deney numunesinin orta bölgesine yük uygulandığında meydana gelen biçim değiştirmeye bağlı olarak eğilme momenti, eğilme dayanımı, elastisite modülü, eğilme sonucu oluşan deplasman ve eğilme rijitliği gibi değişkenlerin hesaplanması olarak tanımlanabilir. Eğilme testi üç noktalı ve dört noktalı eğilme test düzeneği olarak standartlara uygun olarak iki şekilde oluşturulabilir (Şekil 2.32.). İki düzeneğinde temel prensibi, eğilmeye maruz kalacak numunenin basit kiriş sınır durumları altında test edilebilmesidir [77].



Şekil 2.32. Üç noktalı ve dört noktalı eğilme düzenekleri şematik gösterimi [50]

Üç noktalı eğilme düzeneklerinde iki mesnet arasına yerleştirilen numuneye tam orta noktasından dik yönde düşey kuvvet uygulanır. Üç noktalı eğilmede orta noktada yükün etki ettiği bölgede kesme kuvveti yön değiştirir ve maksimum moment oluşur.

Bu tez kapsamında, deneysel çalışmalarda S235 çeliği kutu profil kesitli kirişlerde üç noktalı eğilme test düzeneği uygulanmıştır.

Üç noktalı eğilme deneyi yapılan numunelerin yük-sehim grafikleri oluşturularak, her çeşit güçlendirme için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Her tip numune için eğilme gerilmeleri Denklem 2.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{PL/4}{I/y} \quad (2.2)$$



Denkleimde,

$\sigma$ ; Gerilme ( $N/mm^2$ ),

M; Moment (Nmm),

W; Mukavemet momenti ( $cm^3$ ),

P; Max. yük (N),

L; Mesnet açıklığı (mm),

I; Atalet momenti ( $mm^4$ ),

y; Tarafsız eksen uzaklığını (mm) göstermektedir.

#### 2.2.4. Çelik yapıların avantaj ve dezavantajları

Çelik yapı tasarımı ve analizleri yapılırken malzemenin üstün ve sakıncalı özelliklerinin iyi biliniyor olması önemlidir. Yapının kullanım amacı, çevresel koşullar ve beklenen performanslar çerçevesinde bu avantaj ve dezavantaj özellikleri değerlendirilmelidir.

Çelik yapı malzemesinin genel olarak avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Yapı malzemesi olarak çelik yüksek dayanımlı olup kendi ağırlığının taşıdığı yüke oranı oldukça küçüktür. Bu sebeple yapının toplam ağırlığı azalmaktadır.
- Elastisite modülü yüksektir. Bu özelliği ile eğilme rijitliğinin önem teşkil ettiği sistemlerde olumlu sonuçlar verir. Sehim ile ilgili sorun oluşturan taşıyıcı eleman boyutlandırılmasında ekonomik kesitler elde edilmesine imkan sağlar. Düşük eleman kesit boyutları ile geniş açıklıklar geçme olanağı sağlar.
- Yapı elemanlarının üretimi fabrikalarda yapılıp şantiyelerde montajı olmaktadır. İş programının büyük bölümü imalatı kapsar ve montaj süresi oldukça kısadır. İmalatın kapalı ortamda yapılması hava koşulları etkilerini en aza indirir.
- Olası değişikliklerin ve takviyelerin yapılması diğer yapı sistemlerine göre daha kolay olmaktadır.
- Daha sonraki kullanım amacı değişikliklerine basit çözümler sağlayabilir.

- Çelik hurda geri dönüştürülebilir.
- Kompozit yapılarda yüksek yangın güvenliği sağlar.
- Çelik yapı tasarımı estetik ve yaratıcılığa açıktır.

Çelik yapı malzemesinin genel olarak dezavantajları şu şekilde sıralanabilir;

- Yanıcı olamamakla birlikte, ısı yükseldikçe mukavemetinde ve elastisite modülünde hızlı düşüşler meydana gelir.
- Hava, su ve kimyasal maddeler ile teması halinde korozyon olayı başlayabilir ve korozyon malzemenin mukavemetini azaltır. Bu nedenle çelik yapılar zaman zaman bakımdan geçirilmelidir.
- Isı ve ses yalıtımı açısından iyi bir iletken olması sebebiyle yalıtım önlemi alınmalıdır.
- Yapısal detay tiplerine bağlı olarak, gerilme yığılmalarından kaynaklanan gevrek kırılma ile elemanlarda ve birleşim bölgelerinde tekrarlı yüklerden kaynaklanan yorulma hasarlarına maruz kalabilir.

### **2.2.5. Çelik yapıların kullanım alanları**

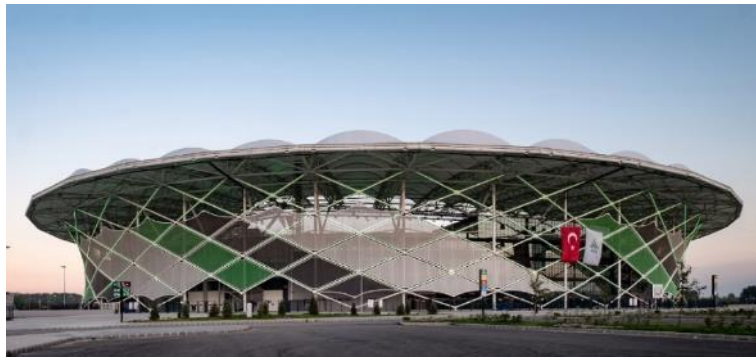
Son yıllarda yapı malzemesi olarak çeliğin yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunun sebebi ise çelik yapı malzemesinin oldukça kullanışlı ve dayanıklı yapısıdır. Çelik kullanım alanlarının büyük bölümünü endüstri yapıları, köprüler ve büyük açıklıklı çatılar oluşturmaktadır. Buna karşın çok katlı çelik yapı uygulamaları az bir bölümü oluşturmaktadır. Bu durum çelik yapıların betonarme yapılara göre daha maliyetli olması ile açıklansada bu gerekçe sıradan betonarme yapılar için geçerli olup depreme dayanıklı, yönetmeliklere uygun projelendirilen ve her yönüyle sıkı bir denetim ile inşa edilen betonarme yapı en az çelik bir yapı kadar maliyetli olabilir. Şekil 2.33., 2.34. ve 2.35.'de çelik yapıların kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.



Şekil 2.33. 1915 Çanakkale Köprüsü [78]



Şekil 2.34. Endüstriyel tesisler [79]



Şekil 2.35. Çelik spor tesisi [80]

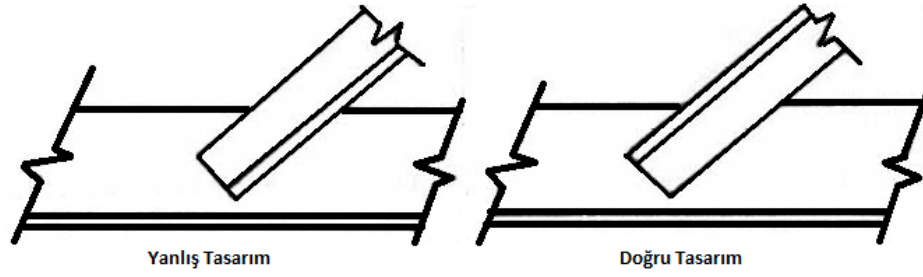
### 2.3. Çelik Yapı ve Korozyon

Yüksek taşıma kapasiteleri, sünek davranış göstermeleri gibi özellikleri sebebi ile çelik taşıyıcı sistemler günümüzde tercih edilmektedir. Üretimleri esnasında detaylı kontrollerden geçmesine rağmen çelik yapı elemanlarının taşıyıcı özellikleri çeşitli

çevresel etkilere maruz kalarak zamanla zarar görüp azalmaktadır. Bu zararlı etkilerden en önemlisi korozyon hasarlarıdır. Korozyon hem fiziksel hem de kimyasal olarak malzemede değişim meydana getirmektedir. Korozyon hasarları metallerde kütle kaybına neden olduğu için elemanların dayanımlarında ve kullanım ömürlerinde azalmalara sebep olmakla birlikte malzemelerin özelliklerini de değiştirmektedir. Metaller için korozyon hasarı önceden hesaba katılmalıdır, aksi takdirde yenileme ve bakım işleri önemli bir zaman ve ekonomik kayba neden olmaktadır [67]. Çelik yapı elemanlarında herhangi bir önlem alınmadığı durumlarda korozyon mekanizmasının başlaması muhtemeldir. Korozyon sonucu elemanlarda kabuklaşma, çatlama ve yarıklar oluşabilmektedir. Oluşan bu etkiler neticesinde elemanın taşıma kapasitesinde ve rijitliğinde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Korozyon oluşumuna karşı öncelikle konstrüktif önlemler alınarak projelendirme yapılmalıdır. Ardından çeşitli kaplamalar veya kimyasal koruma yöntemleri incelenip uygun yöntem tercih edilmelidir.

Projelendirme aşamasında korozyonu önlemek için alınabilecek önlemler (Şekil 2.36.) [81];

- Damlalıklar, drenaj kanalları ve oluklar teşkil edilmelidir.
- Yatay yerine min %3 eğimli yüzeyler oluşturulmalıdır.
- Projede olabildiğince küçük dış yüzeyler oluşturulmalıdır.
- Tasarımda köşe kesitleri olabildiğince büyük çaplı yuvarlatılmalıdır.
- Suyu maruz kalacak kesitlerden suyu uzaklaştıracak önlemler alınmalı veya kesitin üzeri kapatılmalıdır.
- 15 mm'den az aralıklar besleme levhaları veya başka malzemeler ile doldurulmalıdır.
- Korozyona hassas bölgelerde dayanımı yüksek veya kolayca değiştirilebilen bir malzeme kullanılmalıdır.



Şekil 2.36. Levha ve köşebent birleşimi [82]

#### 2.4. Korozyon

Korozyon, Latince “corrodere” kökünden türetilmiş olup Plato’nun çalışmaları korozyonun ilk yazılı tanımını içermektedir. Plato, pası metalden ayrılan toprağa benzer bir bileşen olarak tarif etmiştir. Bundan 2000 yıl sonra Georgius Agricola da mineroloji kitabında aynı fikri savunmuştur. Pasın metalik demirin bir salgısı olduğunu söylemiştir. Sonraki yıllarda korozyon süreci, ilk defa 1667 yılındaki bir Almanca-Fransızca çeviride ortaya çıkmıştır. 1836’da Sir Humprey Davy Fransızca’dan yaptığı bir çeviride metalik demirin deniz suyu içinde katodik korumasından bahsetmiştir. Aynı zamanlarda Michael Faraday kendi adıyla anılan elektrokimyasal etki ile akım üretimi formüllerini üretmiştir [83].

Metallerin bulunduğu ortam içinde, kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu bozulmasına korozyon denir. Korozyon nedeni ile metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal veya elektriksel özelliğinin istenmeyen değişikliklere uğraması önemli derecede maddi kayıplara yol açar. Örneğin Türkiye’deki korozyon kayıplarının GSMH’nin %4.36’sına eşit olduğu araştırmalar sonucu elde edilmiştir [84].

Çelik yapılar için önemli sorunlardan biri korozyondur. Çelik yapılarda oluşan korozyon yapının dayanımını etkilemektedir. Korozyon nedeniyle yapı elemanlarında oluşan kesit kayıpları yapının güvenliğini etkilemektedir. Bu tez kapsamında korozyonun çelik kutu profil elemanlarının dayanımları üzerine etkileri ve korozyon sonrası oluşacak dayanım kayıpları incelenmiş olup kütlece %10 ve %20 korozyona uğrayan elemanların taşıma gücü kapasiteleri incelenmiştir. Daha sonra kütlece %10

ve %20 korozyona uğrayan çelik elemanlar CFRP, GFRP, BFRP ile güçlendirilip taşıma gücü kapasiteleri karşılaştırılmıştır.

#### **2.4.1. Korozyonun önemi**

Korozyon olayı ile hayatımızın her alanında karşı karşıya kalabiliriz. Bu nedenle korozyon önemli bir doğal olaydır. Korozyonun önemi; ekonomik açıdan; zarar görmüş bir metalin yeniden kullanılabilir bir hale dönüştürülebilmesi, güvenlik açısından; korozyon nedeni ile metalin zayıflayıp işlevini yerine getiremeyecek duruma gelmesi ve kazalara sebep olması, kaynakların korunması açısından; geleceğe dönük stokların oluşturulması şeklinde açıklanabilmektedir [7].

Korozyon doğrudan veya dolaylı olarak ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Korozyonun dolaylı yoldan açtığı zarara bir örnek vermek gerekirse; korozyon ürünlerinin yüzeysel dağılımı ısı geçirgenlik katsayısını düşürerek verimin düşmesine yol açması gösterilebilir [85]. Korozyonun ekonomik açıdan önemli olduğu kadar insan sağlığı açısından da oldukça önemlidir. Korozyon sonucu olan ürünlerin gıda maddelerinin veya ilaçların içine sızması sağlık için tehlikelidir. Endüstrinin her alanında korozyon kendini göstermektedir. Korozyon sonucunda dayanımını kaybetmiş yapıtların beklenmedik anda çökmesi iş kazalarına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra korozyon nedeniyle yapılan harcamalar üretim giderlerinde artmasına neden olmaktadır. Daha önceleri İngiltere’de yapılan bir çalışmaya göre korozyon ve korozyonun neden olduğu ekonomik kaybın, yıllık 1365 milyon pound olduğu tahmin edilmektedir. Bu sebeple korozyon hızının ölçülmesi ve korunma için önemlerin alınması için araştırmalar yapılmaktadır [86, 87].

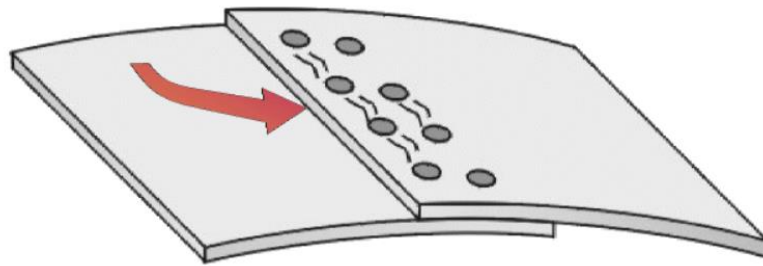
Korozyon maliyetini oluşturan başlıca unsurlar, korozyon oluşumuna dirençli malzeme seçimi, korozyonu önlemek amacıyla kullanılan yüzey malzemeleri, korozyon etkisine karşı kullanılan kimyasallar, korozyona uğramış elemanın yenisi ile değiştirilmesi ve korozyon hızı belirlenip buna göre çelik elemanda et kalınlığının artırılması olarak sıralanabilir. Korozyon neticesinde taşıma gücünde azalma olan çelik elemanların değiştirilmesi, delinen çelik tankların yenilenmesi, hasar gören su

borularının değiştirilmesinin yanı sıra depo ve boru hatlarında aktarılan ürün ile korozyon ürünlerinin temas etmesi halinde ürünün kirlenmesi ve insan sağlığını olumsuz etkilemesi korozyonun önemli zararlarından [88].

Korozyonun önemi hususunda emniyet faktöründe vardır. Korozyon sebebiyle oluşan zamansız malzeme bozunmaları, kritik proseslerin aksamasına, patlamasına ve çevreye zarar vermesine sebep olur [89]. Hindistan'da 1984 yılında meydana gelen korozyon etkisi ile patlama endüstri tarihinin en büyük olayıdır. Metil izosiyanat dolu 40 tonluk tankın patlaması ve çevreye yayılması sonucunda en az 3787 kişi hayatını kaybetmiştir. Bu kaybın 16000 kişi olduğuda iddia edilmektedir. Tankta eklenen su nedeniyle basınç ve sıcaklık çok yükselmiş ve bunun neticesinde paslanmaz çelik tankta hızlı bir şekilde korozyon başlamıştır [90].

1992 yılında Meksika'da çukurcuk korozyonun neden olduğu kanalizasyon patlamasında 215 kişi hayatını kaybetmiş ve binlerce kişi yaralanmıştır. Çelik benzin borusu ile çinko kaplı su borusu arasında korozyon nedeniyle oluşan bir delikten benzin sızıntısının kanalizasyona karışması sonucu patlama meydana gelmiştir [91].

1988 yılında Aloha Airliness'a ait BOEING 737 uçağı Hawai'ye uçarken aniden patlamıştır. Araştırmalar hasarın yakıt paneli üzerinde korozyonun hızlandığı yorulmadan kaynaklandığını göstermektedir (Şekil 2.37.) [92, 93].



Şekil 2.37. Aloha kazasında uçağın bindirme bağlantısında yorulma [94]

Örneklerde görüldüğü gibi korozyon nedeniyle felaketler meydana gelebilmektedir. Korozyon mekanizmalarının hayati önemi kritik proseslerde felaketlerin yaşanmasıyla anlaşılmaktadır. Korozyon sonucunda metal kaybını açıkça görebiliriz fakat

görülme kayıplarda olmaktadır. Petrol rafinelerinde bir boru hattında delinme yaşanması durumunda meydana gelebilecek etkilerden bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Delinmenin farkedilmesine kadar geçen sürede sızan sıvı kaybı,
- Çevreye dağılan sıvının yarattığı kirlilik,
- Sıvının oluşturduğu yangın tehlikesi,
- Delinen borunun yenisi ile değiştirilmesi için kaybedilen işçilik ve yeni boru maliyeti,
- Sorunun giderilmesi için geçen süre zarfında işletme kesikliğinden doğan zararlar.

Korozyonun ve oluşum mekanizmasının iyi bilinmesi korozyondan korunmak için önemlidir. Elektrokimyasal korozyon sulu ortamlarda oluşan bozulmalar, kimyasal korozyon ise metal ve alaşımlarının oksitlenmesi olarak tanımlanabilir [89]. Metalin elektriği ileten bir ortamda bulunması halinde elektrokimyasal korozyon oluşmaktadır. Korozyon hücrelerinde bir anot ve bir katot olmak üzere iki elektrot, elektrolit olarak isimlendirilen iletken sıvı içerisinde bulunmaktadır. Elektrolit sıvı içerisinde oluşan elektrokimyasal olayda elektron alışverişi gerçekleşmektedir. Metal üzerinde bulunan anot bölgesi elektron kaybederek ve çözünerek korozyona uğramaktadır [95, 96].

#### **2.4.2. Korozyon oluşumu**

Korozyon mekanizmasının oluşumunda elektrot potansiyeli düşük olan element anot görevi görürken, elektron potansiyeli yüksek olan element katot görevi görmektedir. Örnek olarak; demirin oksijene göre daha düşük elektrolit potansiyeline sahip olmasından dolayı oksitlenerek anot olması, oksijenin ise daha yüksek elektrolit potansiyeline sahip olduğu için katot olması gösterilebilir [97].

Korozyon oluşumu kimyasal ve elektrokimyasal olmak üzere iki şekilde meydana gelmektedir.



Kimyasal korozyon; metaller ve alaşımlarının gazlarla doğrudan reaksiyona girmesiyle oluşur. Kimyasal korozyonun en belirgin örneği oksitlenme olayıdır. Yüksek sıcaklıklarda daha etkili olan oksitlenme, yüksek sıcaklıkta çalışan makineler ve buna benzer elemanlarda kendini göstermektedir.

Elektrokimyasal korozyon; metaller ve alaşımlarının sulu ortamlar içerisindeki korozyonu olarak tanımlanabilir. Elektrokimyasal korozyonun oluşabilmesi için elektrik akımının iletileceği elektrolit ortamı bulunması şarttır. Asit, baz ve tuzların sudaki çözeltilerine elektrolit denir. Metal elektronu elektrolit çözeltisine daldırıldığında atomların son yörüngesindeki elektronlar serbest hale geçer ve yüklü metal iyonu meydana gelir [98].

Denklem 2.3’de metal iyonu oluşumu görülmektedir.



Korozyon mekanizmaları çoğunlukla metallerin termodinamik kararsızlıkları sonucunda veya dış akımların etkisinde meydana gelmektedir. Metal korozyonu anodikte denetlense katodikte denetlense genel olarak korozyon hızı, yük aktarım basamağı ile sınırlı kalır. Metal iyonları oluştuğunda elektrik devresi tamamlanır ve sürekli bir akım yolu sağlanmış olur [99].

Korozyon hücrelerinde M metalinin anot tepkimesinde korozyona uğraması Denklem 2.4’de verilmektedir.



Korozyonun asitli ortamlarda meydana gelmesinde, katot bölgesinde devam eden iki indirgenme reaksiyonu, H<sub>2</sub> gazı oluşması ve oksijenin indirgenmesi şeklindedir. Bu tepkimeler Denklem 2.5 ve 2.6’da gösterilmektedir.





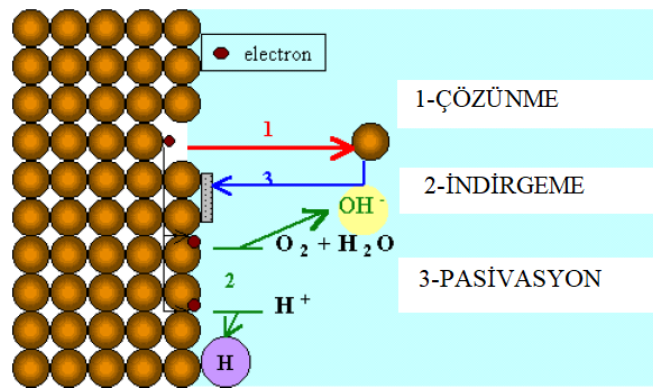
Nötr ve alkali ortamlarda katot tepkimesi su ve çözülmüş oksijenin indirgenme reaksiyonları şeklindedir. Bu reaksiyonlar aşağıda Denklem 2.7 ve 2.8'de gösterilmektedir.



Ayrıca ortamdaki mevcut metal iyonlarının indirgenmesi Denklem 2.9 ve metal çökme reaksiyonu Denklem 2.10'da gösterilmektedir.



Metallerin korozyona uğradıktan sonra üzerlerinde oluşan bileşikler korozyon ürünleri ve pas olarak adlandırılır. Korozyon mekanizması oluştuğundan sonra metalde ısıl genişleme katsayısının farklılık göstermesiyle metalde gerçekleşen genişleme yüzeyde pullanmaya ve dökülmelere neden olur. Dökülmeden sonra asıl metal yine yüzeye çıkar ve tekrar korozyon mekanizmaları başlar [96]. Şekil 2.38.'de korozyon mekanizmasının oluşumu şematik olarak gösterilmektedir.



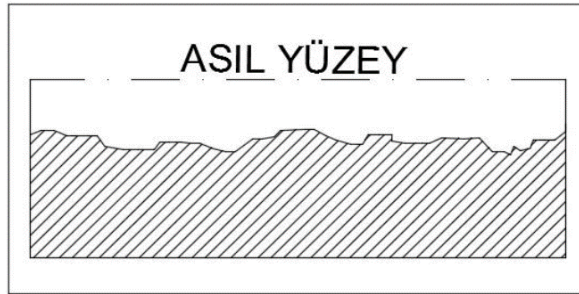
Şekil 2.38. Korozyon reaksiyonunun oluşumu [100]

## 2.5. Korozyon Atak Formları

Korozyon gelişiminin etkilendiği dolaylı ve dolaysız birçok etmen bulunmaktadır. Bu sebeple korozyon çeşitleri oluşmaktadır.

### 2.5.1. Üniform korozyon (genel korozyon)

Metalin yüzeyinde meydana gelen korozyon ve korozyon sonrasında bozunmanın yüzeyde belirli bir düzenle üniform şekilde dağılımı olarak tanımlanabilir. Çeliklerin ve dökme demirlerin atmosfere açık ortamlarda havaya, suya veya toprağa temas etmesi halinde yüzeylerinde üniform korozyon oluşabilir. Karşılaşılan en yaygın korozyon türüdür [101]. Genel korozyonun yol açtığı metal kaybı diğer korozyon türlerine göre daha yüksektir. Buna karşın korozyon hızı saptanabilir olduğundan çelik elemanın ömrüne ilişkin fikir oluşabilir. Gerekli önlemler önceden alınabilir [102]. Şekil 2.39.'da genel korozyon şematik olarak gösterilmektedir.

