



**İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN
HİDROKLORİK ASİT KOROZYONU
ETKİSİNDE BURKULMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mahmut Buğra BİLEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN HİDROKLORİK ASİT KOROZYONU
ETKİSİNDE BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

(Investigation of Buckling Behaviour of Thin Walled Steel Tanks Corroded by Hydrochloric
Acid)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mahmut Buğra BİLEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Erzurum
Aralık, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Mahmut Buğra BİLEN tarafından hazırlanan “İnce Cidarlı Çelik Tankların Hidroklorik Asit Korozyonu Etkisinde Burkulma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı çalışması 10 / 12 / 2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Mahyar MAALI <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahmut KILIÇ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü
Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FHD-2019-7272, FHD-2019-7344

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında sunulan “İnce Cidarlı Çelik Tankların Hidroklorik Asit Korozyonu Etkisinde Burkulma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	1	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Tezin Geneli	5	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Mahmut Buğra BİLEN	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
14.12.2021	14.12.2021
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatımda ve kariyerimde önemli yeri olan, benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, bilgilerinden ve tecrübelerinden sürekli faydalandığım ve faydalanmaya devam edeceğim kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarımda bana sürekli destek olan ve takıldığım her konuda yardımcı olan kıymetli hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahyar MAALI ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mahmut KILIÇ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her anında bana destek olan ve dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen ailemin her bir ferdine çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımızı beraber yürüttüğümüz sevgili dostum Muhammet ÇİNAR'a teşekkür ederim.

Bu çalışma FHD-2019-7272, FHD-2019-7344 numaralı projeler kapsamında Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Çalışmaya katkılarından ötürü Atatürk Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Mahmut Buğra BİLEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN HİDROKLORİK ASİT KOROZYONE ETKİSİNDE BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mahmut Buğra BİLEN

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Amaç: Bu çalışmada değişken oranda hidroklorik asit çözeltileriyle doldurulan ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasiteleri incelenmiştir. Korozyon dolayısıyla burkulma kapasitesinde azalma olan silindirler CFRP (karbon fiberle güçlendirilmiş polimer) kumaşlar ile güçlendirilerek CFRP'nin silindirlerin burkulma kapasitesine etkisi araştırılmıştır.

Yöntem: Bu çalışmada 800x400x0,45 mm boyutlarında 12 adet ince cidarlı çelik tank kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında 10 adet ince cidarlı tank literatürdeki oranlar göz önünde bulundurularak %5 ve %10 hidroklorik asit içeren çözeltilerle tam ve yarım dolu olacak şekilde doldurulup 24 saat korozyona maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda silindirlerde korozyonun sebep olduğu ağırlık kaybı belirlenmiştir. İkinci aşamada ise tanklar CFRP'siz ve çeşitli boyutlarda CFRP kumaş ile kaplanarak, vakumlu deney düzeneğinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Tanklara ait burkulma yükleri ölçüm cihazlarından elde edilen verilerle hesaplanmıştır. Burkulma deney verileri teorik formüllerle karşılaştırılmıştır.

Bulgular: Korozyon tanklarda deformasyon oluşturarak ağırlık kaybına sebep olmuştur. %10 asit çözeltisiyle tam doldurulan tanklarda ağırlık kaybı %4 civarındayken, %5'lik çözeltiyle tam doldurulan tanklarda ağırlık kaybı %3 civarındadır. Yarı dolu tanklarda bu oran %1'e düşmektedir. Ayrıca korozyon silindirlerin burkulma kapasitesinde azalmaya sebep olmuştur. Tam doldurulan tanklarda burkulma kapasitesinde %16 ile %64 arasında değişen oranlarda azalma görülmüştür. CFRP uygulaması yapılan tankların ilk burkulma kapasitesinde %66'ya kadar artış gerçekleşmiştir. CFRP ile güçlendirilen yüzey alanı arttıkça burkulma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. CFRP güçlendirmesinin küçük boyutlarda yapılması bile burkulma kapasitesini arttırmıştır.