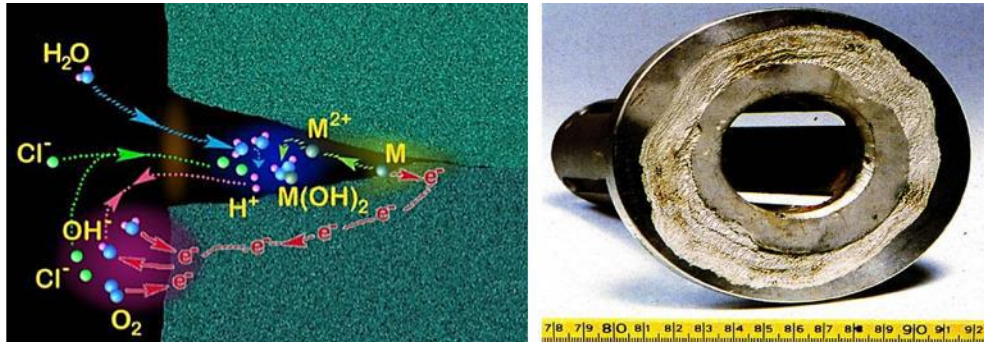


Şekil 2.39. Genel korozyon [103]

### 2.5.2. Aralık korozyonu

İki metal arasında birleşim bölgesinde dar bölgelerde kir vb. birikintiler bulunur. Bu bölgelerde oksijen difüzyonunun gerçekleşmesi zor olduğundan korozyon oluşumu gerçekleşir. Bu tür korozyona aralık korozyonu ve aynı zamanda çatlak korozyonunda denmektedir [104]. Kaynak birleşimlerinde boşluk olmadığı için aralık korozyonu görülmez.

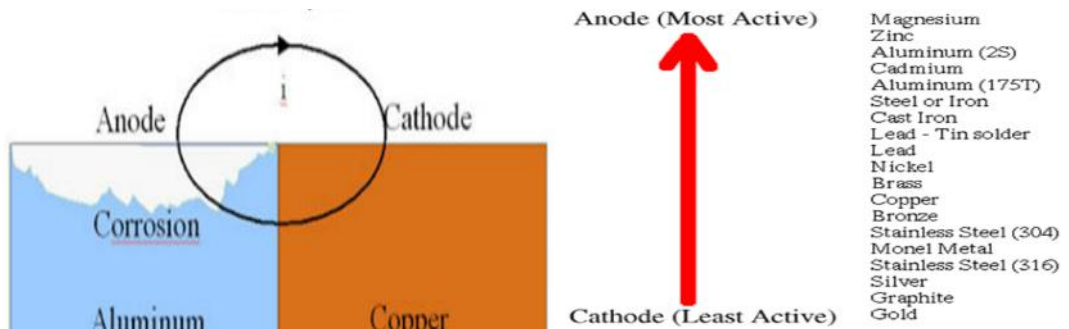
Bu tip korozyon genellikle sızdırmazlığı kötü olan boru flanşlarında, cıvata somun bağlantılarında ve sıvı ortamlarda bulunan bağlantılı tesisat elemanlarında görülür. Aralık korozyonunun önlenmesinde en etkili yöntem, yapılacak konstrüksiyonlarda aralıkların en aza indirilmesi ve mümkün olduğunca aralıkların kaldırılıp yalıtım yapılmasıdır [105]. Şekil 2.40.'da aralık korozyonunun gerçekleşme şeması ve örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.40. Aralık korozyonu gerçekleşme mekanizması ve örneği [106]

### 2.5.3. Galvanik korozyon

İki farklı metal galvanik çift oluşturacak şekilde temas halinde ise daha pasif olan malzeme anot olarak hareket eder ve korozyona uğrar [107]. İki metal aynı ortamda bulunduğu zaman metaller arasında potansiyel fark oluşur ve bu fark sonucunda daha aktif ve standart elektrot potansiyeli düşük değerde olan metal anot olarak korozyona daha fazla uğrarken, pasif olan ve standart elektrot potansiyeli yüksek değerde olan metal korozyona daha az uğrar [102]. Şekil 2.41.'de galvanik korozyon şeması ve elementlerin aktiflik-pasiflik sıralaması gösterilmektedir.



Şekil 2.41. Galvanik korozyon şeması ve elementlerin aktiflik-pasiflik sıralaması [107]

Şekil 2.42.'de petrol ve gaz hattındaki galvanik korozyon örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.42. Petrol ve gaz hattındaki galvanik korozyon [108]

Korozyon hızı, yürütücü kuvvet olan anot ve katot arasındaki potansiyel farkı ile çevre elektrolitin iletkenliğine bağlıdır. Bunun dışında katot/anot yüzey alanı oranı önem taşır. Katot/ anot oranının büyük olması demek büyük bir katot yüzeyine karşı anot yüzey alanının küçük olması, anot akım yoğunluğunun artmasına ve dar bir bölgede şiddetli korozyon oluşmasına sebep olur. Anodun büyük, katodun küçük olması halinde korozyon geniş bir yüzey alanına yayılması nedeniyle etkisiz kalabilir. Küçük katot ve büyük anot halinde eğer elektrolitin iletkenliği yüksek ise, galvanik hücreden oluşan korozyon akımı geniş bir alanda görülür. İletkenliğin düşük olması halinde ise iki metalin temas ettiği bölgede dar bir alanda şiddetli olarak korozyon meydana gelir [109].

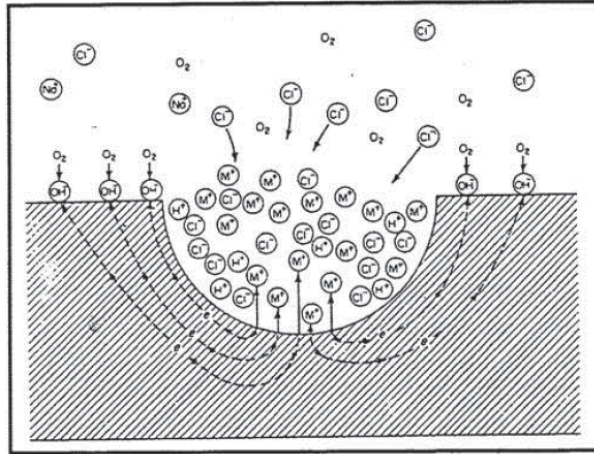
#### 2.5.4. Çukurcuk Korozyonu

Çukurcuk korozyonu metal yüzeyinde local çukurlar oluşturur. Katodik alanda bulunan anodik bölgede korozyon oluşmaya başlar. Korozyon çeşitleri arasında en tehlikeli ve en sık karşılaşılan türdür. Az miktarda malzeme kaybı olmasına rağmen tek noktada oluşan korozyon sebebiyle delinmeler ve kopmalar oluşur. Delinmeler ve kopmalar malzemeyi kullanılamaz hale getirir. Önemli yapılarda (petrol hatları vb.) böyle bir korozyon hasarı felaket ile sonuçlanabilir. Alaşım bileşimi, çevre koşulları, potansiyel ve sıcaklık çukurcuk korozyonunu etkileyen önemli faktörlerdir [110]. Şekil 2.43.'de çukurcuk korozyon örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.43. Çukurcuk korozyonu [107]

Metalin havalandırılmış sodyum klorür çözeltisi içindeki çukur korozyon oluşum mekanizması Şekil 2.44.'te görülmektedir.



Şekil 2.44. Çukurcuk korozyonu oluşum mekanizması [111]

Çukur korozyonu oluşumunda metalin cinsi önemli rol oynar. Pasifleşme özelliği olan metal ve alaşımlar çukur korozyonuna daha elverişlidir. Paslanmaz çeliklerde çukur korozyonuna sık rastlanır. Çukur korozyonunun ağırlık kaybı hesabı yöntemiyle değerlendirilmesi doğru değildir. İstatistik yöntemlerle, çukur sayısı ve derinliği ölçülerek birlikte değerlendirilmelidir. Ortalama çukur derinliğinden ziyade maksimum çukur derinliği çukur korozyonu değerlendirilmesinde önemlidir. Belirli bir yüzeyde bulunan çukur sayısı, derinliklerine göre düzgün dağılım gösterir. Olasılık



yöntemleriyle maksimum çukur derinliği ya da belirli bir derinlikteki çukur sayısı hesaplanabilir.

### 2.5.5. Tane sınırı korozyonu

Metal malzemelerin kristal yapısındaki tane sınırlarında gelişir. Sonuç olarak kristal yapı yani mekanik özellikler bozulur. Çıplak gözle görülmediğinden tehlikelidir. Özellikle östenitik paslanmaz çelikler hassastır. Bu korozyon türü genellikle eriyik metalin katılaşması veya metale ısıtılma işlemi uygulanması söz konusu olduğunda gerçekleşir. Taneler arası korozyona en yaygın iki örnek, ısıtılma işlemi veya kaynağa maruz kalan paslanmaz çelikler ve demir ihtiva eden alüminyum alaşımlarıdır. İçeriğinde bulunan karbon ile kromun tepkimeye girmesi sonucu oluşan krom karbür bileşiği, çeliğin taneler arasında korozyona dirençsiz zayıf bölgeler oluşmasına sebep olur. Dolayısıyla bu tip korozyon endüstride paslanmaz çelik ve alüminyum kullanımının sık olduğu alanlarda önemli sorundur. Şekil 2.45.'te taneler arası korozyon hasarına örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.45. Taneler arası korozyon hasarı [108]

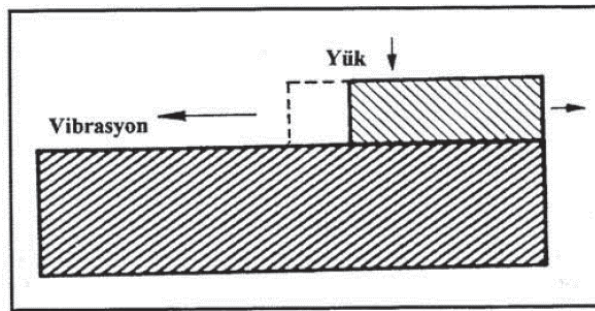
### 2.5.6. Stres (gerilimli) korozyon

Stres korozyonu temel olarak mekanik gerilme kuvvetleri neticesinde olur. Yüzey hataları, inkülüzyonlar çatlakların başlangıç noktası için adaydır. Yüksek sıcaklık, asitler ile temas, alkali veya tuzlar bu tip korozyonu oldukça hızlandırır. Örneğin; Nitrat,

Amonyak, Amin, Kostik, Klor, Politionik Asit, sülfid, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ortamları. Çukur korozyonunun oluşmasının ardından mekanik gerilim altında olan metallerdeki korozyon büyür ve çatlaklara dönüşür. Bu çatlak çevresel etkilere bağlı olarak malzeme içine ilerler ve artık kesit, üzerine yüklenen yükü taşıyamayacağı seviyeye geldiğinde ani kopma olabilir [89]. Gerilimli korozyon çatlama, gerilim ve aşındırıcının ortak etkisi altında mekanik özelliklerinin bozulması olarak tarif edilir [112].

### 2.5.7. Kazımalı korozyon

Birbirine temas eden ve yük altında çalışan iki metal arasında gerçekleşmektedir. Metallerin birbirine sürtünmesi sonucunda ortama giren oksijen, korozyon oluşumuna neden olur. Bozunan yüzeylerin görünümü çok sayıda oksit parçaları ile çevrelenmiş çukurcuklardan oluşur. Başlangıçta parçaların teması yüzeylerin çıkıntılı kısımlarının birbirlerine değmesi ile sağlanır. Yüksek gerilme altında birbiriyle kaynayan sivri uçlar parçaların kayma hareketi sırasında kazınırlar ve ara yüzeye giren havanın oksijeni ile oksitlenirler. Böylece oluşan oksit parçacıklarını ara yüzeyden uzaklaştırma olanağı yoktur. Bunlar genellikle serttir ve kazıyıcı ortam olarak etkilidirler. Olay kazınan parçaların oksitlenmesi ile tekrarlanarak sürdürülür. Şekil 2.46.'da vibrasyon nedeni ile aşınarak kazımalı korozyon hasarı sistemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.46. Kazımalı korozyon- vibrasyon nedeni ile aşınma [113]

### 2.5.8. Atmosferik Korozyon

Metallerin atmosferik korozyonu, günlük yaşamın çeşitli etkilerine maruz kalması sonucu oluşur. Atmosferik nemin yoğunlaşması nedeniyle metal yüzeylerde oluşan çığ



damlaları, elektrolit olarak korozyonu kolaylaştırır. Bu damlacıkların altındaki korozyon mekanizmaları, klasik olarak bilinen toplu elektrolit korozyonundan farklıdır [114].

Atmosferik korozyon en sık karşılaşılan korozyon türüdür. Köprüler, demiryolları, endüstriyel çelik yapılar vb. yapılar sürekli olarak atmosfer etkisinde kalmaktadır. Endüstriyel olarak kirlenmiş atmosferin etkisinde kalan çelik yapılar hızlı bir şekilde korozyona uğrar. Çeliğin atmosfer içindeki korozyon hızı, su altı ve yer altı korozyon hızına göre çok az olmasına rağmen, atmosferik korozyonun neden olduğu kayıplar, toplam korozyon zararının hemen hemen yarısını oluşturmaktadır.

Atmosferik korozyon hızı, meteorolojik şartlara ve endüstriyel kirlenme derecesine bağlıdır. Atmosferler korozyon açısından dört grup altında toplanır. Bunlar, hafif korozif atmosfer, orta korozif atmosfer, korozif atmosfer ve şiddetli korozif atmosferlerdir.

Atmosferik korozyona dayanım gösteren çelik üzerine ilk çalışmalar 1910 yılından sonra, çeliğe vanadyum eklenmesi ile başlamıştır. Bundan sonra ki çalışmalar çeliğe alaşım elementlerinin ilaveleriyle devam etmiştir [115].

### **2.5.9. Mikrobiyolojik Korozyon**

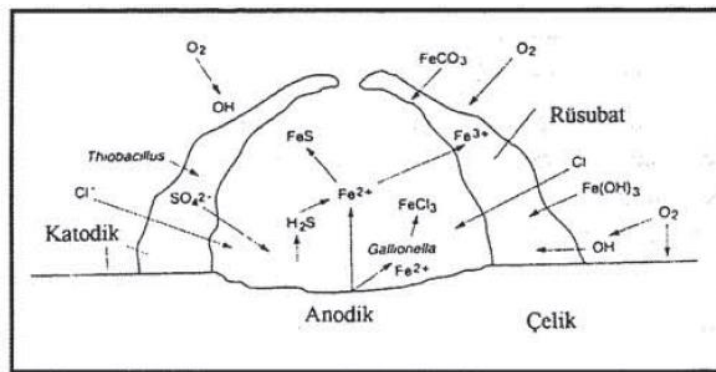
Metal yüzeyi ile mikroorganizmaların kurduğu etkileşim sonucunda elektrokimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir (Şekil 2.47.). Bu reaksiyonlar metalin çözünerek korozyona uğramasına neden olmaktadır [116, 117]. Metaller üzerindeki ilk mikrobiyolojik korozyon raporu Garrett tarafından 1891 yılında yayınlanmıştır [118].

Endüstriyel sistemlerde kullanılmakta olan su standartları içme suyu standartlarından farklıdır ve bu sistemlerde kullanılan sularda mikroorganizmalar bulunmaktadır. Mikroorganizmalar buldukları ortamlarda yüzeylere tutunarak biyofilmleri oluşturur. Mikrobiyolojik korozyon endüstriyel sistemlerde büyük miktarda maddi kayıplara yol açabilir. Metallerin korozyon zararının %20'si mikrobiyolojik kökenli

olduğuna dair çalışmalar vardır [119]. Özellikle uçak endüstrisinde, petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan boru hatlarında, kimya endüstrisinde kullanılan tanklarda, gıda endüstrisinde fermantasyon ünitelerinde, atık arıtım tesislerinde ve enerji endüstrisindeki soğutma sistemlerinde büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Aynı zamanda güvenliği ve sağlığı da tehdit etmektedir [120, 121].

Mikrobiyolojik korozyona neden olan farklı mekanizmalar vardır. Mikroorganizmalar hem metabolizmaları aracılığı ile ürettikleri ürünlerle, hem de buldukları yüzeylerdeki metalleri enerji elde etmek için kullanarak korozyonu hızlandırır [122]. Korozyonda önemli rolleri olan mikroorganizmalar aşağıdaki gibidir;

- Sülfat İndirgeyici Bakteriler
- Kükürt Okside Eden Bakteriler
- Asit üreten bakteriler
- Demir ve mangan indirgeyen bakteriler
- Demir ve mangan oksitleyen bakteriler
- Metan üreten arkeler
- Fotosentetik bakteriler ve algler
- Mantarlar
- Amonyak üreten bakteriler



şekil 2.47. Mikrobiyolojik korozyon oluşum mekanizması [123]

Endüstriyel sistemlerde mikrobiyolojik korozyonun önlenmesi ve kontrolü için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Fakat sistemde oluşan ilk biyofilmden sonra sistemin

biyofilmlerden temizlenmesi pek kolay değildir [124]. Öncelikle sistemler fiziksel olarak temizlenir. Daha sonra mekanik temizlik yapılır ancak her sistemin tasarımı mekanik temizliğe elverişli değildir. Mekanik temizlikten sonra uygun kimyasal temizlik yapılır. Bu temizlikte, mineral ve organik asitler korozyon inhibitörleri ile beraber kullanılır ve metalden çözülmüş iyonlar yüzeyden uzaklaşmış olur [125].

Mikrobiyolojik korozyondan korunmanın önemli bir yolu da malzeme seçimidir. Seçilen metalin veya alaşımın mikrobiyolojik korozyona dirençli olması gerekmektedir. Biyofilm oluşumunun önlenmesi için yaygın kullanılan yöntem mikroorganizmaları öldüren veya üremelerini durduran kimyasallardır. Bu kimyasallara biyosit denir. Fakat biyositlerinde korozif etkisi olabilmektedir. Bu etkileri azaltan ve yüzeylerde koruyucu tabaka oluşumunu sağlayan korozyon inhibitörleri kullanılabilir [126].

#### **2.5.10. Yüksek sıcaklık korozyonu**

Metaller ve alaşımlar üzerinde atmosfer sıcaklığında korozif etkileri çok az olan kimyasal maddeler, yüksek sıcaklıklarda fazlasıyla korozif olabilir. Örneğin; atmosfer sıcaklığında oksijenin çelik üzerinde korozif etkisi, rutubetin bulunmaması durumunda yok denecek kadar azdır. Buna karşın yüksek sıcaklıkta aşırı tahrip edici olabilir. Çelik yapıyı zayıf ve kırılgan demir oksit kütesine dönüştürür [127]. Şekil 2.48.'de ısı değiştirici sistemlerdeki yüksek sıcaklık korozyonuna örnek gösterilmektedir.



Şekil 2.48. Isı değiştiricilerde yüksek sıcaklık korozyonu [127]

Yüksek sıcaklık korozyonunun temel mekanizmaları karbürizasyon, metal tozlaşması, oksidasyon ve sürünmedir. Kısaca bunları tanımlamak gerekirse; karbürizasyon, metal yüzeyinin bulunduğu ortamdan karbon absorbe etmesi sonucu gelişir. Bu durum metallerin yüksek sıcaklıkta karbon yoğun (metan, karbonmonoksit v.b.) gazlara maruziyet sonucunda çoğunlukla proses fırınlarında gözlenir. Malzeme özellikleri bozulur, metal sertliği yükselir, genelde malzeme kırılma hızıyla veya metal tozlaşması ile ömrünü tamamlar.

Oksidasyon, metal yüzeyinde oksitleyici gazlar ile oluşan reaksiyon sonucunda meydana gelen oksidasyon progresif olarak malzeme kaybına yol açar. Genellikle yüzeyde metal oksitler koruyucu bir tabaka oluşturarak zamanla gazların difüzyonunu azaltır korozyon hızının yavaşlamasına yol açar. %1-100 aralığında ki oksijen konsantrasyonu genellikle oksidasyon hızını önemli ölçüde etkilemez. Karbon çelikler 560°C ye kadar yeterli direnç gösterir fakat üzerinde çok hızlı bozunurlar. Krom, krom-nikel alaşımlara daha yüksek mukavemete sahiptir [107].

Sürünme, malzemelerin stres altında yüksek sıcaklıkta verdikleri hizmet sırasında zamana bağlı olarak oluşan bozunmadır. Bozunma hızı malzemeye, sıcaklığa ve maruz kalınan kuvvetlere bağlıdır. Hasar kalıcı uzama ve tane sınırlarında oluşan boşluklar ile başlar zamanla çatlak ve sonuç olarak yarıma ile neticelenir.

### **2.5.11. Erozyon korozyonu**

Endüstride kullanılan pek çok malzeme, kullanım alanlarına bağlı birtakım sıvılarla temas etmektedir. Bu temaslara bağlı olarak hasara uğrayabilmektedir. Sıvının asitlik-bazlık gibi karakteristik özelliklerine bağlı olarak malzeme çeşitli şekillerde kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara uğrayarak korozyona maruz kalmaktadır. Malzeme bu tür sıvıların özellikle akış halinde ve içerdiği bazı aşındırıcı maddelere maruz kalmak koşuluyla aşınmaya uğramaktadır. Buna erozyon etkisine maruz kalması denilebilir. Bu iki etkinin malzemeye aynı anda etki etmesi sonucu malzeme, erozyon korozyonuna maruz kalmış ve hem kimyasal hem de mekanik olarak hasar görmüş olur [128].

Erozyon katı yüzeyden progresif olarak oluşan malzeme kaybı olarak da tanımlanabilir. En yaygın iki erozyon tipi; sıvı veya gaz akışının taşıdığı partiküllerin aşındırma etkisi ile veya gaz akışında taşınan sıvı damlacıkların darbesi sonucu oluşur. Akış yönünün değiştiği dirsekler T noktaları gibi alanlar en yoğun şekilde etkilenir (Şekil 2.49.).

Erozyon ve aşınma farklı kavramlardır. Aşınma, yavaş hareket eden partikül veya yüzeylerin mekanik yük altında diğer yüzeyden malzeme kaldırması sonucu oluşur. Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyonda meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni, oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Erozyonlu korozyon olayı daha çok hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda görülür.



Şekil 2.49. Boru ek yerinde erozyon korozyonu [127]

## 2.6. Korozyon Hızı Belirleme Yöntemleri

Bir metalin birim zamanda çözünme miktarı korozyon hızını verir. Korozyon hızı metal ve alaşımlarının korozyona karşı dayanıklılığının belirlenmesi için önemlidir. Korozyon hızı zamanla yavaşlayan eğilimdedir. Korozyon hızı tespiti için kullanılan yöntemlerin temel amacı korozyon sonucunda meydana gelen kütle kaybının hesaplanmasıdır. Bilimsel çalışmalarda korozyon hızı genellikle akım yoğunluğu ile ifade edilmektedir. Birim metal yüzeyinden, birim zamanda geçen akım miktarı korozyon hızını verir. Faraday yasasına göre 1 Faraday akımı devreden geçtiğinde anotta 1 eşdeğer gram madde iyon hale geçer. Korozyon hızı  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  olarak verilir.

Korozyon hızı belirleme yöntemleri; Kütle kaybı yöntemi ve Elektrokimyasal yöntemler olmak üzere çeşitlenir [97].

### 2.6.1. Kütle kaybı yöntemi

Korozyon hızı belirlemede en yaygın kullanılan yöntemdir. Ağırlık azalması yöntemi bazı araştırmacılar tarafından korozyon hızı belirlemede “Altın Standart” olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde yüzeyi tozdan ve kirden arındırılmış metalin kütlesi ölçülür. Metal korozyona maruz bırakılır ve ardından yüzeyi temizlenerek tekrar kütlesi ölçülür [129].

Kütle kaybı yönteminde Denklem 2.11’de verildiği gibi Faraday yasası ile korozyon akımı hesaplanabilir.

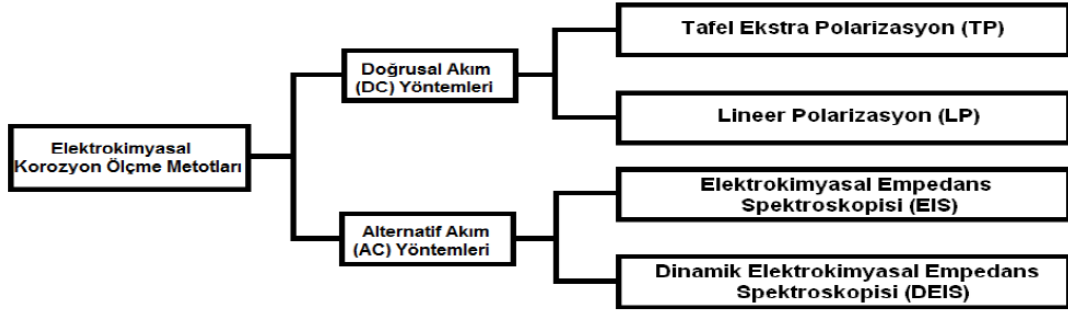
$$i_{cor} = \frac{\Delta m \times F \times n}{\Delta t \times M} \quad (2.11)$$

Denklemde F Faraday sabiti,  $\Delta m$  kütle kaybı, n metalin yükseltgenmesi sırasında verdiği elektron sayısı, M metalin mol kütlesi,  $\Delta t$  ise zaman aralığıdır [130].

### 2.6.2. Elektrokimyasal yöntemler

Korozyon hızının daha kısa sürede ölçülmesini elektrokimyasal yöntemler mümkün kılar. Korozyon hızı belirlemede birçok elektrokimyasal yöntem kullanılır. Çalışması yapılan sistemde korozyon mekanizmasının iyi bir şekilde analizi için uygulanan yöntem çok önemlidir [131]. Elektrokimyasal yöntemlerle korozyon hızının belirlenmesinde temel ilke, korozyona uğrayan metal üzerindeki anot ve katot yüzeyler arasındaki akımın ölçülmesidir. Galvanostatik ve potansiyostatik teknikler bu doğrultuda kullanılmaktadır. Galvanostatik yöntemle incelenen elektroda aktif olmayan yardımcı elektrot ile anodik veya katodik yönde sabit dış akım uygulanır. Dış akım altında belirli süre beklenir ve elektrot potansiyeli tekrar ölçülür. Potansiyostatik yöntemle incelenen elektronun potansiyeli bir potansiyotat ile sabit tutularak bu potansiyelle karşılık gelen akım ölçülür. Ardından başka bir potansiyelde ölçüm

yeniden alınır. Potansiyostat, uygulanan dış akımı ayarlayarak elektrot potansiyelinin ölçüm boyunca sabit tutulmasında görevlidir. Şekil 2.50.'de elektrokimyasal yöntemler gösterilmektedir [132].



Şekil 2.50. Elektrokimyasal korozyon ölçme yöntemleri [132]

### 1. Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Korozyona uğramış metalin anodik reaksiyonu yanında başka bir katodik reaksiyon meydana gelmektedir. Elektrot yüzeyinde anodik ve katodik olmak üzere iki farklı reaksiyonun dengesiyle oluşan karma potansiyel/ korozyon potansiyeli oluşur. Anodik reaksiyonlar ve katodik reaksiyonlar için aşırı gerilmeler ile akımın logaritması arasında polarizasyon eğrileri çizilerek korozyon potansiyeli ( $E_{cor}$ ) ve potansiyele karşılık gelen korozyon akımı ( $i_{cor}$ ) değerleri bulunabilmektedir. Aşırı gerilme ile uygulanan dış akımın logaritmasının lineer olarak değiştiği bölge Tafel bölgesidir. Tafel bölgesinde doğrunun eğimi deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesinde kullanılmaktadır [109].

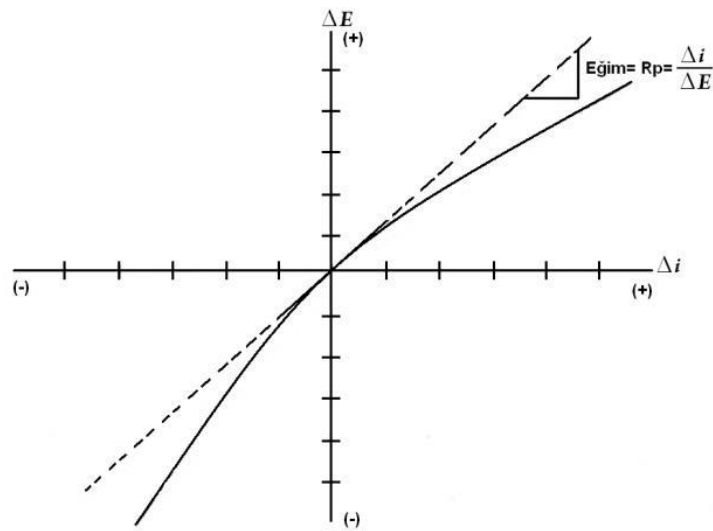
Polarizasyon eğrilerinin Tafel bölgelerinin korozyon potansiyeli ile ekstrapolasyonu ile korozyon akımı bulunmaktadır. Fakat anodik ve katodik Tafel bölgelerinin birlikte elde edilemediği durumlarda bir tanesinin korozyon potansiyeline ekstrapolasyonu ile korozyon hızı belirlenebilir. Akım-potansiyel eğrileri, akım veya potansiyellerden birinin kontrollü bir şekilde değiştirilmesiyle diğerinin aldığı değerler grafik üzerine geçirilerek elde edilir. Deneysel sonuçları grafiğe geçirildiğinde doğruların uzatılır ve kesim noktalarında sistem için korozyon hızı belirlenir [133].

## 2. Lineer Polarizasyon Yöntemi

Bu yöntemin teorik temelleri Stern-Geary (1957) tarafından atılmıştır. Korozyon potansiyeli doğrusal akım-potansiyel değişimi grafiği eğiminden polarizasyon direnci bulunur ve Stern-Geary eşitliğinde yerine yazılarak korozyon hızı hesaplanabilir. Uygulanan akım değişikliği ( $\Delta I$ ) etkisiyle oluşan potansiyel farkı ( $\Delta E$ ) arasında Denklem 2.12'de ki gibi bir bağıntı bulunmaktadır.

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 i_{cor} (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad (2.12)$$

Verilen denklemde korozyon akımı ( $i_{cor}$ ), anodik ve katodik ( $\beta_a$  ve  $\beta_c$ ) Tafel doğrularının eğimleridir.  $R_p$  polarizasyon direnci ise korozyon potansiyeli etrafındaki doğrusal akım-potansiyel değişiminin eğiminin tersidir. Denklemde ki  $\beta_a$  ve  $\beta_c$  değerleri kesin olarak bilinmediği durumlarda  $\beta_a = \beta_c = 0,12$  V olarak alınabilir. Değerler yerleştirildiğinde  $\beta$  ile ifade edilen bir sabit elde edilir. Bu değer 26 mV olarak kabul edilmektedir [130, 134, 135, 136].



Şekil 2.51. Polarizasyon direnci yönteminin uygulanması [137]

Polarizasyon direncinin tersi korozyon hızı ile orantılıdır. Eğer anodik ve katodik tepkimelerin Tafel sabitleri elde edilebilirse korozyon hızı formülden bulunabilir. Şekil 2.51.'de görülen eğrinin korozyon potansiyeli civarında çizgisel olduğu görülmektedir.



Eğrinin eğiminden  $\Delta I/\Delta E$  yani polarizasyon direncinin tersi belirlenerek, korozyon hızı akım yoğunluğu hesaplanır [137].

### 3. Alternatif Empedans Yöntemi

Metal ile çözelti ara yüzeyinde oluşan ikili tabakanın alternatif akım uygulanması ile empedansının ölçülmesi yöntemidir. Bu yöntemin uygulanmasında, ikili tabaka kapasitesi ve metal yüzeyi ile çözeltinin iç kısmı arasındaki dirençlerden oluşan bir elektronik eşdeğer devre oluşturularak polarizasyon direnci belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen polarizasyon direnci değeri Stern-Geary eşitliğinde yerine yazılarak korozyon hızı hesaplanır [138].

## 2.7. Korozyon Tespit Yöntemleri

Endüstride korozyonun izlenmesi ve tüm ekipmanların emniyetli bir şekilde gözetilmesi önemlidir. Kimya ve petrokimya fabrikalarında korozyon kontrollerinden sorumlu personeller bulunmalıdır. Bu personellerin yaptığı kontrollerin temel amacı, ekipmanların tasarım aşamasında öngörülen ortamlarda bulunup bulunmadığı ve tasarım parametrelerinin değişimini belirlemektir. Korozyon oluşması halinde meydana gelen kayıpların öngörülen sınırlar içinde olup olmadığı, sıvı taşıyan boruların duvar kalınlığı, çatlama ve aşınma gibi mekanik arızaların oluşma durumları sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Prosesler ve kullanılan metaller kendi içinde değerlendirilerek belirlenen periyotlarda belirlenen yöntemlerle muayene edilmelidir.

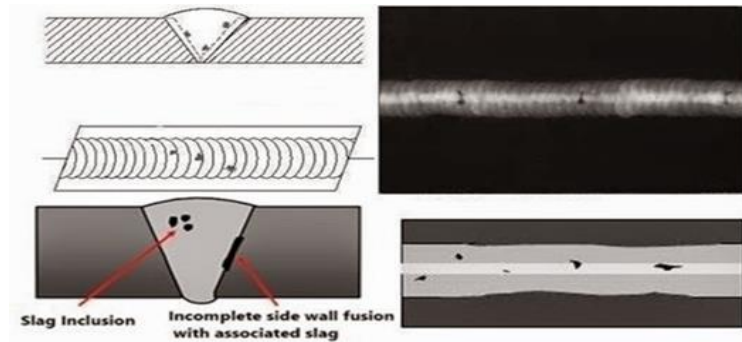
Korozyon tespit amacıyla kullanılan tahribatsız deneyler şu şekilde sıralanabilir;

1. Görsel muayene
2. Radyografik muayene
3. Ultrasonik muayene
4. Eddy akımı deneyi
5. Manyetik parçacıkla muayene
6. Penetrant muayene

## 7. Termal yöntemler

Görsel Muayene; malzeme yüzeyinde oluşan süreksizliklerin ve yapısal bozuklukların optik bir yardımcı ile veya çıplak göz ile kontrol edilmesi yöntemidir. Genel olarak basit bir yöntem olarak görülmese de önemi büyüktür. Başka bir tahribatsız yöntem uygulanmadan önce görsel muayene yapılması gerekmektedir.

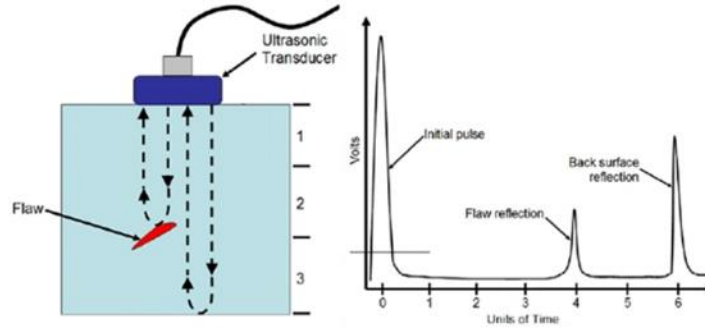
Radyografik Muayene; yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar malzeme yüzeylerine nüfuz edebilir. Malzemeye nüfuz eden dalgalar malzemenin diğer tarafına koyulan ışınımaya duyarlı filmleri de etkileyebilir. Bu filmler daha sonra banyo işlemine tabi tutulduklarında ışınımın içinden geçtiği malzemenin iç kısmının görüntüsü ortaya çıkar. Bu görüntü malzeme içindeki boşluklar veya kalınlık / yoğunluk değişiklikleri nedeniyle oluşur. Malzemenin içinin bu şekilde görüntülenmesi radyografi olarak adlandırılır [139, 140]. Şekil 2.52.'de bir kaynak bölgesinin radyografik muayene ile incelemesi gösterilmektedir.



Şekil 2.52. Kaynak bölgesi radyografik muayene [107]

Ultrasonik Muayene; metale gönderilen yüksek frekanslı ses dalgaları izledikleri yol boyunca herhangi bir engelle çarptığında yansıma yapar. Bu yansımalar çarpma açısına bağlı olarak sinyal alıcılara gelir veya isabet etmez. Alıcılara ulaşan sinyaller ultrasonik muayene cihazı ekranında yankı belirtisi oluşturur. Yankı konumuna göre muayene parçasının içindeki koordinatlar hesaplanabilir. Yankıların yükseklikleri yansıtıcının büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Sinyallerin şekillerine göre yansıtıcıların türü hakkında bilgi sahibi olunabilir [139].

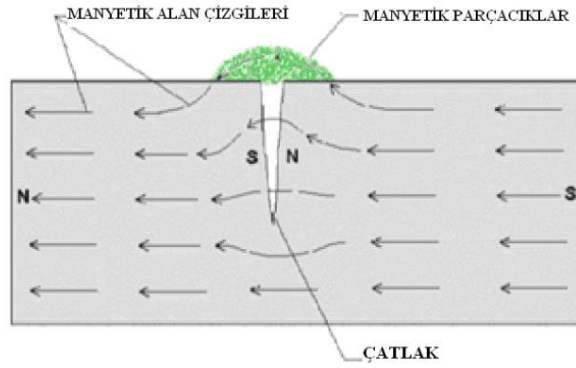
Ultrasonik ölçüm cihazlarının boyutlarının küçük olması arazide kullanılması açısından faydalı olmaktadır. Ultrasonik muayeneler korozyon kontrolü amacı dışında, kalınlık ölçümlerinde, yüzey düzgünlüğü kontrollerinde ve çatlak kontrolünde kullanılmaktadır. Şekil 2.53.'de ultrasonik muayene yöntemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.53. Ultrasonik muayene [107]

Eddy Akımı Deneyi; bu deney elektromanyetik indüksiyon akımına dayanmaktadır. Deneye tabi tutulacak elemanın çevresinde bir bobinden alternatif akım geçirilir ve elemanın üzerinde eddy veya indüksiyon akımı oluşturulur. Manyetik alanda oluşan ikinci akım devresindeki değişimler ölçülür. Bu sisteme göre korozyon ölçümleri için probolog cihazlar geliştirilmiştir. Manyetik olmayan borularda çukur, stres ve çatlak tipi korozyonlar belirlenebilmektedir [141].

Manyetik Parçacıkla Muayene; yüzeyde oluşan düzensizliklerin tespiti için kullanılan bir yöntemdir. Oluşan hataların yüzeyin hemen altında olması durumunda da doğru sonuç vermektedir. Muayene edilecek elemanın yüzeyine manyetik akı uygulanmasıyla yüzeyde bulunan süreksizliklerde, yüzeyde toplanma durumuna göre kaçak akım oluşur. Bu esnada elemanın yüzeyine ferromanyetik tozlar serpiştirildiğinde tozlar kaçak akımlar tarafından çekilir ve süreksizliklerin üzerinde toplanmış olur. Bu yöntemle süreksizliklerin yerleri tespit edilir. Şekil 2.54.'te manyetik parçacıkla muayene yönteminin şematik gösterimi gösterilmektedir.



Şekil 2.54. Manyetik parçacıkla muayene şematik gösterimi [142]

Penetrant Muayene; yüzey hatalarının tespitinde kullanılan bir yöntemdir. Muayenede doğru sonuç yüzeyde oluşan hatalar için elde edilmektedir. Yüzeye açık olmayan bölgelerde oluşan hatalarda bu yöntem doğru sonuç vermemektedir. Yüzeye açık süreksizlikler içerisinde kapiler etki ile işlemiş penetrant sıvısı geliştirici sayesinde tekrar yüzeye çekilerek süreksizlikler tespit edilir (Şekil 2.55.). Süreksizlikler çatlak şeklindeyse çizgisel belirti oluşur; gözenekler şeklindeyse yuvarlak belirtiler meydana gelir [139].



Şekil 2.55. Penetrant muayene [107]

Termal Yöntemler; malzemeler ısıtılarak aralarındaki bağların kontrol edilmesi yöntemidir. Malzeme yapısında değişiklik olması durumunda ısı enerjisinin akışında kesintiler olur. Sıcaklık değişimi yüzeyden kontrol edilerek kesinti olan bölgeler tespit edilir. Termal bir yöntem de malzeme yüzeyine ısıya duyarlı kaplamalar yapılarak, kaplamanın sıcaklık etkisiyle erimesi ya da renk değiştirmesi ile süreksizliklerin

tespitidir. Sıcaklığın düşük olduğu bölgelerde çatlaklar ve kopukluklar olduğu anlaşılır [141].

## **2.8. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler/Korunma Yöntemleri**

Metalin bulunduğu ortam içerisinde korozyonunu önlemek veya korozyon oluşum hızını azaltmak amacıyla belli başlı önlemler alınır. Korozyondan korunma yöntemleri tasarım, malzeme seçimi ve koruyucu kaplamalar ile olmak üzere sıralanabilir [98]. TUCSA tarafınca hazırlanmış Yapı Çeliği İşleri Teknik Şartnamesi'nde korozyondan korunma yöntemleri açıklanmıştır. Şartnameye göre yapının kullanım ömrünün bir yılı aşmaması durumunda ve ihmal edilebilir korozyon etkisine sahip ortamda ise korozyondan koruma için özel tedbir alınmasına gerek duyulmamaktadır. Diğer durumlarda ise gerekli tedbirlerin alınması gerekmektedir [143]. Korozyonun önlenmesi için; tasarım, malzeme seçimi ve koruyucu kaplama yöntemleri incelenmelidir.

### **2.8.1. Tasarım**

Tasarım aşamasında farklı metallerin birleştirilmesi durumunda bu metallerin korozyon özelliklerinin incelenmesi ve metallerin temasını engelleyecek yalıtımların yapılması gerekmektedir. Projelendirmede su birikmelerine karşı tasarım önlemleri alınmalıdır. Pürüzlü yüzeylerin su birikmelerine neden olmaması için boya uygulamaları bitişleri pürüzsüz olmalıdır. Çatlakların ve deliklerin oluşmasına karşı gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir [144]. Çelik konstrüksiyonun tasarımında korozyon etkilerinin hesap edilmemesi durumunda gelecekte boyama ve diğer yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulacaktır. Daha sonra yapılacak olan bakım ve onarımlar maliyet açısından olumsuz etki yaratacaktır.

### **2.8.2. Malzeme seçimi**

Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken öncelikli unsur güvenliktir ve bununla birlikte ekonomiklikte göz önünde bulundurulması gerekir. Güvenlik koşulları dikkate

alınarak malzemenin ömründe bir miktar korozyon oluşumuna izin verilebilir. Demir madeninden elementler çıkarılır veya eklenerek korozyon direnci artırılabilir. Örneğin; çelik malzemeye yaklaşık %0,2 oranında bakır ilavesi veya diğer elementlerin eklenmesiyle çeliğin korozyon direnci artırılabilir [104].

Petrol rafinelerinde yüksek basınç proses ekipmanları için basınç ve sıcaklığa göre hesap yapılarak ekipman/et kalınlığına proseste beklenen korozyon hızına uygun dizayn ömrü ile çarpılan korozyon payı eklenir. Korozyon payı bu prosesler için genellikle 1,5-6 mm arasındadır.

### **2.8.3. Elektrokimyasal yöntemler**

Elektrokimyasal yöntemler katodik koruma ve anodik koruma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Katodik koruma; Metal yapıyı korumak için gerekli elektronlar galvanik hücrelerden (magnezyum-çinko vb.) elde edilir. Seçilecek anot maddesinin korunması planlanan metalin potansiyelinden daha aktif olmalıdır. Dışardan elektrik akımına ihtiyaç olmadığından bu sistemle yapılan korumaya kurbanlık sistemli koruma denilir. Galvanik sistemli korumada ilk tesis maliyeti genellikle daha pahalı olmakla birlikte bu sistem çok az işletme ve bakım masrafı gerektirir. Anodik koruma; metale anodik yönde dış akım uygulanarak metalin pasiflik potansiyeline ulaşması sağlanır. Anodik koruma pasifleştirme işlemidir ve sadece pasifleşme özelliği olan metallerde uygulanabilmektedir. Anodik korumada potansiyel ve akım kontrolü titizlikle yapılmalıdır. Sistemde bir sorun olması durumunda korunan metal hızla korozyona uğrayabilir. Anodik koruma genellikle şiddetli korozyon olayının olduğu ortamlarda korozyon hızını düşürmek amacıyla tercih edilir.

### **2.8.4. Koruyucu kaplama**

Çelik elemanların elektrokimyasal ve fiziksel etkilere karşı korunması için çeşitli kaplama yöntemleri bulunmaktadır. Çevresel koşullar, ekonomi ve malzeme özelliklerine göre kaplama türü seçilebilir. Çevre koşulları, ekonomik ömür,

tekrarlanma gereği gibi hususlara göre kaplama ya da boya arasında tercihte bulunulur [144].

#### 2.8.4.1. Püskürtme yöntemi ile metalik kaplama

elik malzeme yüzeyi temizlendikten sonra eriyik haldeki çinko/alüminyum sıcak Şekilde malzemenin üzerine püskürtülür. TS EN ISO 14922-1 de verilen oranlarda çinko/alüminyum alaŐımı olmalıdır. Püskürtme işlemi yapılacak yüzeyler soğuk olduğunda astar tabakayla kaplanır ve tabaka üzerine yapılacak boya işlemi titizlikle yapılır. Termal püskürtme kalınlığı ve boya kalınlığı EN ISO 19840'de belirtildiği gibi olmalıdır [143]. Şekil 2.56.'da püskürtme yöntemi ile metalik kaplama yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.56. Püskürtme yöntemi ile metalik kaplama [1]

#### 2.8.4.2. Elektrolit Yöntemi ile Metalik Kaplama

Bu kaplama yönteminde katot olan metal, anot kaplama malzemesi ile dolu çözelti banyosuna daldırılır (Şekil 2.57.). Daha sonra bir elektrot ile doğru akım kaynağına bağlanır. Böylece anot kaplama malzemesindeki iyonlar indirgenip katot malzeme yüzeyini kaplar. Elektrolit yöntemiyle kaplamalar hidrojen zengin bir yapıda olduğu için kırılabilirlik gösterebilir. Küçük bir çatlak oluşması durumunda korozyon bu bölgeden ilerler. Köşe, çıkıntılar ve kenarlarda yüksek elektrik alanı oluŐturduđundan

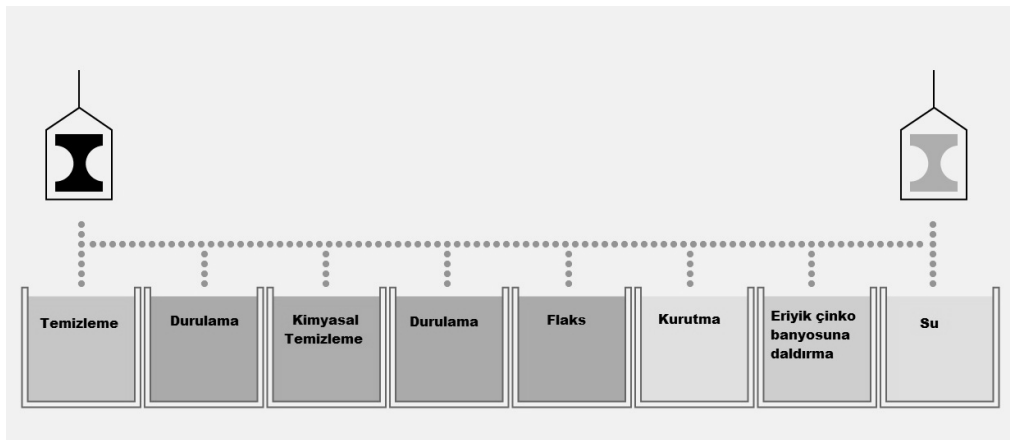
dolayı düz alanlara göre daha önce kaplanır. Üniform kaplama olmasına dikkat edilmelidir [145, 146].