Sonuç: Korozyon dolayısıyla ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasitesinde önemli derecede düşüş olmaktadır. CFRP kumaş ile güçlendirme yapılan tanklarda dayanımın büyük ölçüde geri kazandırılabilir. Asit yüzdesi, doluluk oranı ve CFRP ile kaplanan yüzey alanının büyüklüğü burkulma kapasitesini etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: ince cidarlı silindirik tank, korozyon, hidroklorik asit, cfrp (karbon fiberle güçlendirilmiş polimer), burkulma kapasitesi, ağırlık kaybı.

Aralık 2021, 89 sayfa

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOUR OF THIN WALLED STEEL TANKS CORRODED BY HYDROCHLORIC ACID

Mahmut Buğra BİLEN

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Purpose: Buckling capacities of thin-walled steel tanks filled with varying rates of hydrochloric acid solutions has been examined. Effect of strengthening the tanks with CFRP fabrics and corrosion on the buckling capacity of cylinders has been examined.

Method: Tanks with the dimensions of 800x400x0.45 mm filled with acidic solutions containing 5% and 10% hydrochloric acid and exposed to corrosion. After corrosion tests, weight loss of the cylinders determined. In second stage, tanks were covered with CFRP fabrics and buckling test was carried out in a vacuum test setup. The buckling loads of the tanks were calculated with the data obtained from the measuring devices. Buckling test results were compared with the theoretical formulas.

Findings: Weight loss caused by corrosion is around 4% for tanks fully filled with 10% acid solution, and it's around 3% for tanks fully filled with 5% acid solution. This rate is 1% for half filled tanks. Corrosion also caused a decrease in the buckling capacity of tanks. Buckling capacity loss of full filled tanks is varying between 16% and 64%. The initial buckling capacity of tanks strengthened with CFRP fabrics has increased up to 66%.

Results: Corrosion significantly decreased the buckling capacity of tanks. It has been observed that the strength can be recovered by strengthening the tanks with CFRP fabrics. Rate of acid in the solution, filling rate of tanks, and the size of the surface area covered with CFRP fabrics affects the buckling capacities.

Keywords: thin walled cylindrical tank, corrosion, hydrochloric acid, cfrp (carbon fiber reinforced polymer), weight loss

December 2021, 89 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Korozyon.....	3
Metalik korozyon çeşitleri.....	4
Korozyonun malzeme üzerindeki etkileri	6
İnce Cidarlı Çelik Tanklar.....	11
İnce cidarlı çelik tankların güçlendirilmesi.....	12
MATERYAL VE YÖNTEM	15
Materyal	15
Hidroklorik asit	15
Foamboard levhalar.....	15
CFRP kumaşlar	16
Epoksi yapıştırıcı ve epoksili astar.....	17
LVDT deformasyon ölçme aleti.....	17
Strain gauge (gerinim pulu)	18
Veri toplama sistemi (Data logger)	18
Yöntem.....	19
Silindirlerin hazırlanışı.....	19
Korozyon deneyi	22
Burkulma deneyi	22
Teorik burkulma değerleri ve dalga sayısı	29
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
Korozyon Deneyi Sonuçları.....	30
Burkulma Deneyi Sonuçları.....	33

Korozyonsuz silindirler	35
%10'luk asit çözeltisiyle tam dolu silindirler	40
%5'lik Asit Çözeltisiyle Tam Dolu Silindirler	45
%10'luk Asit Çözeltisiyle Yarı Dolu Silindirler	50
%5'lik Asit Çözeltisiyle Yarı Dolu Silindirler	57
Aynı oranda asit çözeltisiyle farklı miktarda doldurulan silindirler	65
Aynı boyutta CFRP ile kaplanan silindirler	65
Silindirlerde oluşan hasarlar	66
Deneyssel ve teorik burkulma kapasitelerinin kıyaslanması	66
Silindirlerin enerji absorbe kapasitesi	67
SONUÇ ve ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Hidroklorik Asitin Özellikleri.....	15
Tablo 2. Kullanılan CFRP Kumaşın Özellikleri.....	16
Tablo 3. Silindirlere Ait Detaylar	21
Tablo 4. Cihazların Yerleştirildiği Konumlara Ait Bilgiler.....	28
Tablo 5. Silindirlerin Korozyon Deneyi Öncesi ve Sonrası Ağırlıkları	30
Tablo 6. Silindirlerin Burkulma Değerleri.....	34
Tablo 7. Silindirlerde Oluşan Dalga Sayıları.....	66