Şekil 2.57. Elektrolit çözelti banyosu [146]

#### 2.8.4.3. Sıcak daldırma yöntemi ile metalik kaplama

450°C de erimiş çinko ile dolu banyolara metal malzemenin daldırılıp metal yüzeyin çinko ile sargılanması yöntemidir. Malzemenin bu şekilde korozyona karşı dirençli olması işlemine sıcak daldırma galvanizleme de denmektedir. Galvanizleme işlemi kalınlığı TS EN 2808'e göre yapılmalıdır. Kontrolleri ise EN ISO 19840 veya TS EN ISO 12944-5'e göre yapılmalıdır. Yapı elemanlarında cıvatalar 10 mikron, somunlar 50 mikron, küreler ise 15-20 mikron arası galvaniz kaplama ile kaplanmaktadır [143]. Şekil 2.58.'de sıcak daldırma galvaniz prosesi gösterilmektedir.



Şekil 2.58. Sıcak daldırma galvaniz prosesi [147]



#### 2.8.4.4. İnorganik kaplamalar

Kaplanacak metaller bileşimleri uygun hazırlanmış havuzlara daldırılır ve bu sayede ortamda oluşan reaksiyonlarla metalin yüzeyinde tuz içeren tabaka oluşur. Örnek olarak fosfatlama işlemi verilebilir. Fosfatlama işleminden sonra çinko, alüminyum veya kadminyum vb. elementlerle kromatlama işlemi yapılır. Oluşan fosfat tabakasının üzerine boyama işlemi yapılabilir. Böylece zaman geçtikçe boya tabakası zarar görse bile alttaki fosfat tabakası korozyon oluşumunu engeller [1].

#### 2.8.4.5. Organik (boya) kaplamalar

TS EN ISO 12944 standardında boyalar hakkında detaylı bilgiler bulunmaktadır. Boyalar genellikle estetik amaçlı kullanılsa bile öncelikli kullanım amacı koruyuculuktur. Boyalar genellikle tüm metal yüzeylerine uygulanabilir. Uygulamanın kolaylığı ve ekonomik olması boyaların tercih sebebidir. Metalleri dış ortamdaki ayırdıkları için korozyona karşı koruyuculuk sağlarlar. Boya uygulaması katlar halinde yapılabilir. İlk tabaka genelde metalin korozyona uğramasını engellerken ikinci tabaka su ve oksijen geçişini engeller. Uygun tip boya seçiminde başlıca etkenler ortamın korozif özelliği ve metalin işletme ömrüdür. Boya uygulaması fırça ile, elektrostatik yöntem ile, daldırma ve püskürtme yöntemi ile olmak üzere çeşitli şekillerde yapılabilir [146].

Boya kaplamalar ile korozyondan korunma yönteminin diğer kaplama yöntemlerine göre daha fazla kullanılmasında ki başlıca sebepler sıralanacak olursa; uygulama kolaylığı, ekonomik oluşu ve ulaşılması zor yapılarda uygulanabilir olmasıdır. Sıralanan sebeplerden dolayı boya kaplaması daha sıklıkla tercih edilmektedir [147].

Yapı Çeliği İşleri Teknik Şartnamesinde belirtildiği gibi metalin bulunduğu ortam özelliklerine göre boya seçimi yapılır. Dayanıklılık süreleri katagorilere ayrılmıştır. Bu katagorilere göre ürün seçilip yüzey hazırlanmalıdır. Ardından astar boyanın kat sayısı ve astar boya uygulaması yapılır. Boya işleminde keskin yüzeylerin boyası önceden

yapılmalı. Boyama işlemi özenli yapıp akma ve damlamaların olmamasına dikkat edilmelidir. Katlar homojen kalınlıklarda olmalıdır [143].

### **BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM**

Tez çalışmasının bu bölümünde, deneyde kullanılan profiller, hızlandırılmış korozyon mekanizması, güçlendirme malzemeleri, deney parametreleri ve deney işleyişi anlatılmaktadır.

Korozyonun yapı piyasasında sıklıkla kullanılan S 235 kalite çelik kutu profillerine etkisini araştırmak üzere hızlandırılmış korozyon mekanizması uygulanmış ve korozyona maruz kalmayan profiller dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Farklı korozyon derecelerinde üç noktalı eğilme ve eksenel basınç dayanımlarında meydana gelen düşüşler incelenmiş olup korozyona uğramış kutu profiller çeşitli fiber kumaşlarla güçlendirilmiştir. Karbon, bazalt ve cam kumaşlar ile güçlendirilen profillerin taşıma kapasitelerine etkisi incelenmiştir.

Üretilen deney profillerinin referans profilleri herhangi bir korozyona uğratılmaz iken diğer çelik kutu profiller kütlece % 10 ve % 20 hızlandırılmış korozyona uğratılmıştır. Profiller % 3,5 NaCl içeren çözelti içerisinde 1 Amper doğru akım ile hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmıştır. Profillerin gerekli kütle kayıplarına ulaştığını belirlemek için profiller belirli periyotlarda çözelti havuzundan çıkarılıp yüzeyi temizlendikten sonra tartılmıştır. Yeterli kütle kaybına uğrayan numuneler tekrar temizlenip güçlendirilmiştir. Süreç sonunda profiller üç noktalı eğilme ve eksenel basınç testlerine tabi tutulmuştur. Profillerin farklı fiberler ile güçlendirilme neticesinde yük taşıma kapasiteleri ve davranış özellikleri karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada ki parametreler aşağıdaki gibidir;

- Kutu profillerin korozyon hasarına uğramaması referans durumu, basınç-eğilme

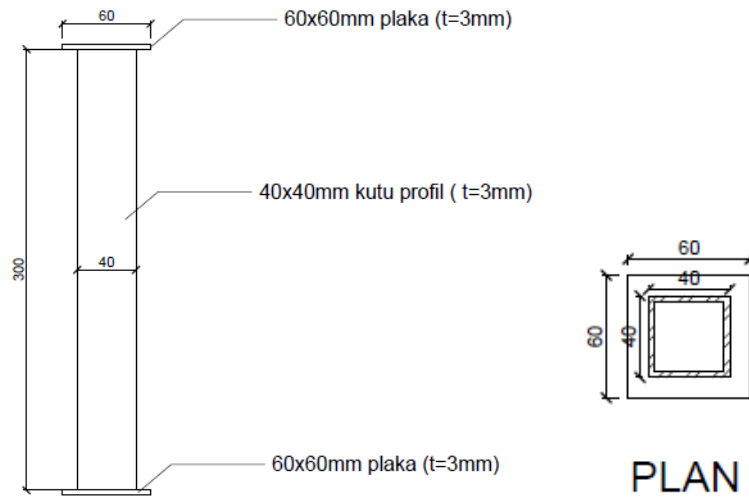
- Kutu profillerin %10 kütlece korozyon hasarına uğraması durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %20 kütlece korozyon hasarına uğraması durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin korozyon hasarına uğramaması ve CFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %10 kütlece korozyon hasarına uğraması ve CFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %20 kütlece korozyon hasarına uğraması ve CFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin korozyon hasarına uğramaması ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %10 kütlece korozyon hasarına uğraması ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %20 kütlece korozyon hasarına uğraması ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin korozyon hasarına uğramaması ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %10 kütlece korozyon hasarına uğraması ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme
- Kutu profillerin %20 kütlece korozyon hasarına uğraması ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu, basınç-eğilme

Deney kapsamında her parametre için 2 adet numune hazırlanmıştır. Bu numuneler ile aksenal basınç ve üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında 48 adet S 235 kalite çelik kutu profil kullanılmıştır.

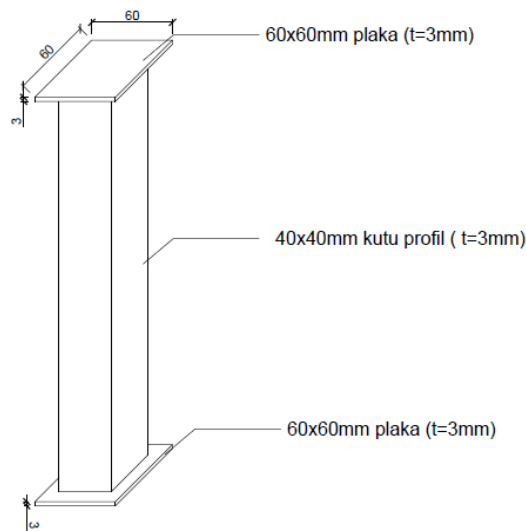
### **3.1. Materyal**

Bu çalışmada S 235 kalite çelik kutu profiller 40 mm kenar ölçüsünde kullanılmıştır. Kutu profillerin et kalınlığı 3 mm olup profil boyları 300 mm'dir. Profil et kalınlıkları ÇYTHYE'nin ikinci maddesinde belirtilen cidar kalınlıklarının içindedir. Kutu profil

boyutlandırmalarında basınç çubukları için narinlik sınır değeri, kiriş elemanlar için ise cihaz yük kapasitesi dikkate alınarak hesap yapıp emniyetli yük için L boyu seçilmiştir. Profillerin 250 mm gövde kısımlarını korozyon hasarına uğratmak amacıyla havuz tabanında olan başlık bölgesi 25 mm uzunluğunda su yalıtım malzemesi kullanılarak korunmuştur. Havuz su seviyesi profillerin 25 mm altında sabit tutulmuştur. Böylece profilin iki ucundanda 25 mm lik kısımlar korozyon hasarından korunmuştur. Deneylerde kullanılan kutu profilinin şematik çizimleri Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Test profilleri çizimleri



Şekil 3.2. Test profilleri çizimleri

Çelik kutu profillerde korozyon olmaması referans durumu için 2 adet (K0-B1 ve K0-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K0-E1 ve K0-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %10 korozyon hasarı durumu için 2 adet (K10-B1 ve K10-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K10-E1 ve K10-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %20 korozyon hasarı durumu için 2 adet (K20-B1 ve K20-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K20-E1 ve K20-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Çelik kutu profillerde korozyon olmaması halinde CFRP ile güçlendirme yapılması durumu için 2 adet (K0-C-B1 ve K0-C-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K0-C-E1 ve K0-C-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %10 korozyon hasarı uğramış ve CFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K10-C-B1 ve K10-C-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K10-C-E1 ve K10-C-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %20 korozyon hasarı uğramış ve CFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K20-C-B1 ve K20-C-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K20-C-E1 ve K20-C-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Çelik kutu profillerde korozyon olmaması halinde BFRP ile güçlendirme yapılması durumu için 2 adet (K0-B-B1 ve K0-B-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K0-B-E1 ve K0-B-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %10 korozyon hasarı uğramış ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K10-B-B1 ve K10-B-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K10-B-E1 ve K10-B-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %20 korozyon hasarı uğramış ve BFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K20-B-B1 ve K20-B-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K20-B-E1 ve K20-B-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Çelik kutu profillerde korozyon olmaması halinde GFRP ile güçlendirme yapılması durumu için 2 adet (K0-G-B1 ve K0-G-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K0-G-E1 ve K0-G-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %10 korozyon hasarı uğramış ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K10-G-B1 ve K10-G-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K10-G-E1 ve K10-G-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır. Kütlece %20 korozyon hasarı uğramış ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu için 2 adet (K20-G-B1 ve K20-G-B2) numuneleri basınç testi için, 2 adet (K20-G-E1 ve K20-G-E2) numuneleri eğilme testi için hazırlanmıştır.

Sıralanan özelliklerde toplam 48 adet deney numuneleri üretilmiştir. 36 adet profile güçlendirme uygulanırken 12 adet profile güçlendirme uygulanmamıştır. Korozyon hasarına uğramayan (Şekil 3.3.) ve korozyon hasarına uğrayan (Şekil 3.4.) ait örnekler aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Korozyon hasarına uğramayan profil örneği



Şekil 3.4. Korozyon hasarına uğrayan profil örneği

Çalışmada kullanılan 48 adet 40x40 mm S 235 çelik kutu profilin dıştan korozyona uğraması için başlık levhalar kaynak yapılarak profil içine elektrolit sıvı girmesi engellenmiştir (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Başlık levha kaynakları

### 3.1.1. S 235 çelik kutu profil

Metallerin uluslararası standartlara uygun bir şekilde üretilmesi kalite ve güvenlik açısından önemlidir. Çekme deneyi, standartlara uygun bir biçimde hazırlanan deney numunelerinin test makinasında belirli bir hızda çekilmesi işlemidir. Çekme deneyi sonucunda elastisite modülü, elastiklik sınırı, akma ve çekme gerilmeleri, tokluk, % uzama ve % kesit daralması gibi mekanik özellikler ortaya çıkar [148].

Çalışmada kullanılan çelik kutu profil, S235 çeliğinden üretilmiş 3 mm et kalınlığında profillerdir. Profil et kalınlığı kütlece korozyon kaybına uğrıtılacak elemanda delinme olmayacak emniyetli kalınlık seçilmiştir. Maksimum %20 korozyon kütlece kaybı için 3 mm et kalınlığı uygun bulunmuştur. Tez çalışmasında kutu profillerin mekanik özelliklerinin kontrolü için kutu profilden üç adet kupon numunesi alınıp aksel çekme dayanımı testi yapılmıştır. Çelik kutu profillerden alınan kupon numuneleri TS EN 6892 Standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Kupon numunelerinin aksel çekme deneyleri Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 3.6.). Basınç ve eğilme deneylerinde kullanılan kutu profillerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla profillerden çekme kupon numuneleri lazer kesim ile hazırlanmıştır. 3 adet S 235 kalite kutu profilden alınan numunelere çekme



deneyi uygulanmış ve çekme özellikleri tespit edilmiştir. Test sonuçları Tablo 3.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Kupon çekme deneyi

Tablo 3.1. Çekme deneyi test sonuçları

Numuneler	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Dayanımlar		Çelik Sınıfı
			Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	
3 mm-1	248,816	312,045	246,762	310,856	S235
3 mm-2	255,125	325,974			
3 mm-3	236,344	294,550			

Deneyleerde kullanılan S235 çeliğine ait numunenin kimyasal bileşimi Tablo 3.2.'de gösterilmiştir. S235 çeliği Erk Demir Çelik San. Ve Tic A.Ş. firmasından temin edilmiştir.

Tablo 3.2. S235 metalinin kimyasal bileşimi (%)

Metal	C	Mn	P	N	S	Si
S235	0,22	1,40	0,05	0,009	0,045	0,30

### 3.1.2. Karbon tek yönlü kumaş (CFRP)

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan karbon kumaş tek yönlüdür. Ürün Spinteks firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kumaşa ait bilgiler Tablo 3.3.'te yer

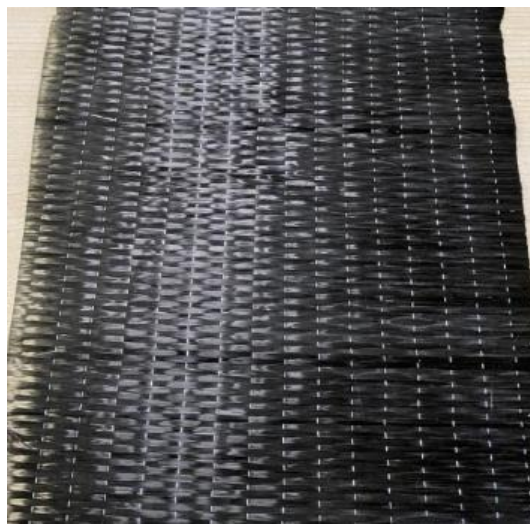
almaktadır. Şekil 3.7.'de kumaşa ait görsel gösterilmektedir. Şekil 3.8.'de yatay yönde CFRP, Şekil 3.9.'da düşey yönde CFRP kumaşlar gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Karbon tek yönlü kumaş özellikleri

Özellik	Değerler
Birim Alanda Kütle ( $\text{g/m}^2$ )	370
Desen	Tek Yönlü Dokuma
Kalınlık (mm)	0,37
Çekme Dayanımı (MPa)	4900
Elastisite Modülü (GPa)	240
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	1,80



Şekil 3.7. Tek yönlü karbon kumaş



Şekil 3.8. Yatay yönde karbon kumaş



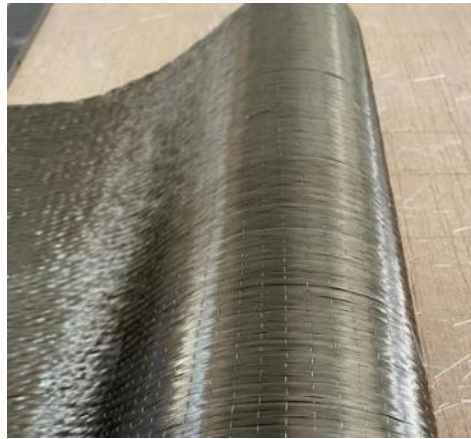
Şekil 3.9. Düşey yönde karbon kumaş

### 3.1.3. Bazalt tek yönlü kumaş (BFRP)

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan bazalt kumaş tek yönlüdür. Ürün Spinteks firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kumaşa ait bilgiler Tablo 3.4.'te yer almaktadır. Şekil 3.10.'da kumaşa ait görsel gösterilmektedir. Şekil 3.11.'de yatay yönde BFRP, Şekil 3.12.'de düşey yönde BFRP kumaşlar gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Bazalt tek yönlü kumaş özellikleri

Özellik	Değerler
Birim Alanda Kütle ( $\text{g/m}^2$ )	380
Desen	Tek Yönlü Dokuma
Kalınlık (mm)	0,40
Çekme Dayanımı (MPa)	3100
Elastisite Modülü (GPa)	86
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	2,63



Şekil 3.10. Tek yönlü bazalt kumaş



Şekil 3.11. Yatay yönde bazalt kumaş



Şekil 3.12. Düşey yönde bazalt kumaş

### 3.1.4. Cam tek yönlü kumaş (GFRP)

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan cam kumaş tek yönlüdür. Ürün Dost Kimya firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kumaşa ait bilgiler Tablo 3.5.'te yer almaktadır. Şekil 3.13.'de kumaşa ait görsel gösterilmektedir. Şekil 3.14.'de yatay yönde GFRP, Şekil 3.15.'te düşey yönde GFRP kumaşlar gösterilmektedir.

Tablo 3.5. Cam tek yönlü kumaş özellikleri

Özellik	Değerler
Birim Alanda Kütle ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	330
Desen	Tek Yönlü Dokuma
Kalınlık (mm)	0,34
Çekme Dayanımı (MPa)	2800
Elastisite Modülü (GPa)	75
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,55



Şekil 3.13. Tek yönlü cam kumaş



Şekil 3.14. Yatay yönde cam kumaş





Şekil 3.15. Düşey yönde cam kumaş

### 3.1.5. Polyester reçine

Deneysel çalışma kapsamında yapılan güçlendirmelerde yapıştırma reçinesi olarak Boytek firmasının BRE 315 polyester reçinesi kullanılmıştır (Şekil 3.16.). Yüksek kimyasal dayanımı ve hidrolitik dayanımlı polyester reçinesine ait teknik bilgiler Tablo 3.6.'da gösterilmektedir. Güçlendirme reçinesi seçiminde 3 adet reçine denenmiştir. Sikadur 330 iki bileşenli epoksi esaslı laminasyon reçinesi ile kutu profiller güçlendirilip basınç ve eğilme testleri yapılmıştır. Spinteks SPN EP 010 epoksi esaslı yapıştırma jeli ile de güçlendirme yapıp basınç ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan Boytek polyester reçinesi ile güçlendirme diğer çalışmalara kıyasla daha yüksek dayanım sergilemiştir.

Tablo 3.6. Takviyesiz reçinenin mekanik özellikleri

Özellik	Değerler
Çekme Dayanımı (MPa)	65
Kopma Uzaması (%)	2,5
Çekme Modülü (MPa)	3600
Eğilme Dayanımı (MPa)	110
Eğilme Modülü (MPa)	3700
Sertlik (Barcol)	40



Şekil 3.16. Polyester reçinesi

### 3.2. Yöntem

Test numunelerini korozyona uğratmak için elektrokimyasal yöntem uygulanmıştır. Hızlandırılmış korozyon yöntemi ile korozyon mekanizmasının normal şartlar altında gerçekleştiğinden daha kısa sürede oluşması sağlanır. Deneyde kullanılacak profillerin korozyona uğraması istenen kısımları Şekil 3.17.'de görülmektedir. Hızlandırılmış korozyon test düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.18. ve Şekil 3.19.'da, şematik görüntüsü ise Şekil 3.20.'de görülmektedir.



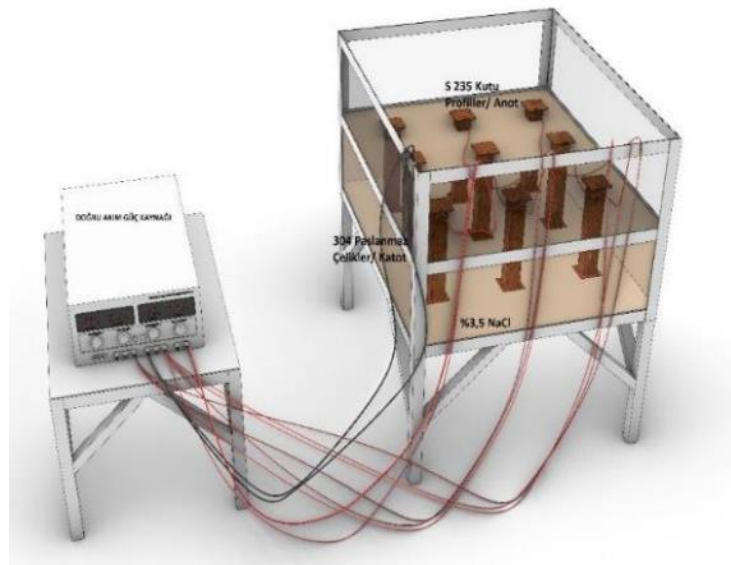
Şekil 3.17. Korozyon hasarına uğrayacak kısımlar



Şekil 3.18. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği



Şekil 3.19. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği



Şekil 3.20. Hızlandırılmış korozyon test düzeneği şematik görüntüsü



Kütlece korozyon hasarına uğratmak için hazırlanan korozyon havuzu %3,5 NaCl elektrolit sıvısı ile doldurulmuştur. Kullanılan NaCl Şekil 3.21.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Çalışmada kullanılan NaCl

Hızlandırılmış korozyon düzeneğinde anot bölgesi S 235 kalite çelik kutu profillerdir; katot bölgesi için 304 paslanmaz çelik levhalar kullanılmıştır. %3,5 NaCl çözeltisine konulan profillere akım verildikten sonra çözelti ile temas eden kısımlar hızlıca korozyona uğrayacaktır. Deney profillerinin alt başlık kısımlarının korozyona uğramasını engellemek amacıyla su yalıtım malzemesi ile kaplama yapılmıştır (Şekil 3.22.). Kullanılan su yalıtım malzemesi Bostik marka Aqua Blocker ürünüdür (Şekil 3.23.). Su seviyesi ayarlanarak üst başlık kısımlarının korozyona uğraması engellenmiştir. Bu sayede çözelti ile profilin sadece 250 mm gövde kısmı temas ederek korozyona uğratılmıştır.



Şekil 3.22. Başlıkların su yalıtım malzemesi ile kaplanması



Şekil 3.23. Kullanılan su yalıtım malzemesi

Kutu profillerin hızlandırılmış korozyona uğratılması için gerekli elektrik akımını vermek amacıyla DS Power Supply RXN-305-II doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Doğru akım güç kaynağı

Anot ve katot olacak numuneler DS güç kaynağına elektrik kabloları ile bağlanmıştır. Numunelere elektrik akımını sağlamak amacıyla krokodiller kullanılmıştır. Deneyler süresince krokodillerin biçimi sabit tutulmuştur. Profillerin hızlandırılmış korozyon testi Fibrobeton Ar-Ge laboratuvarında yapılmıştır. Korozyona uğratılacak kutu profiller 700x700 mm havuzda %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde şartlandırılmıştır. Kütlece %10 ve %20 korozyona uğratılacak profiller 12 adet gruplar halinde havuzda 1 amper akımda hızlandırılmış korozyona tabi tutulmuştur. Faraday denklemi ile kütle

kayıpları hesaplanmıştır. Buna göre bekleme süreleri ortalama olarak bilinmektedir. Doğru akım güç kaynağı 1 amper akım verecek şekilde ayarlanmıştır. Faraday denkleminde atom değerlik katsayısı demir için 3 olarak alınarak hesap yapılmıştır. 12 adet gruplar halinde havuza yerleştirilen profiller test süreci boyunca belirli aralıklarla havuzdan alınıp korozyon atık ürünleri yüzeylerinden temizlenmiştir. Tekrar havuza yerleştirmeden önce profiller tartılıp kütleleri kayıt edilmiştir. Yeni hazırlanan çözelti temizlenmiş havuza eklenerek teste devam edilmiştir.

$$i_{cor} = \frac{\Delta m \times F \times n}{\Delta t \times M} \quad (3.1)$$

Burada,

M: çözünmüş metalin kütlesi, I: akım (A) (1 Amper alınmıştır), t: zaman (sn),  $A_w$ : demir atom birim ağırlığı, n: demir atom değerliliği (Oluşan pas genelde  $Fe(OH)_2$  olduğu için n: 2 veya 3 alınmaktadır), F: Faraday sabiti (96500 coulomb).

Profiller hesaplanan kütle kayıplarına ulaştığında havuzdan çıkarılıp üzerindeki korozyon atıkları kağıt zımpara ile temizlenip su ile profiller yıkanmıştır. Havuzdan çıkarılan profiller Şekil 3.25.'te gösterilmektedir. Temizlenen profillere ait görsel Şekil 3.26.'da görülmektedir.



Şekil 3.25. Hızlandırılmış korozyon havuzundan çıkarılan profiller



Şekil 3.26. Korozyon atıklarından temizlenen profil

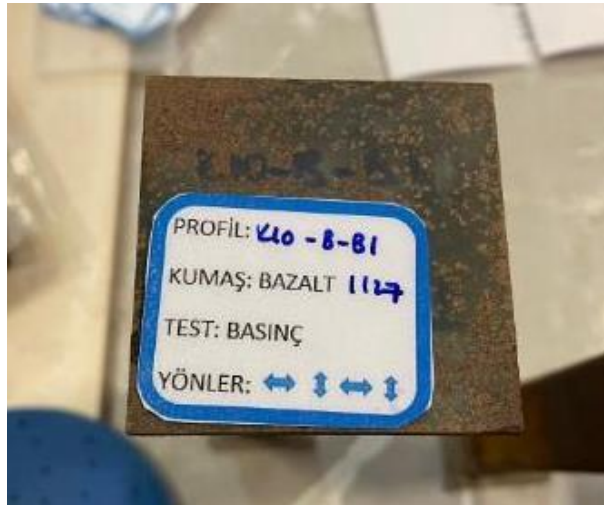
Kontrol profilleri dışında güçlendirilecek profiller kurulama işleminden sonra farklı fiber kumaşlar ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işleminde tek yönlü karbon kumaş, bazalt kumaş ve cam kumaş kullanılmıştır. Profillerin güçlendirme katman sayısı literatürden elde edilen bilgiler ile belirlenmiştir. Toplam güçlendirme kalınlığı ölçüsü ile FRP kumaşlarının tek kat kalınlıkları incelendiğinde optimum 4 kat güçlendirme uygun bulunmuştur. Her kat arasına polyester reçine fırça yardımıyla sürülmüştür. Uygulanacak teste göre kumaş yönleri tayin edilmiştir. Eğilme testi için düşey-yatay-düşey-yatay yönlerde sırasıyla kumaş yapıştırılırken basınç testi için hazırlanan profillerde yatay-düşey-yatay-düşey sıralamasında kumaşlar yapıştırılmıştır. Bu sıralamada basınç etkisinde burkulmaya karşı lif yönlerinin birinci kata yatay olup burkulma dayanımını artırması amaçlanmıştır. Eğilme testi için birinci kat güçlendirmede düşey doğrultuda liflerin uzanması ile eğilme dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Güçlendirme yönleri Tablo 3.7.'de gösterildiği gibidir. Tayin edilen yönlerde kumaşları yapıştırmak üzere kumaşlardan kesimler maket bıçağı yardımıyla yapılmıştır (Şekil 3.27.). Kumaşlar hazırlandıktan sonra çelik profillerin isimlendirme kartları yapıştırılmıştır (Şekil 3.28.). Hazırlanan isimlendirme kartlarında güçlendirme yönleri gösterilmektedir. Güçlendirmesi yapılan kat tamamlandıktan sonra sıralamayı karıştırmamak için yönler işaretlenmiştir.

Tablo 3.7. Testlere göre profil güçlendirme yönleri

	Üç Noktalı Eğilme Testi	Eksenel Basınç Testi
1.Kat	↕	↔
2.Kat	↔	↕
3.Kat	↕	↔
4.Kat	↔	↕



Şekil 3.27. Katlar için kumaş kesimi



Şekil 3.28. Profil isimlendirme kartları



İsmlendirme kartları yapıştırıldıktan sonra güçlendirme öncesi profillere ait görsel Şekil 3.29.'de görülmektedir.

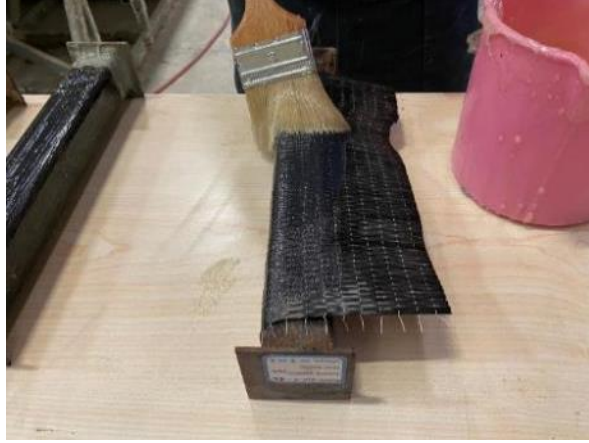


Şekil 3.29. Korozyona uğramış profillerin güçlendirilmeden öncesi

Profillerin ve kumaşların hazırlanmasının ardından birinci kat sargılama yapımı için profil yüzeylerine polyester reçine sürülmüştür (Şekil 3.30.). Kullanılan polyester reçinesine ait bilgiler Tablo 3.6.'da verilmektedir. Reçine sürüldükten 15 dakika sonra birinci kat sargılama elle yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Şekil 3.31.'de CFRP, Şekil 3.32.'de BFRP için birinci kat güçlendirme uygulamaları görülmektedir. Bu şekilde 4 kat sargılama işlemi kumaş yönleri dikkate alınarak tamamlanmıştır.



Şekil 3.30. İlk kat güçlendirme öncesi polyester reçine uygulaması

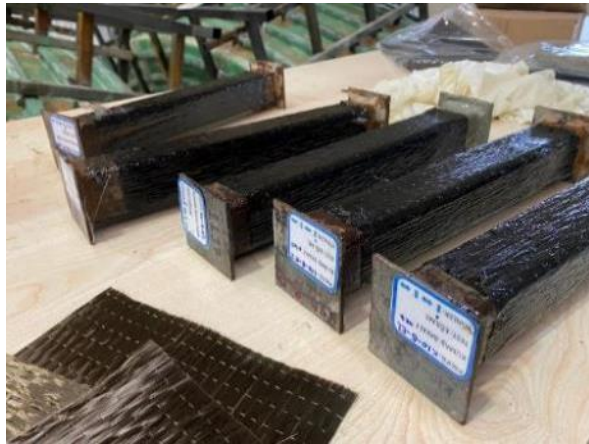


Şekil 3.31. Birinci kat güçlendirme uygulaması (CFRP)



Şekil 3.32. Birinci kat güçlendirme uygulaması (BFRP)

Şekil 3.33.'de BFRP için ikinci kat güçlendirme uygulaması görülmektedir. Şekil 3.34.'te GFRP ile güçlendirmesi tamamlanmış çelik kutu profilleri görülmektedir.



Şekil 3.33. İkinci kat güçlendirme uygulaması (BFRP)



Şekil 3.34. GFRP ile güçlendirmesi tamamlanmış profiller

Şekil 3.35.'te güçlendirme çalışmalarına ait görsel gösterilmektedir.



Şekil 3.35. Güçlendirme çalışması

Güçlendirme işleminden yedi gün kür süresi sonunda basınç ve eğilme testleri yapılmıştır.



### 3.3. Testler

#### 3.3.1. Eksenel basınç testi

Kutu profil numuneleri ağırlık kaybı yöntemine göre %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılmıştır. Korozyona uğratılan numuneler ve referans numuneler 2'şer adet olarak basınç testine tabi tutulmuştur. Basınç deney sonuçları her korozyon hasarı derecesine göre grafik halinde verilmektedir.

Basınç testi için UTest marka servo kontrollü pres cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.36.). Cihazın yük kapasitesi 3000 kN'dur. Alt ve üst plakaların çapı minimum 295 mm'dir. Basınç plakaları arası mesafe en az 340 mm'dir. Çalışma kapsamında basınç testi için yükleme hızı sabit olup 0,5 kN/s olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.36. Basınç test cihazı

Şekil 3.37.'de basınç testine tabi tutulan güçlendirme uygulanmamış çelik kutu profil görülmektedir.



Şekil 3.37. Güçlendirilmemiş profil basınç testi

Şekil 3.38.'de güçlendirme uygulanmış çelik kutu profil görülmektedir.



Şekil 3.38. Güçlendirilmiş profil basınç testi

### 3.3.2. Üç noktalı eğilme testi

Kutu profil numuneleri ağırlık kaybı yöntemine göre %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılmıştır. Korozyona uğratılan numuneler ve referans numuneler 2'şer adet olarak üç eksenli eğilme testine tabi tutulmuştur. Eğilme deney sonuçları her korozyon hasarı derecesine göre grafik halinde verilmektedir.

Eğilme testi için UTest marka servo kontrollü otomatik eğilme presi cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.39.). Cihazın yük kapasitesi 300 kN'dur. Üç noktalı eğilme testi için yükleme hızı sabit olup 2,5 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Üç noktalı eğilme testinde numune yatay olarak mesnetlerin üzerine yerleştirilir. Belirli açıklıkta olan mesnetlerin üzerindeki numuneye kuvvet uygulanır. Bu yöntem, numunenin "V" şeklinde bükülmesine neden olur.



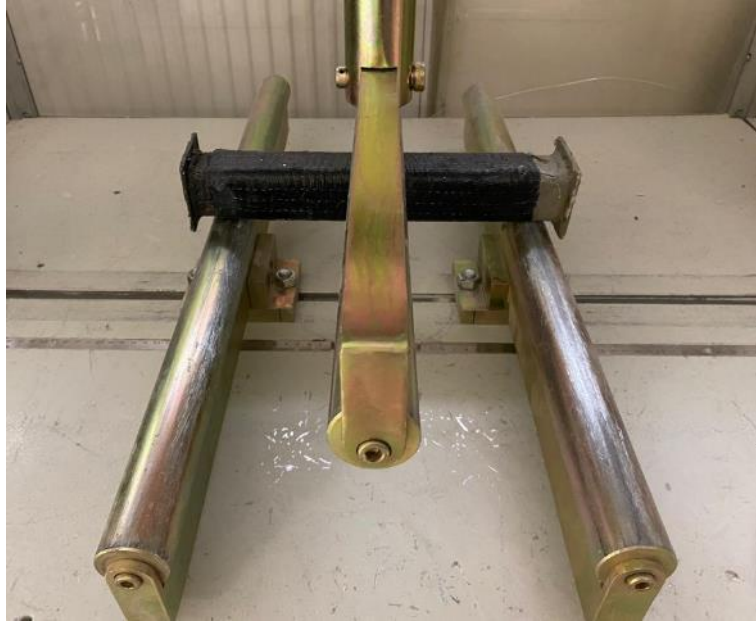
Şekil 3.39. Eğilme test cihazı

Şekil 3.40.'da üç noktalı eğilme testine tabi tutulan güçlendirme uygulanmamış çelik kutu profil görülmektedir.



Şekil 3.40. Güçlendirilmemiş profil eğilme testi

Şekil 3.41.'de üç noktalı eğilme testine tabi tutulan güçlendirme uygulanmış çelik kutu profil görülmektedir.



Şekil 3.41. Güçlendirilmiş profil eğilme testi

## BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Deneysel Sonuçların Korozyon Derecelerine Göre Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında referans durum olarak korozyona uğramamış S 235 kalite çelik kutu profiller kullanılmıştır. Kütlece %10 ve %20 korozyon hasarına hızlandırılmış korozyon test düzeneği ile uğratılan profiller eğilme ve basınç testlerine tabi tutulmuştur. Güçlendirme öncesi farklı korozyon derecelerinde hasara uğratılan profillerin mukavemet özellikleri bu bölümde incelenmiştir.

#### 4.1.1. Korozyon hasarına uğramayan, kütlece %10 ve %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin basınç dayanımları

Korozyon hasarına uğratılmayan ve hızlandırılmış korozyon düzeneği ile %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılan profiller üzerinde basınç testi yapılmıştır. Tablo 4.1.'de profillere ait basınç dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin basınç dayanımları

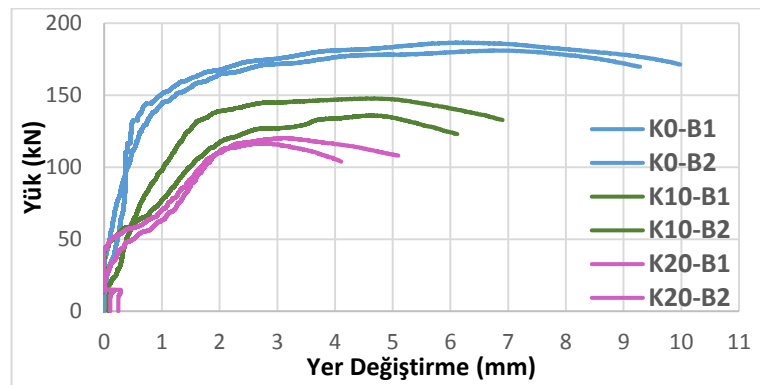
Profil Adı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K0-B1	Basınç	%0	186,45	1703,55
K0-B2	Basınç	%0	181,02	1540,41
K10-B1	Basınç	%10	147,67	883,83
K10-B2	Basınç	%10	135,85	691,22
K20-B1	Basınç	%20	116,55	383,18
K20-B2	Basınç	%20	120,22	491,19

Şekil 4.1.'de %20 kütlece korozyon hasarlı profilin basınç testi sonucunda burkulması görülmektedir.

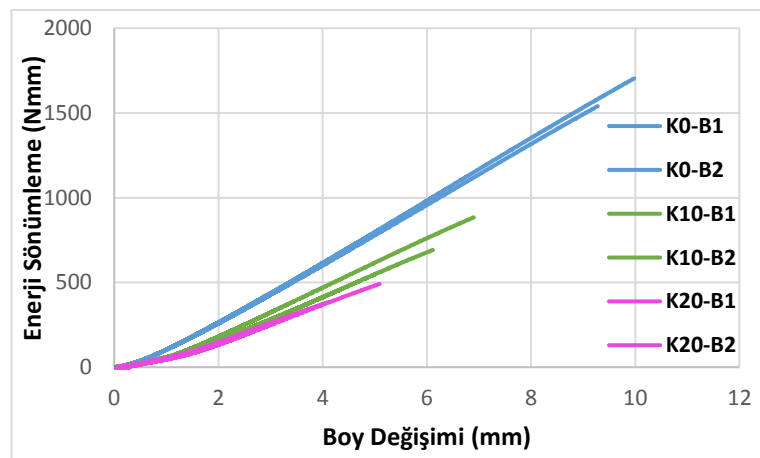


Şekil 4.1. Kütüce %20 korozyon hasarlı profil basınç testi sonrası

Şekil 4.2a.'da farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin basınç testi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 4.2b.'de enerji sönümlenme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.2a. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.2b. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin enerji sönümlenme kapasitesi grafiği

Grafikte görüldüğü üzere artan korozyon hasarı derecelerinde basınç dayanımlarında düşüş olmuştur. Referans profile göre %10 kütlece hasar durumunda maksimum yükte %22,84 düşüş olurken %20 kütlece hasar durumunda %35,57 düşüş görülmüştür.

#### 4.1.2. Korozyon hasarına uğramayan, kütlece %10 ve %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin eğilme dayanımları

Korozyon hasarına uğratılmayan ve hızlandırılmış korozyon düzeneği ile %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılan profiller üzerinde eğilme testi yapılmıştır. Tablo 4.2.'de profillere ait eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.2. Farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin eğilme dayanımları

Profil Adı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K0-E1	Eğilme	%0	34,76	414,74
K0-E2	Eğilme	%0	34,51	432,14
K10-E1	Eğilme	%10	26,78	217,45
K10-E2	Eğilme	%10	27,99	233,34
K20-E1	Eğilme	%20	25,90	213,49
K20-E2	Eğilme	%20	25,86	228,51

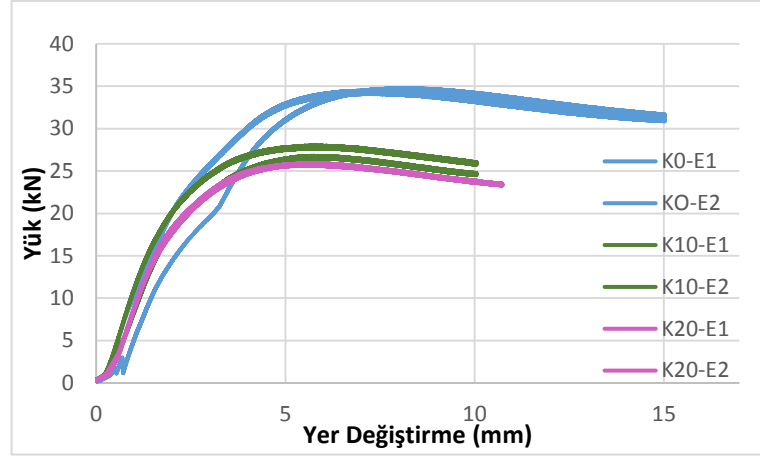
Şekil 4.3.'de %20 kütlece korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası görülmektedir.



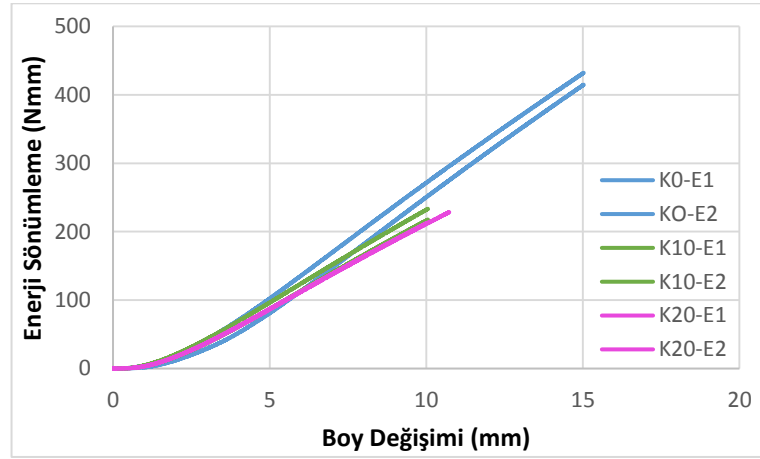
Şekil 4.3. Kütlece %20 korozyon hasarlı profil eğilme testi sonrası

Şekil 4.4a.'da farklı derecelerde korozyon hasarına uğrayan profillerin eğilme testi sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 4.4b.'de enerji sönümlenme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.





Şekil 4.4a. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.4b. Farklı derecelerde hasara uğrayan profillerin enerji sönümlenme kapasitesi grafiği

Grafikte görüldüğü üzere artan korozyon hasarı derecelerinde eğilme dayanımlarında düşüş olmuştur. Referans profile göre %10 kütlece hasar durumunda maksimum yükte %20,91 düşüş olurken %20 kütlece hasar durumunda %25,27 düşüş görülmüştür.

#### 4.2. Deneysel Sonuçların Güçlendirme Türüne Göre ve Korozyon Derecelerine Göre Karşılaştırılması

Farklı korozyon hasarı derecelerinde hasara uğrayan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile dört kat güçlendirilmiştir. Güçlendirilen profiller basınç ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Farklı güçlendirme türlerinin basınç ve eğilme dayanımlarına etkileri bu bölümde incelenmiştir.



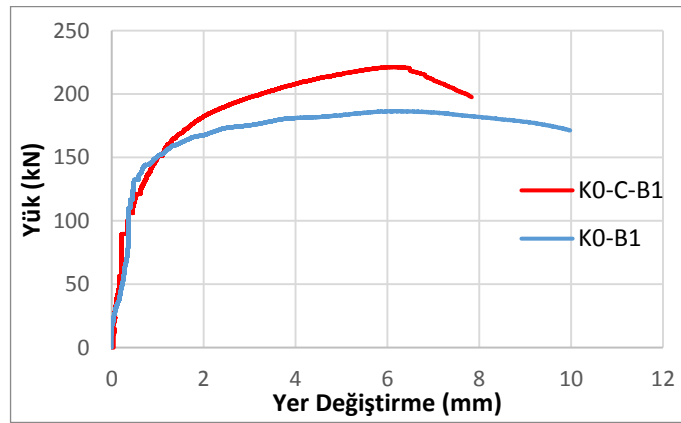
#### 4.2.1. Korozyon hasarına uğramayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı

Korozyon hasarına uğratılmayan ve hızlandırılmış korozyon düzeneği ile %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip basınç testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.3.'de profillere ait basınç dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.3. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları

Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K0-B1	Güçlendirme Yok	Basınç	%0	186,45	1703,55
K0-B2	Güçlendirme Yok	Basınç	%0	181,02	1540,41
K0-B-B1	BFRP	Basınç	%0	204,67	1063,87
K0-B-B2	BFRP	Basınç	%0	218,99	1353,84
K0-C-B1	CFRP	Basınç	%0	221,18	1483,12
K0-C-B2	CFRP	Basınç	%0	238,12	1759,23
K0-G-B1	GFRP	Basınç	%0	201,66	1308,80
K0-G-B2	GFRP	Basınç	%0	199,24	1048,13

Şekil 4.5.'te güçlendirme uygulanmamış korozyon hasarsız profil ile CFRP güçlendirme uygulanmış korozyon hasarsız profillere ait yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Referans profile göre basınç yükü altında taşıma gücü kapasitesinin CFRP ile arttığı görülmektedir.



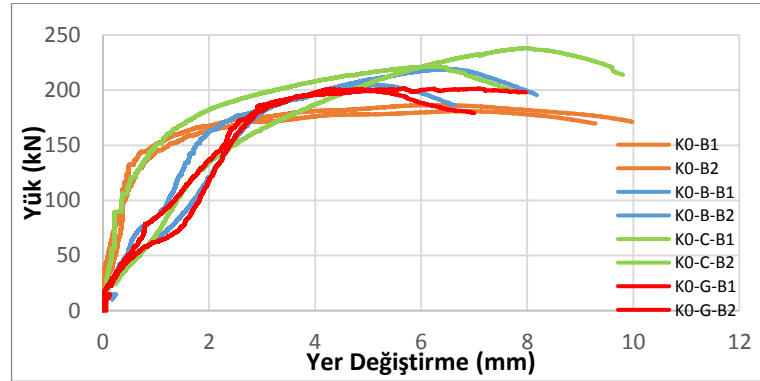
Şekil 4.5. K0-B1 ve K0-C-B1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.6.'da korozyon hasarına uğramayan CFRP ile güçlendirilmiş profilin basınç testi sonrası görülmektedir.

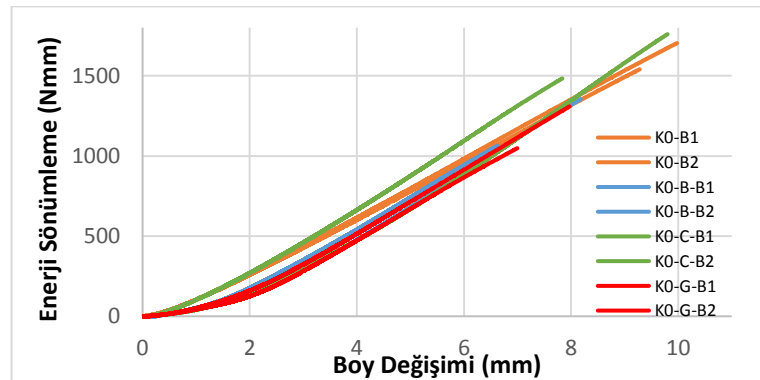


Şekil 4.6. CFRP ile güçlendirilmiş korozyon hasarsız profilin basınç testi sonrası

Şekil 4.7a.'da korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip basınç testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 4.7b.'de enerji sönümleme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

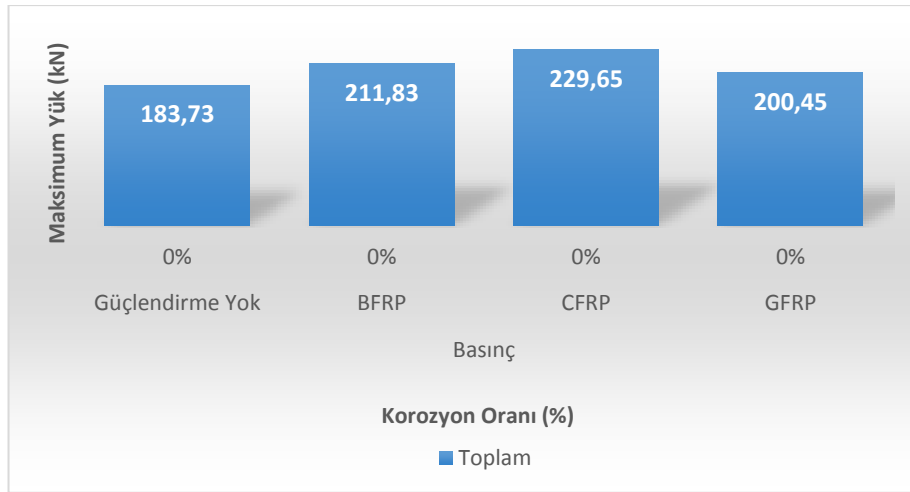


Şekil 4.7a. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç)



Şekil 4.7b. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümleme kapasitesi grafiği

Şekil 4.8.'de sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Korozyonsuz durumda güçlendirme etkisi (basınç)

Grafikte görüldüğü üzere korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmeden referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin basınç dayanımı %24,99 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin basınç dayanımına göre %15,29 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin basınç dayanımına göre %9,1 artış göstermiştir.

#### 4.2.2. Korozyon hasarına uğramayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı

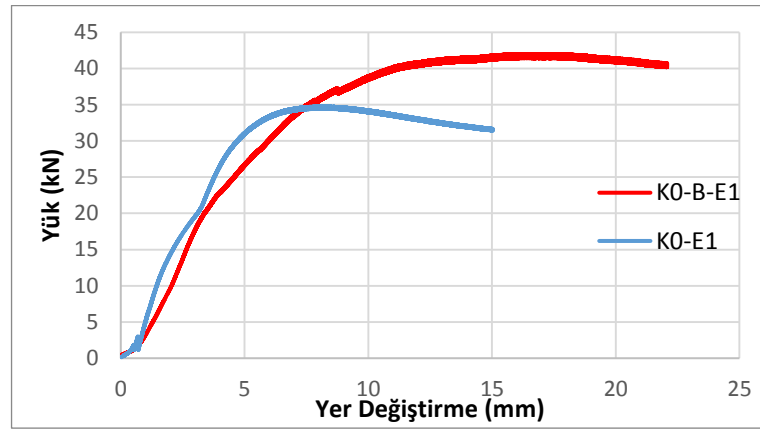
Korozyon hasarına uğratılmayan ve hızlandırılmış korozyon düzeneği ile %10 ve %20 kütlece korozyona uğratılan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip eğilme testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.4.'te profillere ait eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.4. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları

Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K0-E1	Güçlendirme Yok	Eğilme	%0	34,76	414,74
K0-E2	Güçlendirme Yok	Eğilme	%0	34,51	432,14
K0-B-E1	BFRP	Eğilme	%0	42,00	731,12
K0-B-E2	BFRP	Eğilme	%0	45,30	551,01
K0-C-E1	CFRP	Eğilme	%0	45,74	502,35

K0-C-E2	CFRP	Eğilme	%0	46,31	526,73
K0-G-E1	GFRP	Eğilme	%0	41,20	415,07
K0-G-E2	GFRP	Eğilme	%0	42,49	532,69

Şekil 4.9.'da güçlendirme uygulanmamış korozyon hasarsız profil ile BFRP güçlendirme uygulanmış korozyon hasarsız profillere ait yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Referans profile göre eğilme yükü altında taşıma gücü kapasitesinin BFRP ile arttığı görülmektedir.



Şekil 4.9. K0-E1 ve K0-B-E1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

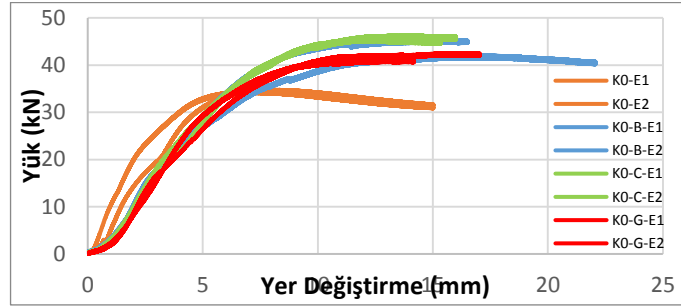
Şekil 4.10.'da korozyon hasarına uğramayan profilin BFRP ile güçlendirilmesi sonrası eğilme testi sonucunda görseli görülmektedir.



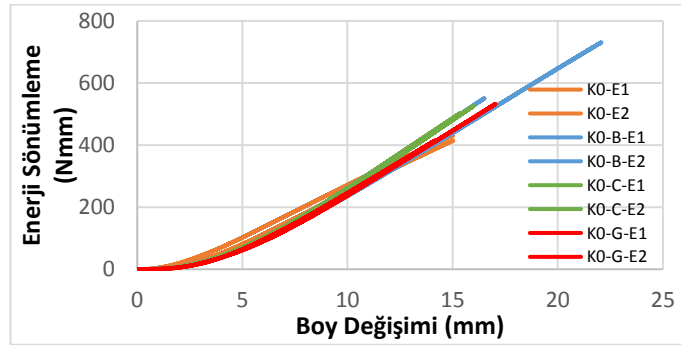
Şekil 4.10. BFRP ile güçlendirilmiş korozyon hasarsız profilin eğilme testi sonrası

Şekil 4.11a.'da korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip eğilme testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-

yer değiştirme grafikleri ve Şekil 4.11b.'de enerji sönümlleme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

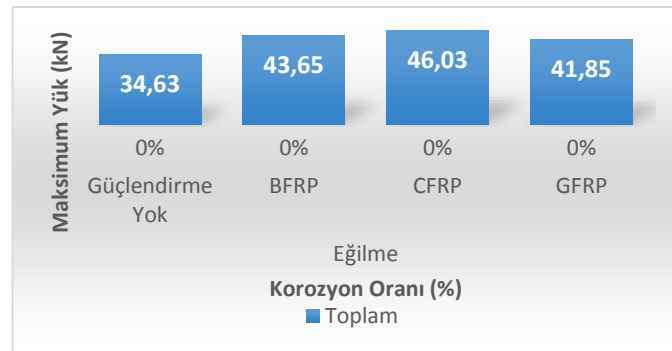


Şekil 4.11a. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (eğilme)



Şekil 4.11 b. Korozyon hasarına uğramayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlleme kapasitesi grafiği

Şekil 4.12.'de sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Korozyonsuz durumda güçlendirme etkisi (eğilme)

Grafikte görüldüğü üzere korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile

güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %32,92 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %26,05 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %20,85 artış göstermiştir.

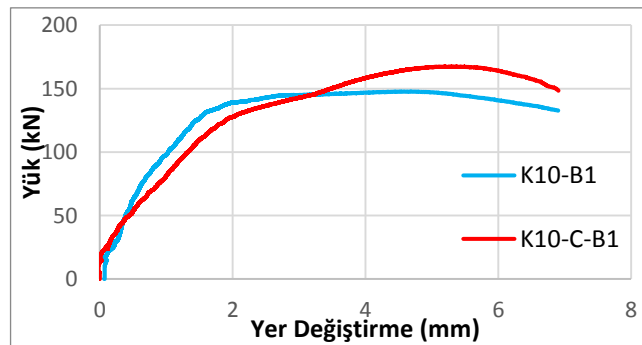
#### 4.2.3. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı

Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip basınç testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.5.'te profillere ait basınç dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.5. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları

Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K10-B1	Güçlendirme Yok	Basınç	%10	147,67	883,83
K10-B2	Güçlendirme Yok	Basınç	%10	135,85	691,22
K10-B-B1	BFRP	Basınç	%10	125,17	720,79
K10-B-B2	BFRP	Basınç	%10	139,68	562,11
K10-C-B1	CFRP	Basınç	%10	167,27	918,88
K10-C-B2	CFRP	Basınç	%10	166,64	909,23
K10-G-B1	GFRP	Basınç	%10	107,63	394,87
K10-G-B2	GFRP	Basınç	%10	115,30	515,99

Şekil 4.13.'de kütlece %10 korozyon hasarlı güçlendirmesiz referans profili ile CFRP güçlendirmeli profile ait yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Referans profile göre basınç yükü altında taşıma gücü kapasitesinin CFRP ile arttığı görülmektedir.



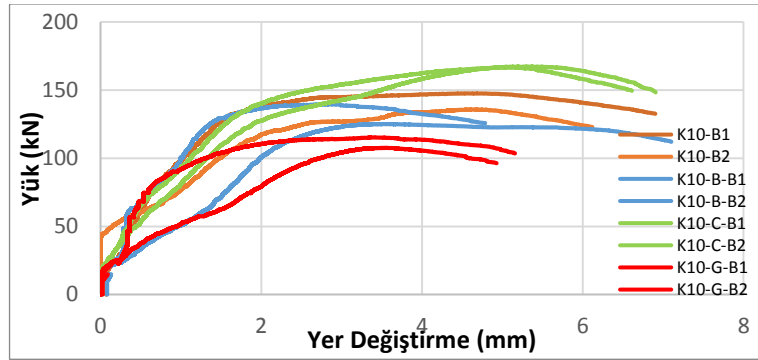
Şekil 4.13. K10-B1 ve K10-C-B1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.14.'te kütüce %10 korozyon hasarına uğrayan profilin CFRP ile güçlendirilmesi sonrası basınç testi sonucunda görseli görülmektedir.

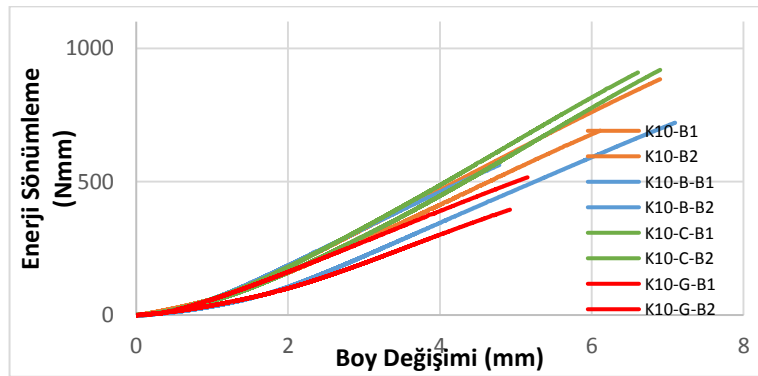


Şekil 4.14. CFRP ile güçlendirilmiş %10 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası

Şekil 4.15a.'da kütüce %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip basınç testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ve Şekil 4.15b.'de enerji sönümlenme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

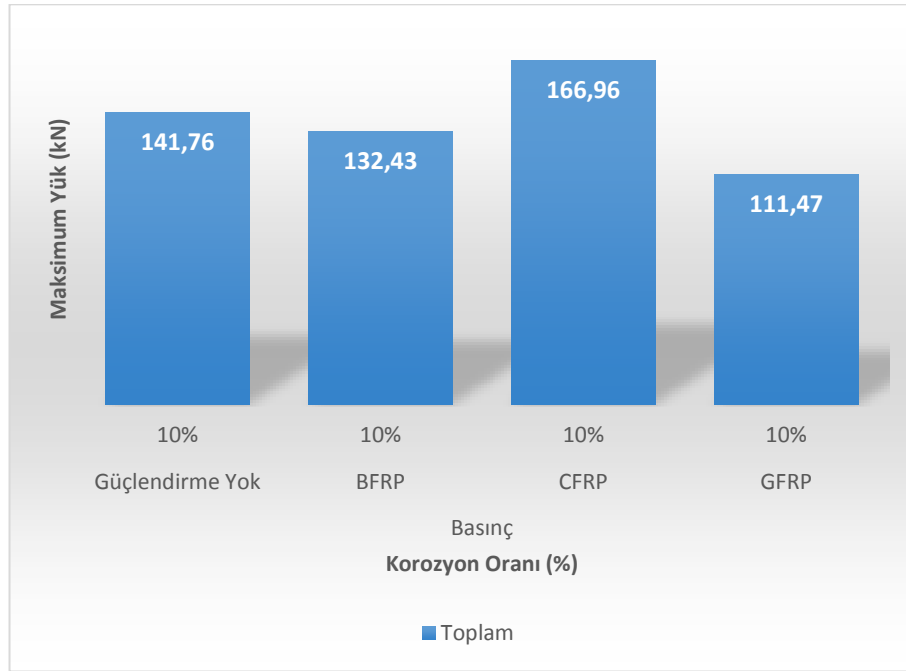


Şekil 4.15a. Kütüce %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç)



Şekil 4.15 b. Kütüce %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme kapasitesi grafiği

Şekil 4.16.'da sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Kütlece %10 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (basınç)

Grafikte görüldüğü üzere kütlece %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarından yalnızca CFRP ile güçlendirmede %10 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artış olmuştur. BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin burkulması daha düşük yüklerde olmuştur. Basınç çubuklarında korozyon etkisi ile kaynak bölgelerinde zayıflama olmuştur. Bu zayıf bölgelerin güçlendirilmesinde CFRP kumaşlar etkili olurken BFRP ve GFRP kumaşlar yetersiz kalmıştır. CFRP ile güçlendirmede kütlece %10 korozyon hasarında referans profile (%10-güçlendirmesiz) göre basınç dayanımında %17,78 artış görülmektedir.

#### 4.2.4. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı

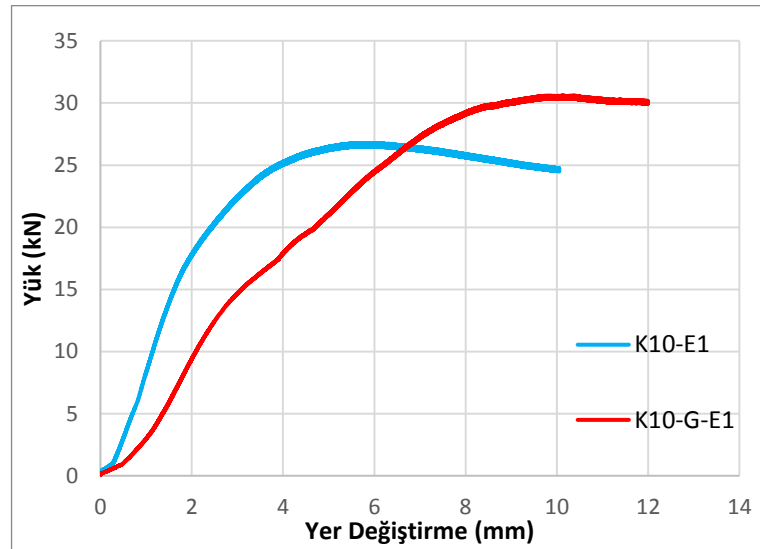
Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip eğilme testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.6.'da profillere ait eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.



Tablo 4.6. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları

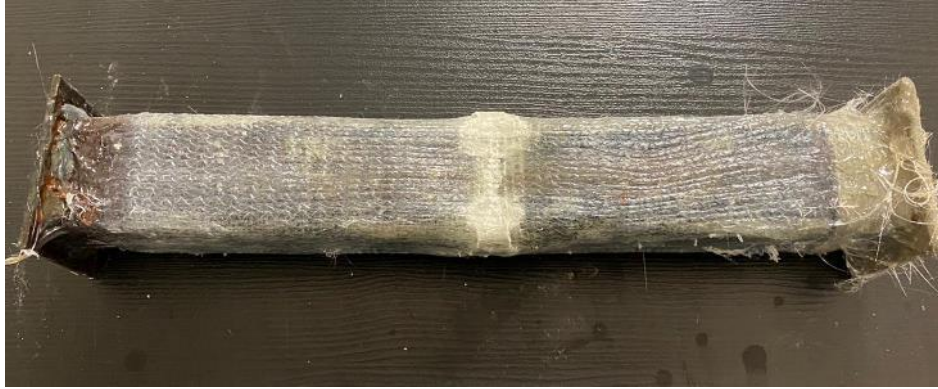
Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K10-E1	Güçlendirme Yok	Eğilme	%10	26,78	217,45
K10-E2	Güçlendirme Yok	Eğilme	%10	27,99	233,34
K10-B-E1	BFRP	Eğilme	%10	30,68	408,05
K10-B-E2	BFRP	Eğilme	%10	32,71	259,57
K10-C-E1	CFRP	Eğilme	%10	36,57	266,12
K10-C-E2	CFRP	Eğilme	%10	37,07	389,87
K10-G-E1	GFRP	Eğilme	%10	30,59	252,40
K10-G-E2	GFRP	Eğilme	%10	27,87	287,67

Şekil 4.17.'de kütlece %10 korozyon hasarlı güçlendirmesiz referans profili ile CFRP güçlendirmeli profile ait yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Referans profile göre eğilme yükü altında taşıma gücü kapasitesinin GFRP ile arttığı görülmektedir.



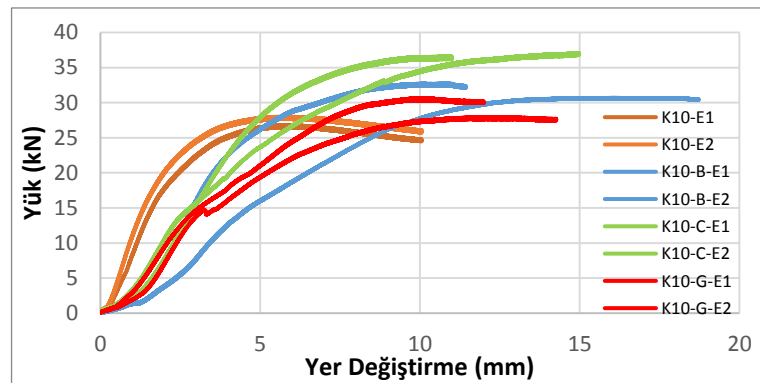
Şekil 4.17. K10-E1 ve K10-G-E1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.18.'de kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profilin GFRP ile güçlendirilmesi sonrası eğilme testi sonucunda görseli görülmektedir.

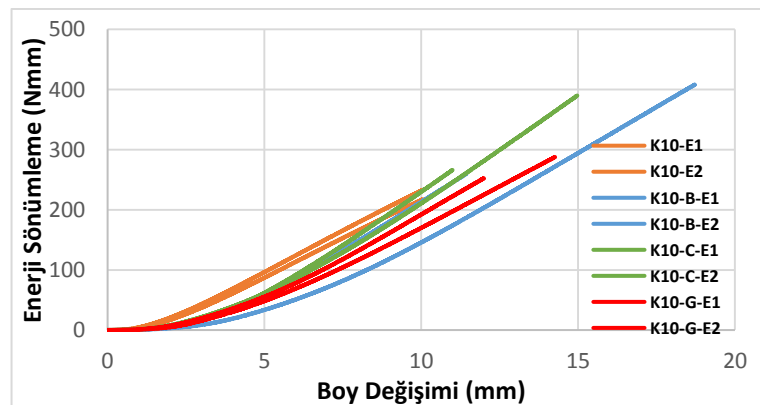


Şekil 4.18. GFRP ile güçlendirilmiş %10 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası

Şekil 4.19a.'da kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip eğilme testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ve Şekil 4.19b.'de enerji sönümlleme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

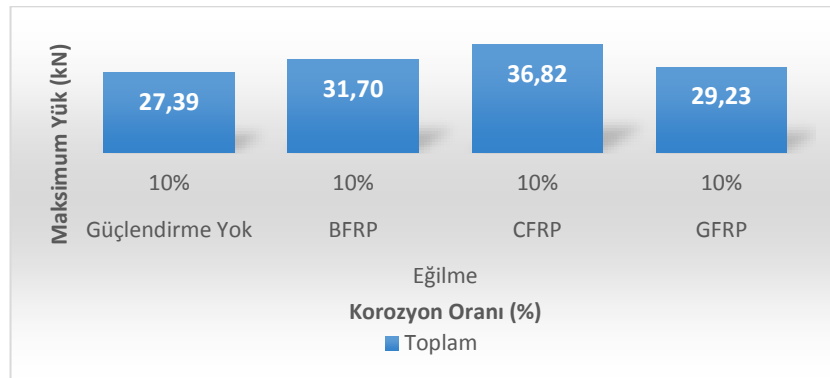


Şekil 4.19a. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (eğilme)



Şekil 4.19b. Kütlece %10 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlleme kapasitesi grafiği

Şekil 4.20.'de sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.20. Küttelece %10 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (eğilme)

Grafikte görüldüğü üzere küttelece %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımların %10 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artışlar olmuştur. Eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz %10 hasarlı referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %34,43 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %15,74 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %6,72 artış göstermiştir.

#### 4.2.5. Küttelece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu basınç dayanımı

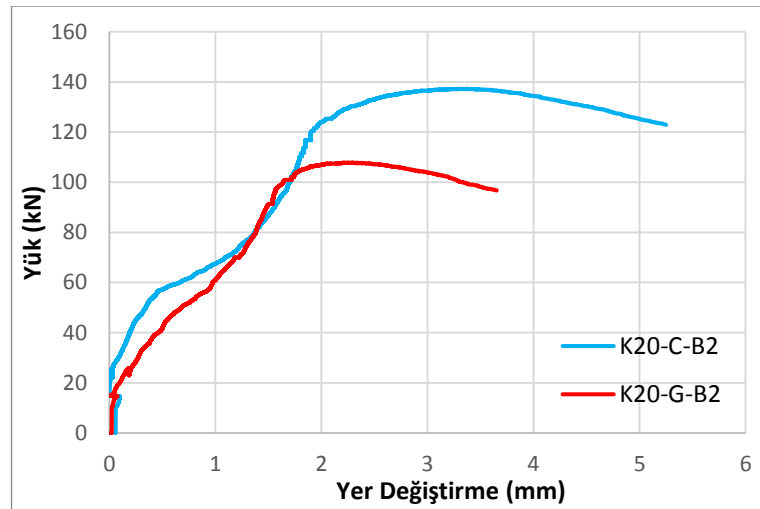
Küttelece %20 korozyon hasarına uğrayan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip basınç testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.7.'de profillere ait basınç dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.7. Küttelece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi basınç dayanımları

Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K20-B1	Güçlendirme Yok	Basınç	%20	116,55	383,18
K20-B2	Güçlendirme Yok	Basınç	%20	120,22	491,19
K20-B-B1	BFRP	Basınç	%20	108,01	339,08
K20-B-B2	BFRP	Basınç	%20	118,96	463,24

K20-C-B1	CFRP	Basınç	%20	117,50	394,28
K20-C-B2	CFRP	Basınç	%20	137,21	571,52
K20-G-B1	GFRP	Basınç	%20	98,08	301,09
K20-G-B2	GFRP	Basınç	%20	107,8	299,75

Şekil 4.21.'de kütlece %20 korozyon hasarlı CFRP güçlendirmeli profili ile GFRP güçlendirmeli profile ait yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. CFRP ile güçlendirmenin GFRP ile güçlendirmeye göre aynı kat sayıda güçlendirme durumunda daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.21. K20-C-B2 ve K20-G-B2 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.22.'de kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profilin GFRP ile güçlendirilmesi sonrası basınç testi sonucunda görseli görülmektedir. Şekil 4.23.'te ise CFRP ile güçlendirme sonucu görülmektedir.

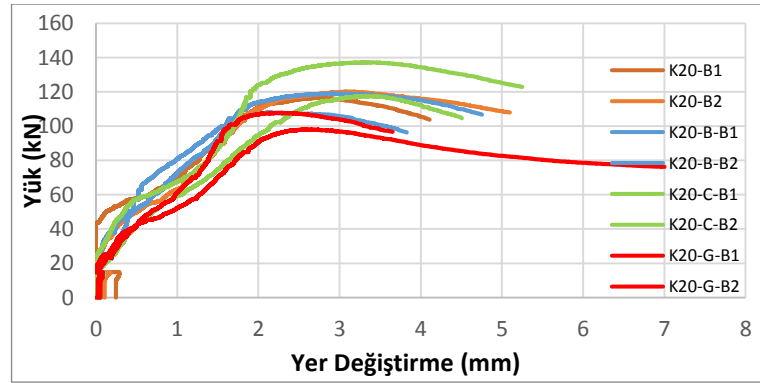


Şekil 4.22. GFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası

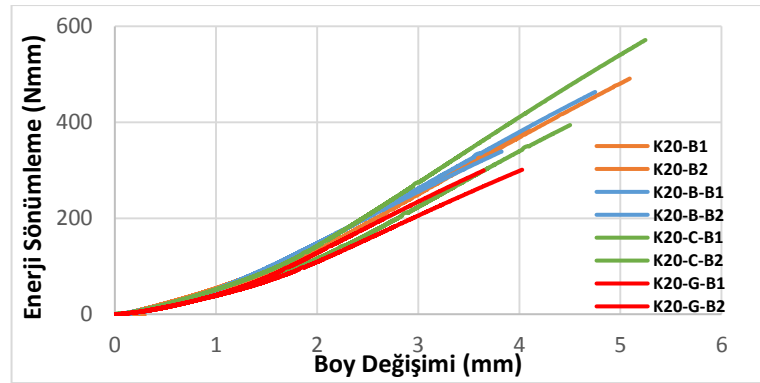


Şekil 4.23. CFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin basınç testi sonrası

Şekil 4.24a.'da kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip basınç testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ve Şekil 4.24b.'de enerji sönümlenme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

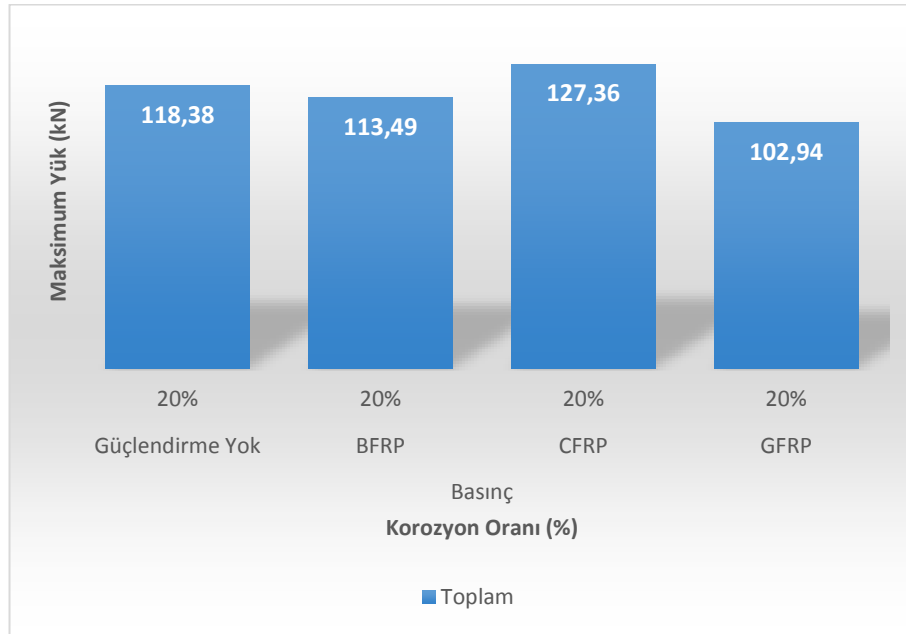


Şekil 4.24a. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (basınç)



Şekil 4.24b. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümlenme grafiği

Şekil 4.25.'te sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.25. Küttelece %20 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (basınç)

Grafikte görüldüğü üzere küttelece %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarından yalnızca CFRP ile güçlendirmede %20 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artış olmuştur. BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin burkulması daha düşük yüklerde olmuştur. Basınç çubuklarında korozyon etkisi ile kaynak bölgelerinde zayıflama olmuştur. Bu zayıf bölgelerin güçlendirilmesinde CFRP kumaşlar etkili olurken BFRP ve GFRP kumaşlar yetersiz kalmıştır. CFRP ile güçlendirmede küttelece %20 korozyon hasarında referans profile (%20-güçlendirmesiz) göre basınç dayanımında %7,59 artış görülmektedir.

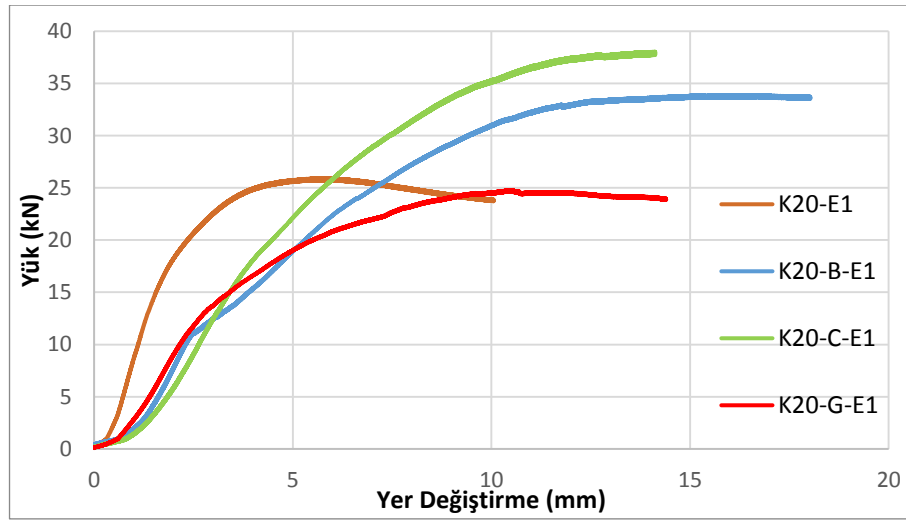
#### 4.2.6. Küttelece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi durumu eğilme dayanımı

Küttelece %20 korozyon hasarına uğrayan profiller CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilip eğilme testine tabi tutulmuştur. Tablo 4.8.'de profillere ait eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri verilmektedir.

Tablo 4.8. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı kumaşlarla güçlendirilmesi eğilme dayanımları

Profil Adı	Güçlendirme Elemanı	Deney Tipi	Korozyon Hasarı	Maksimum Yük (kN)	Enerji Yutma Kapasitesi (Joule)
K20-E1	Güçlendirme Yok	Eğilme	%20	25,90	213,49
K20-E2	Güçlendirme Yok	Eğilme	%20	25,86	228,51
K20-B-E1	BFRP	Eğilme	%20	33,89	442,25
K20-B-E2	BFRP	Eğilme	%20	35,14	291,22
K20-C-E1	CFRP	Eğilme	%20	38,03	349,81
K20-C-E2	CFRP	Eğilme	%20	37,34	282,64
K20-G-E1	GFRP	Eğilme	%20	24,80	270,70
K20-G-E2	GFRP	Eğilme	%20	30,85	352,87

Şekil 4.26.'da kütlece %20 korozyon hasarlı CFRP, BFRP, GFRP güçlendirmeli ve %20 korozyon hasarında güçlendirmesiz referans profilin eğilme testi altında yük-yer değiştirme grafiği görülmektedir. CFRP ile güçlendirme ve BFRP ile güçlendirme eğrileri yakın seyir ederken GFRP ile güçlendirme yetersiz kalmıştır.



Şekil 4.26. K20-E1, K20-B-E1, K20-C-E1 ve K20-G-E1 profilleri yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.27.'de kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profilin GFRP ile güçlendirilmesi sonrası eğilme testi sonucunda görseli görülmektedir. Şekil 4.28.'de CFRP ile güçlendirme sonucu ve Şekil 4.29.'da BFRP ile güçlendirme sonrası eğilme testi sonucu görülmektedir.





Şekil 4.27. GFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası



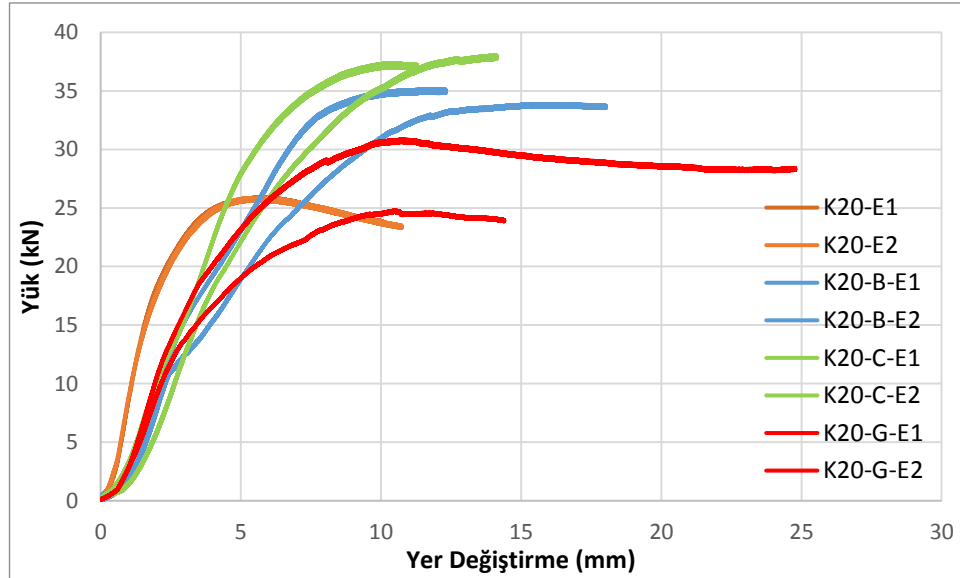
Şekil 4.28. CFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası



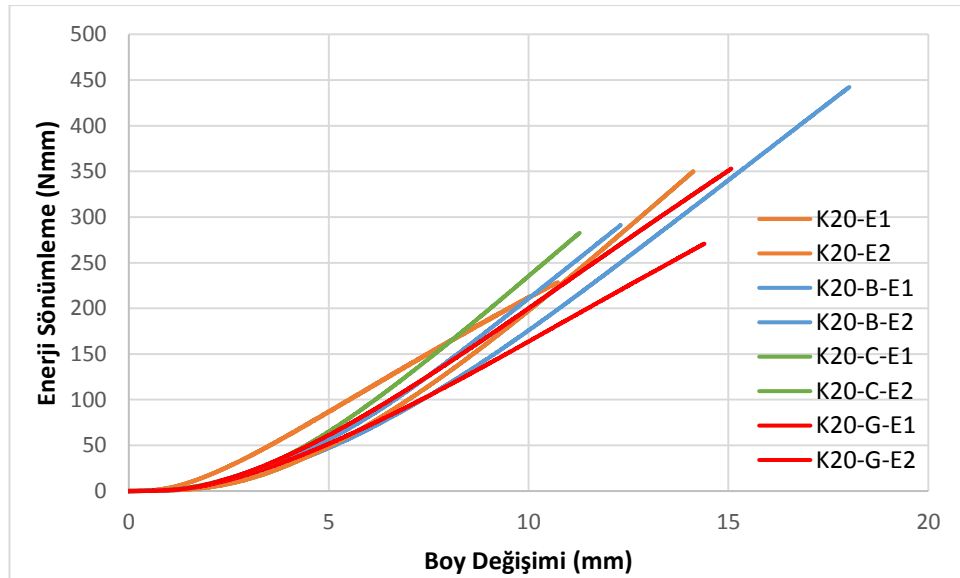
Şekil 4.29. BFRP ile güçlendirilmiş %20 korozyon hasarlı profilin eğilme testi sonrası



Şekil 4.30a.'da kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanlarıyla güçlendirilip eğilme testine tabi tutulması sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme ve Şekil 4.30b.'de enerji sönümleme kapasiteleri grafiği gösterilmektedir.

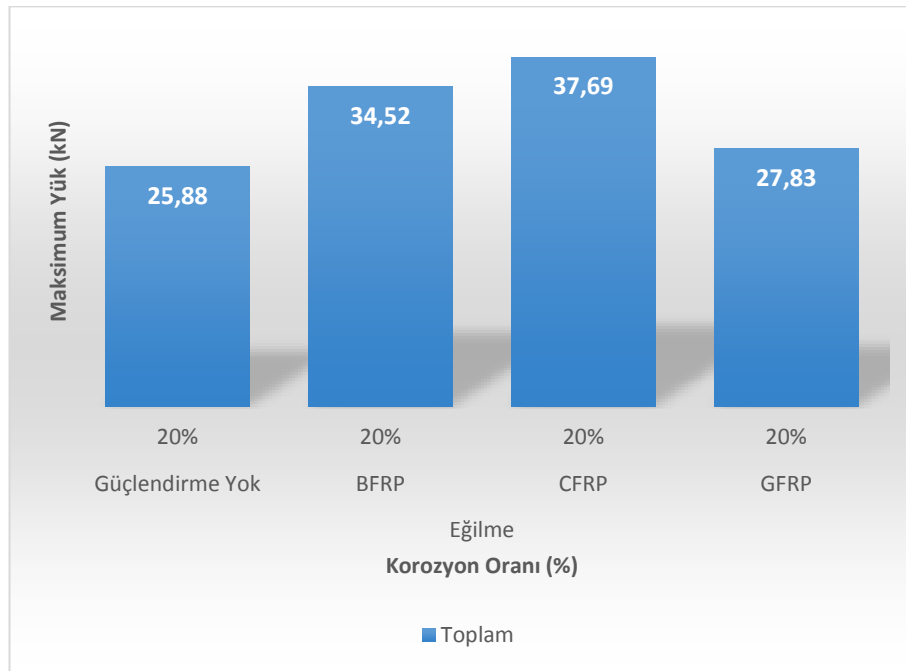


Şekil 4.30a. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi yük-yer değiştirme grafiği (eğilme)



Şekil 4.30b. Kütlece %20 korozyon hasarına uğrayan profillerin farklı güçlendirme elemanları ile güçlendirilmesi enerji sönümleme kapasitesi grafiği

Şekil 4.31.'de sonuçlar grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.31. Kütlice %20 korozyon durumunda güçlendirme etkisi (eğilme)

Grafikte görüldüğü üzere kütlice %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımların %20 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artışlar olmuştur. Eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz %20 hasarlı referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %45,63 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %33,38 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %7,53 artış göstermiştir.

## BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada hızlandırılmış korozyon test düzeneği ile kütlece korozyona uğratılan S235 kutu profillerin farklı korozyon derecelerinde aksenal basınç ve üç noktalı eğilme taşıma kapasiteleri ve enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir.

- Artan korozyon derecelerinde basınç dayanımları incelendiğinde kütlece korozyon kaybı neticesinde taşıma gücü kapasitelerinde ciddi düşüşler görülmüştür.
- Farklı korozyon derecelerinde hasara uğrayan S 235 çelik kutu profillerin nihai basınç mukavemeti, korozyona uğramayan profillerin mukavemetinden düşüktür.
- Artan korozyon derecelerinde basınç çubuklarının ve kiriş elemanlarının enerji sönümleme kapasitelerinin azaldığı görülmüştür.
- Hızlandırılmış korozyon düzeneği ile kütlece %10 korozyona uğratılan kutu profillerin basınç dayanımlarında ortalama %22,84 düşüş gözlenmiştir.
- Hızlandırılmış korozyon düzeneği ile kütlece %20 korozyona uğratılan kutu profillerin basınç dayanımlarında ortalama %35,57 düşüş gözlenmiştir.
- Artan korozyon derecelerinde eğilme dayanımları incelendiğinde kütlece korozyon kaybı neticesinde taşıma gücü kapasitelerinde düşüşler görülmüştür.
- Farklı korozyon derecelerinde hasara uğrayan S 235 çelik kutu profillerin nihai eğilme mukavemeti, korozyona uğramayan profillerin mukavemetinden düşüktür.
- Hızlandırılmış korozyon düzeneği ile kütlece %10 korozyona uğratılan kutu profillerin eğilme dayanımlarında ortalama %20,91 düşüş gözlenmiştir.
- Hızlandırılmış korozyon düzeneği ile kütlece %20 korozyona uğratılan kutu profillerin eğilme dayanımlarında ortalama %25,27 düşüş gözlenmiştir.

- Korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin basınç dayanımı %24,99 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin basınç dayanımına göre %15,29 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin basınç dayanımına göre %9,1 artış göstermiştir.
- Korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç yükü altında enerji sönümleme kapasiteleri incelendiğinde CFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümleme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.
- Korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %32,92 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %26,05 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %20,85 artış göstermiştir.
- Korozyon hasarı olmaması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme yükü altında enerji sönümleme kapasiteleri incelendiğinde BFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümleme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.
- Kütlece %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarından yalnızca CFRP ile güçlendirmede %10 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artış olmuştur. BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin burkulması daha düşük yüklerde olmuştur. Basınç çubuklarında korozyon etkisi ile kaynak bölgelerinde zayıflama olmuştur. Bu zayıf bölgelerin güçlendirilmesinde CFRP kumaşlar etkili olurken BFRP ve GFRP kumaşlar yetersiz kalmıştır. CFRP ile güçlendirmede kütlece %10 korozyon hasarında referans profile (%10-güçlendirmesiz) göre basınç dayanımında %17,78 artış görülmektedir.

- %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç yükü altında enerji sönümlenme kapasiteleri incelendiğinde CFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümlenme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.
- Kütlece %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımların %10 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artışlar olmuştur. Eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz %10 hasarlı referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %34,43 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %15,74 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %6,72 artış göstermiştir.
- %10 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme yükü altında enerji sönümlenme kapasiteleri incelendiğinde BFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümlenme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.
- Kütlece %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç dayanımlarından yalnızca CFRP ile güçlendirmede %20 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artış olmuştur. BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin burkulması daha düşük yüklerde olmuştur. Basınç çubuklarında korozyon etkisi ile kaynak bölgelerinde zayıflama olmuştur. Bu zayıf bölgelerin güçlendirilmesinde CFRP kumaşlar etkili olurken BFRP ve GFRP kumaşlar yetersiz kalmıştır. CFRP ile güçlendirmede kütlece %20 korozyon hasarında referans profile (%20-güçlendirmesiz) göre basınç dayanımında %7,59 artış görülmektedir.
- %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin basınç yükü altında enerji sönümlenme kapasiteleri incelendiğinde CFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümlenme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.
- Kütlece %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme dayanımların %20 hasarlı güçlendirmesiz profile göre artışlar olmuştur. Eğilme dayanımlarında en yüksek sonuç CFRP

ile güçlendirmeden alınmıştır. Güçlendirmesiz %20 hasarlı referans duruma göre CFRP ile güçlendirilmiş profilin eğilme dayanımı %45,63 artış göstermiştir. BFRP ile güçlendirme referans profilin eğilme dayanımına göre %33,38 artış göstermiştir. GFRP ile güçlendirme ise referans profilin eğilme dayanımına göre %7,53 artış göstermiştir.

- %20 korozyon hasarı olması durumunda CFRP, BFRP ve GFRP ile güçlendirilen profillerin eğilme yükü altında enerji sönümlenme kapasiteleri incelendiğinde BFRP ile güçlendirilen profillerin enerji sönümlenme kapasitesi en yüksek olduğu görülmüştür.

Kütlece korozyon hasarı derecesi arttıkça eğilme dayanımında FRP güçlendirme etkinlikleri de artmıştır. %10 korozyon hasarlı profilin CFRP etkinliği referans profile göre eğilme dayanımı için %34,43 iken %20 hasar derecesinde %45,63 olmuştur. Artan hasar sebebiyle güçlendirme elemanlarının dayanım sergilemesi ön plana çıkmaktadır.

Farklı derecelerde kütlece korozyon hasarına uğrayan profillerin güçlendirilip eğilme ve basınç testlerine tabi tutulması neticesinde enerji sönümlenme kapasiteleri incelenmiş olup basınç yükü altında CFRP ile güçlendirmede enerji yutma kapasitesi yüksek olurken eğilme yükü altında BFRP ile güçlendirme enerji yutma kapasitesi yüksek bulunmuştur.

BFRP ile güçlendirme sonuçları CFRP ile güçlendirmeye göre düşüktür fakat güçlendirme katman sayısı artırılarak taşıma gücü kapasiteleri daha yukarılara çekilebileceği düşünülmektedir.

CFRP, BFRP ve GFRP ile çelik çekme kuponları güçlendirilip çekme testi ile dayanımları test edilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kaya, M.T., Hafif Çelik Yapıların Bulon, Vida ve Perçinli Birleşimlerinde Farklı Seviyelerdeki Korozyonun Etkileri, Konya Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [2] <https://www.dtel.com.tr/st37>, Erişim Tarihi: 02.05.2021.
- [3] <https://www.uslularhadde.com/yapi-celikleri-nedir>, Erişim Tarihi: 02.05.2021.
- [4] Onaran, K., “Malzeme Bilimi”, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul 237-243, 1991.
- [5] Gerengi, H. ve Şamandar, A., The Necessity Of Corossion Technology Program, 1. Uluslararası 5.Ulusal Meslek Yüksek Okulları Sempozyumu, Konya 318-319, 2009.
- [6] American Standards Testing Meterials Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology.18, 766-771, 1992.
- [7] Konuklu, S., Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Sülfirik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2007.
- [8] Teng, J.G., Yu, T. and Fernando, D. “Strengthening of Steel Structures with Fiber Reinforced Polymer Composites”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 78, pp. 131-143, 2012.
- [9] Teng J.G., and Hu Y.M., Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression. Construction and Buiding materials, 21: 827-838, 2006.
- [10] Soric, Z., Kisicek, T., Galic, J., Deflections of concrete beams reinforced with frp bars. Materials and Structures 43, 73-90, 2010.
- [11] Demirci, İ., Avcı, A., Deniz Suyu Korozyon Ortamında Bazalt/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi, Selçuk-Teknik Dergisi Cilt 16, Sayı:2, 2017.

- [12] Ghada M. El-Mahdy, Abdallah H. Yassin, Abd El Rahman Khaled “Strengthening of Corroded Steel Structures Using CFRP- An Experimental Review, International Conference on Advances in Steel Structures Egypt Steel 19, 2019.
- [13] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments. *J Compos Construct*, 5(3):200–10, 2001.
- [14] Photiou NK, Hollaway LC, Chryssanthopoulos MK. Selection of CFRP systems for steel work upgrading. In: *Proceedings of the innovative materials and technologies for construction and restoration (IMTCR)*. Italy: Department of Innovation Engineering, University of Lecce; 2004.
- [15] Bastani A, Das S, Lawn D. Rehabilitation of shear deficient steel beams using BFRP fabric. *Structures* 2019;19:349–61.
- [16] Swentek, I., Thompson, J., Meirson, G., Ugresic, V., Henning, F., “Comparison of basalt, glass, and carbon fiber composites using the high-pressure resin transfer molding process”, Technical report, Western University. Canada; p. 1–25, 2016.
- [17] N.K. Photiou, L.C. Hollaway, Chryssanthopoulos, Strengthening of Artificially Degraded Steel Beam Utilizing Carbon/glass Composite System, *Construction and Building Material*, 20, pp. 11–21, 2006.
- [18] Photiou, N.K., Hollaway, L.C., and Chryssanthopoulo, M.K., “Strengthening of an Artificially Degraded Steel Beam Utilising a Carbon/Glass Composite System,” *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp.11-21, 2006.
- [19] Fenkli, M. ve ark., “Kutu Kesitli Kiriş-Kolon Birleşiminde Mesh Kalıtesinin Şekil Değiştirmeye Etkisi”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2015.
- [20] Elchalakani, M., Ali Karrech, A., Basarir, H., M.F. Hassanein, M.F., Fawzia, S., CFRP strengthening and rehabilitation of corroded steel pipelines under direct indentation, *Thin-Walled Structures* 119, 510–521, 2017.
- [21] D. Schnerch, S. Rizkalla, Strengthening Of Scaled Steel-Concrete Composite Girders And Steel Monopole towers with CFRP, *FRP Composites in Civil Engineering*, ISBN 90 5809 638 6, United Kingdom, 2004.
- [22] Ağcakoca, E., Aktaş, M., HM-CFRP ile Güçlendirilmiş Kompozit I-Kirişlerde HM-CFRP'nin Sıyrılmaması İçin Faydalı Mesafenin Belirlenmesi, *e-Journal of New World Sciences Academy* 2012, Volume:2, Article Number: 2A0076.
- [23] Colombi, P., and Fava, G., Experimental study on the fatigue behaviour of cracked steel beams repaired with CFRP plates. *Engineering Fracture Mechanics*, 145:125-142, 2015.



- [24] Al-Saidy A H, Klaiber F W and Wipf T J., Repair of steel composite beams with carbon fiber-reinforced polymer plates. *ASCE J Compos Constr.* 8 (2): 163–72, 2004.
- [25] Cederquist S.C., Repairing America's deteriorating bridges. *Materials Performance*, 38 (5): 20–5, 1999.
- [26] Jiao, H. and Zhao, X.L., CRFP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. *Thin-walled structures*, 42:963-978, 2004.
- [27] Jagtap, P.R., Pore, S.M., Strengthening of fully corroded steel I-beam with CFRP laminates, *Materials Today: Proceedings* 43, 2170–2175, 2021.
- [28] Q.H. Tawfik, W. Karunasena, Use of CFRP for rehabilitation of steel structures: a review, Presented at the Southern Region Engineering Conferences, Toowoomba, Australia, 2010.
- [29] X.L. Zhao, L. Zhang, State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures, *Eng. Struct.* 29, 1808–1823, 2007.
- [30] M. Elchalakani, Rehabilitation of corroded steel CHS under combined bending and bearing using CFRP, *J. Constr. Steel Res.* 125, 2016.
- [31] M. Chen, S. Das, Experimental study on repair of corroded steel beam using CFRP, *Steel Compos. Struct.* 9 (2), 2009.
- [32] A. Manalo, C. Sirimanna, W. Karunasena, L. McGarva, P. Falzon, Pre-impregnated carbon fibre reinforced composite system for patch repair of steel I-beams, *Constr. Build. Mater.* 105, 2016.
- [33] Tuakta, C., "Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology", A.B.D., 2005.
- [34] Manikandan V, Jappes WJT, Kumar SSM, Amuthakkannan P. Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites, *Composites Part B* 2012;43:812–8.
- [35] Wang X, Wu Z, Wu G, Zhu H, Zen F. Enhancement of basalt FRP by hybridization for long-span cable-stayed bridge, *Composites Part B* 2013;44:184–92.
- [36] Demirci, M.T. Ve ark., Fracture toughness (Mode I) characterization of SiO<sub>2</sub> nanoparticle filled basalt/epoxy filament wound composite ring with split-disk test method, *Composites Part B* 2017; 119: 114-124.
- [37] Bastani, A., Das, S., Kenno, S., Flexural rehabilitation of steel beam with CFRP and BFRP fabrics – A comparative study, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 19, Issue 3, May 2019, Pages 871-882.

- [38] Mitra, S., Bastani, A., Das, S., Lawn, D., Corroded steel beams with various corrosion aspect ratios – A rehabilitation technique using basalt fibre fabric, *Engineering Structures* 221, 111075, 2020.
- [39] Mitra, S., Bastani, A., Das, S., Lawn, D., Use of basalt fiber fabric for rehabilitation of steel beams with corroded compression flange, *Composite Structures* 255, 113014, 2021.
- [40] ASTM (American Society for Testing and Materials). “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, E8/E8M-15a. USA, PA: ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania; 2015.
- [41] Photiou, N.K, L.C. Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K., Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system, *Construction and Building Materials* 20, 11–21, 2006.
- [42] Al-Mekhlafi, G.M., Mohammed A. Al-Osta, M.A., Sharif, A.M., Experimental and numerical investigations of stainless steel tubular columns strengthened by CFRP composites, *Thin-Walled Structures* 157, 107080, 2020.
- [43] Batuwitige, C., Fawzia, S., Thambiratnam, D., Al-Mahaidi, R., Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments, *Composite Structures* 160, 1287–1298, 2017.
- [44] Karbhari VM, Ghosh K. Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite systems for repair of bridges. *Compos A Appl Sci Manuf* 2009;40:1353–63.
- [45] Dawood M, Rizkalla S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures. *Constr Build Mater* 2010;24:1682–9.
- [46] Wei B, Cao H, Song S. Degradation of bazalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater, *Corrosion Science* 2011; 53:426-431.
- [47] <http://www.ceylankompozit.com/tr/> Erişim Tarihi: 07.08.2020.
- [48] Alam, M. I., & Fawzia, S., Numerical studies on CFRP strengthened steel columns under transverse impact. *Composite Structures*, 120, 428-441, 2015.
- [49] CNR, D., Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council, Rome, Italy, 202/2005, 2007.
- [50] Ergün, M., Lifli Polimer Kompozit Malzemeler İle Güçlendirilmiş Çetikli (Hasarlı) Çelik Kirişlerin Yorulma Davranışlarındaki ve Dinamik Karakteristiklerindeki Değişimlerin Analitik, Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2019.

- [51] Fawzia S, Al-Mahaidi R, Zhao X-L. Experimental and finite element analysis of adouble strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. *ComposStruct* 2006;75:156–62.
- [52] J. Kim, Y., Bumadian, I., Electrochemical reactions for steel beams strengthened with CFRP sheets, *Engineering Structures* 125, 471–480, 2016.
- [53] Bastani, A., Das, S., Kenno, S., Rehabilitation of thin walled steel beams using CFRP fabric, *Thin-Walled Structures* 143, 106215, 2019.
- [54] ASTM E8/E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015www.astm.org
- [55] P.R. Jagtap, S.M. Pore, Shear Strengthening of Steel I-Beam with CFRP Composites, *International Journal of Scientific & Technology Research* 9 (2), 1335–1338, 2020.
- [56] P. Colombi, C. Poggi, Strengthening of Tensile Steel Members and Bolted Joints Using Adhesively Bonded CFRP Plates, *Constr. Build. Mater.* 20, 22–33, 2006.
- [57] Li, H., Xu, S., Zhang, Z., Song, C., Experimental and numerical investigation on the corrosion effects on the bonding behavior between CFRP and steel, *Composite Structures* 259, 113465, 2021.
- [58] Kabir, M.H., Fawzia, S., Chan, T.H.T., Badawi, M., Durability of CFRP strengthened steel circular hollow section member exposed to sea water, *Construction and Building Materials* 118, 216–225, 2016.
- [59] Deren, H., Uzgider, U., Piroğlu, F., Çelik Yapılar, Çağlayan Kitapevi, İstanbul, 2008.
- [60] Toros Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, Yapı Malzemeleri Sunusu, 2019.
- [61] Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F., Çağlayan, Ö., Çelik Yapılar, Dördüncü Baskı, Avcı Ofset Matbaacılık, İstanbul, 2012.
- [62] <http://www.dokumhane.net/>, Erişim Tarihi: 28.02.2021.
- [63] Taşpınar, M.S., Çelik Birleşimlerinde Çeşitli Deformasyon Mekanizmalarının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2019.
- [64] “Çelik Çizimler”, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, İnşaat Teknolojisi, Ankara, 2011.
- [65] TS EN 10219 – 2: 1997 Soğuk şekillendirilmiş alaşımsız ve ince taneli çeliklerden imal edilmiş yapısal boru ve kutu profiller

- [66] Keyder, E., Wasti, S.T., Çelik Yapı Elemanları (Analiz ve Tasarım), Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2010.
- [67] Duysak, Y., Çelik Yapılarda Bulonlu ve Kaynaklı Birleşimlerde Korozyon Etkisinin İncelenmesi, Konya Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [68] ÇYTHYE, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar, 2016.
- [69] Öz, D., Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Kuralları Doğrultusunda Çelik Yapıların Tasarımı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2018.
- [70] Ergün, İ., Çelik Yapı İmalatında Geçerli Uluslararası Standartlar ve Mevzuat, Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu s.306, 2017.
- [71] Aydın M. R. ve Günaydın A., Çelik Yapılar Tasarım Kuralları ve Uygulama Örnekleri, Birsen Yayınevi, 2017.
- [72] EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardisation, Brussels, 2005.
- [73] EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated Structural Elements, European Committee for Standardisation, Brussels, 2006.
- [74] Öztürk, Z., “Çelik Yapılar Kısa Bilgi ve Çözülmüş Problemler”, Birsen Yayınevi, 5 s., İstanbul, 2014.
- [75] Adluri S., Structural Steel Design Compression Members, Memorial University, New Foundland & Labrador, Canada, <https://www.engr.mun.ca/~adluri/courses/steel/ppt%20files1/Topic%20-Compression.pdf>, Erişim Tarihi: 05.05.2021.
- [76] Genç, T., Sıcak Haddelenmiş I ve H Enkesitli Çelik Basınç Elemanlarının Tasarımlarının Türkiye ve Avrupa Yönetmeliklerine Göre Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, s.6, 2019.
- [77] TS EN ISO 7438, 2021. Metalik Malzemeler - Eğme Deneyi
- [78] [www.1915canakkale.com](http://www.1915canakkale.com), Erişim Tarihi: 16.11.2020.
- [79] <http://opalcelik.com/>, Erişim Tarihi:10.06.2020.
- [80] <http://ahesinsaat.com/proje/sakarya-stadyumu/> Erişim Tarihi: 28.11.2020.
- [81] <https://insapedia.com/celik-elemanlarda-korozyon-acisindan-uygun-yapi-detaylari/> , Erişim Tarihi : 20.12.2020.

- [82] Yalçın, H. ve Koç, T., Demir ve Çelik Yapıların Korozyonu ve Katodik Koruması, İller Bankası Genel Müdürlüğü Yayını, Ankara, 327s., 1991.
- [83] Yazan. A., Pirinç Alaşımının Çinkosuzlaşma Korozyonuna Alüminyum, Nikel ve Kalay Alaşım Elementlerinin Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [84] Çakır, A. F., “Türkiye’nin Metalik Korozyon Kaybı”, IV.Korozyon Sempozyumu, 25-27 Ekim, İTÜ İstanbul, s.1-8, 1994.
- [85] Dillon, C. P., Forms of Corrosion: Recognition and Prevention, NACE International Publishing, Houston, 234s., 1982.
- [86] Gerengi, H., Akçay, Ç., Güler, C., Şahin, H. İ. Orman ürünleri endüstrisinde kullanılan fenol ve melamin formaldehit tutkallarının paslanmaz çelik (AISI 316L) korozyonuna etkisi, SDÜ Orman Fakültesi Dergisi, 13, 155-161, 2012.
- [87] Gerengi, H., Tafel Polarizasyon (TP), Lineer Polarizasyon (LP), Harmonik Analiz (HA) ve Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS) Yöntemleriyle Düşük Karbon Çeliği (AISI 1026), Pirinç-MM55 ve Nikalium-118 Alaşımının Yapay Deniz Suyunda Korozyon Davranışları ve Pirinç Alaşımına Benzotriazol’un İnhibitör Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2008.
- [88] Doruk, M., Metalik Malzemeler ve Korozyon, Korozyon Derneği Yayını, Ankara, 2014.
- [89] Doruk, M., Korozyon ve Önlenmesi, Ankara, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Yayını, Ankara, 239s., 1982.
- [90] [https://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal\\_disaster](https://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal_disaster), Erişim tarihi: 10.12.2020.
- [91] [https://en.wikipedia.org/wiki/1992\\_Guadalajara\\_explosions](https://en.wikipedia.org/wiki/1992_Guadalajara_explosions), Erişim Tarihi: 24.10.2020.
- [92] D. Miller "Corrosion Control on Aging Aircraft: What is being done ?", Materials Performance, October 1990, pp.10-11.
- [93] J.P. Komorowski et al. "Quantification of Corrosion in Aircraft Structures with Double Pass Retroreflection", Canadian Aeronautics and Space Journal, Vol.42, No.2, pp.76-82, 1996.
- [94] <http://www.corrosion-doctors.org/Aircraft/Aloha.htm>, Erişim Tarihi: 20.12.2020.
- [95] Taze, N., Şehir ve Endüstri Atmosferinde Bulunan Kükürdioksidin Çeşitli Yapı Malzemelerine Koroziif Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2003.

- [96] Doğan, G., Atmosferik Korozyonun Metal Yapı Malzemelerine Etkisi Üzerine Deneysel Çalışma ve Yapay Sinir Açı İle Korozyon Hızı Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [97] Paksoy, A.K., Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-26, 2008.
- [98] Konuş, M.T., Alüminyum-Bakır-Silisyum Alaşımının Sulu Ortamlardaki Korozyonuna Lantanitlerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [99] Aksüt, A.A., İnhibitörler ve Bunların Korozyonu Önleme Mekanizması, Standart Ekonomik ve Teknik Dergi 249-18, 1982.
- [100] M.E.B, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Kimya Teknolojisi, Korozyon ve Katodik Koruma, Ankara, 2011.
- [101] Roberge, P.R., Handbook of Corosion Engineering, The McGraw-Hill Companies Publishing, New York, 1129s., 2000.
- [102] Özbaş, M., Uygun Tasarım ve Metal Seçimi İle Korozyondan Korunma, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997.
- [103] Kaya, M.T., Hafif Çelik Yapıların Bulon, Vida ve Perçinli Birleşimlerinde Farklı Seviyelerdeki Korozyonun Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, 2019.
- [104] Yüksel, E., Çelik Malzemelerin Aşınma ve Korozyon Dayanımı Arttırmak İçin Çeşitli Kimyasal Kaplamaların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 42-53, 2005.
- [105] Oğuz, B., Demirdışı Metallerin Kaynağı, Oerlikon Yayınları, 1990.
- [106] Acar, F., Kaynaklanmış Paslanmaz Çelik ve Karbon Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Taneler Arası Korozyonun Etkisi, Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [107] Şimşek, M., Kimya Mühendisleri Odası, Gerçek Örnekler Üzerinden Korozyon ve Korozyondan Korunma Eğitimi, İstanbul, 2019.
- [108] Aeshah H. Alamri, A., Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview, Engineering Failure Analysis 116, 104735, 2020.
- [109] Erbil, M., Korozyon İlkeler-Önlemler, Korozyon Derneği Yayını, 171s., 2012.

- [110] Frankel, G.S., *Pitting Corrosion of Metals: A Review of the Critical Factors*, 1998.
- [111] Yalçın, H. Koç, T., *Mühendisler İçin Korozyon*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası 2-8s., 1997.
- [112] Umamaheshwer Rao, A.C., Vasu, V., Govindaraju, M., Sai Srinadh, K. V., *Stress corrosion cracking behaviour of 7xxx aluminum alloys: A literature review*, Science Direct, India, 2016.
- [113] Yalçın, H. Koç, T., *Mühendisler İçin Korozyon*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası 2-17s., 1997.
- [114] Koushik, B., *Review on modelling of corrosion under droplet electrolyte for predicting atmospheric corrosion rate*, Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 2020.
- [115] Scott, J.C. and C.L. Searls, "Weathering steel" in *twentieth-century building materials history and conservation*, New York: McGraw-Hill, 73-77, 1995.
- [116] Beale D. J., Morrison P. D., Key C., Palombo E. A., "Metabolic profiling of biofilm bacteria known to cause microbial influenced corrosion" *Water Science & Technology*, 69, 1-8, 2014.
- [117] Ovri, J., Okeahialam, S., Onyemaobi, O." *Microbial corrosion of mild and medium carbon steels" Journal of Engineering Science and Technology*, 8, 639-653, 2013.
- [118] Garret J.H., "The Action of Water on Lead" H.K. Lewis, London, England, 1891.
- [119] Javaherdashti, R., "Microbiologically influenced corrosion: an engineering insight Handbook" Springer Ltd, Verlag London, 2008.
- [120] Beech I. B., Gaylarde C.C., "Recent advances in the study of biocorrosion - an overview" *Revista de Microbiologia*, 30, 177-190, 1999.
- [121] Little B.J., Lee J.S., "Microbiologically influenced corrosion" Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 978-0-471-77276-7, Canada, 2007.
- [122] Critchley M., Javaherdashti R., "Materials, microorganisms and microbial corrosion- A review" *Corrosion and Materials*, 30, 8-11, 2005.
- [123] Yalçın, H. Koç, T., *Mühendisler İçin Korozyon*, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası 2-26s., 1997.

- [124] Doğruöz, N., Endüstriyel Sistemlerde Mikrobiyolojik Korozyon ve Önlenmesi, Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi Cilt 3(1), 26-28, 2014.
- [125] Borenstein S.W., "Microbiologically influenced corrosion handbook" Woodhead Publishing Limited, 0-8311-3056-3, Cambridge, England, 1994.
- [126] Guiamet P.S., Gomez De Saravia S.G., "Laboratory studies of biocorrosion control using traditional and environmentally friendly biocides: an overview" Latin American Applied Research, 35, 295-300, 2005.
- [127] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Kimya Teknolojisi, Yüksek Sıcaklık ve Erozyon Korozyonu, Ankara, s.1-38, 2012.
- [128] Korkmaz, K., Çakır, A., Mikro-ark oksidasyon yöntemi ile oksitlenen 2017A alüminyumun erozyon-korozyon direncinin incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu Özel Sayısı, 23(8) s.979-983, 2017.
- [129] Tan, Y.J., Fwu, Y., Bhardwaj, K., Bailey, S., Gubner, R., "Review of critical issues in carbon dioxide corrosion testing and monitoring techniques", NACE Corrosion/2010, No. 10155, 2010.
- [130] Üneri, S., Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği, 3-4 s, 122-127s, Ankara, 1998.
- [131] G.W. Walter, Corros. Sci. 15, s.47, 1975.
- [132] Gerengi, H., Kurtay, M., Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS), Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2013.
- [133] Topaktaş Konuş, M., Alüminyum-Bakır Silisyum Alaşımlarının Sulu Ortamlardaki Korozyonuna Lantanitlerin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [134] Stern M., Geary, A.L., "Electrochemical polarization," J. Electrochem. Soc., Vol. 104, No.1, pp.56-63, 1957.
- [135] Gerengi, H., Bereket, G., "Adsorption and inhibition effect of benzotriazole on brass-118 and brass MM55 in seawater", Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, Vol.48, No.3, pp.361- 366, 2012.
- [136] Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., Sanchez, S.R., "Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements", Corros. Sci., Vol.44, pp.81-99, 2002.
- [137] Bereket, G., Gerengi, H., Korozyon Araştırmalarında Elektrokimyasal Ölçümler Ne Derece Doğru Değerlendiriliyor ?, Korozyon 21 (1-3), s 33-44, 2015.



- [138] Küstü, C., Asitli Ortamdaki Korozyona Karşı Schiff Bazı Temelli Bazı Yeni inhibitörler Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [139] <http://ndt.wtndt.metu.edu.tr/tahribatsiz-muayene-yontemleri>, Erişim Tarihi: 11.06.2021.
- [140] Yalçın, H. Koç, T., Mühendisler İçin Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası 7-11., 1997.
- [141] Yalçın, H. Koç, T., Mühendisler İçin Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası 7-13., 1997.
- [142] [https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14\\_03\\_00\\_aca05.pdf](https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_03_00_aca05.pdf), Erişim Tarihi: 11.06.2021.
- [143] TUCSA, Yapı Çeliği İşleri Teknik Şartnamesi, Teknik Yayınlar Serisi-3, İstanbul, 2007.
- [144] ASM Handbook, "Corrosion", Vol 13., 1992.
- [145] Batchelor, A.W. ve ark., Materials Degradation and its Control by Surface Engineering, Imperial College Press, London, 219-225, 2002.
- [146] Kaftan, M.A., Çelik yapılarda korozyon oluşumu ve korozyondan korunma yöntemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 4-39, 2006.
- [147] Akman, S.B., Sıcak Daldırma Galvanizle Sürdürülebilir Korozyon Koruması, 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, s.145, 2015.
- [148] Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C., ISO 6892-1 ve ASTM E8 Çekme Deney Standartları Arasındaki Farklılıklar, Kocaeli, 2018.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Kader DİKMEN

### ÖĞRENİM DURUMU

<b>Derece</b>	<b>Eğitim Birimi</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / İnşaat Mühendisliği	2018
Lise	Arsal Anadolu Lisesi	2014

### İŞ DENEYİMİ

<b>Yıl</b>	<b>Yer</b>	<b>Görev</b>
2019-Halen	Fibrobeton Yapı Elemanları A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi

### YABANCI DİL

İngilizce

### ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. 7. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Asit Yağmurlarının Cam Elyaf Takviyeli Betonların Montajında Kullanılan Ankraj Elemanlarının Korozyon Mekanizmasına Etkisinin Araştırılması, 2021
2. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Elektro Galvaniz İşleminin St37 Ankraj Elemanının Korozyon Mekanizmasına Etkisinin Araştırılması, 2021
3. 8. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Farklı Korozyon S 235 Kutu Profillerinin Basınç Dayanımları Üzerine Etkilerinin Araştırılması, 2021

4. IATS'21 9th International Advanced Technologies Symposium, Ultra Erken Dayanımlı Betonlar, 2021
5. 8. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Investigation of The Corrosion Behavior of Hot Dip Galvanized (HDG) St37 Steel 3,5% NaCl Solution, 2021