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Korozyon döngüsü.	3
Şekil 2. Korozyon çeşitleri	6
Şekil 3. Farklı oranda HCl asit içeren çözeltilerde zamanla açığa çıkan Hidrojen miktarı	7
Şekil 4. Kırılma bölgesinde oluşan çukur korozyonu	10
Şekil 5. Deney düzeneği ve numunenin yerleşimi	12
Şekil 6. Oluşan hasar çizgileri	12
Şekil 7. Çalışmada kullanılan numuneler	14
Şekil 8. Sızdırmazlık için kullanılan foamboard levha	16
Şekil 9. Çalışmada kullanılan CFRP kumaş	17
Şekil 10. LVDT deformasyon ölçüm aletleri	17
Şekil 11. Gerinim pulları	18
Şekil 12. Veri toplama cihazı (Data logger)	19
Şekil 13. Çalışmada kullanılan silindir ve birleşim bölgesi	20
Şekil 14. Farklı boyutlarda CFRP kumaş ile kaplanmış numuneler (a) silindir yüksekliği boyunca (b) silindir yüksekliğinin yarısına kadar (c) silindir yüksekliğinin ortasında 100 mm CFRP kumaş ile kaplı silindir.	21
Şekil 15. Korozyon deneyi aşamaları (a) silindirin yerleştirileceği bölgenin belirlenmesi (b) yerleştirilen silindirin temas bölgesine silikon çekilmesi (c) silindire çözelti doldurulması	22
Şekil 16. CFRP uygulama aşamaları (a) silindir yüzeyine yapıştırıcı sürülmesi (b) uygun boyutta CFRP kumaş kesilmesi (c) silindir yüzeyine CFRP kumaş yapıştırılması (d) CFRP kumaş üzerine yapıştırıcı sürülmesi.	23
Şekil 17. Korozyonsuz silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) korozyonsuz CFRP'siz silindir (b) korozyonsuz tam CFRP'li silindir.	24
Şekil 18. %10 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S1-F-A10-CY (b) S2-F-A10-CF.	24
Şekil 19. %5 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S3-F-A5-CY (b) S4-F-A5-CF.	25
Şekil 20. %10 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S5-Y-A10-C400 (b) S6-Y-A10-CF (c) S7-Y-A10-C100.	25
Şekil 21. %5 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S8-Y-A5-C100 (b) S9-Y-A5-C400 (c) S10-Y-A5-CF	26
Şekil 22. Deney sistemi	27

Şekil 23. Deney sistemine yerleştirilmiş örnek bir numune ve cihazların yerleşimi	28
Şekil 24. %10 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S1-F-A10-CY (b) S2-F-A10-CF.	31
Şekil 25. %5 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S3-F-A5-CY (b) S4-F-A5-CF.	32
Şekil 26. %10 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S5-Y-A10-C400 (b) S6-Y-A10-CF (c) S7-Y-A10-C100.....	32
Şekil 27. %5 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S8-Y-A5-C100 (b) S9-Y-A5-C400 (c) S10-Y-A5-CF.....	33
Şekil 28. Korozyonsuz CFRP'siz silindirde oluşan dalgalar	35
Şekil 29. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma sonrası durumu	36
Şekil 30. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma yükü- deplasman grafiği	36
Şekil 31. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	37
Şekil 32. Korozyonsuz CFRP'li silindirde oluşan dalgalar	38
Şekil 33. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma sonrası durumu	38
Şekil 34. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma yükü- deplasman grafiği	39
Şekil 35. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	39
Şekil 36. S1-F-A10-CY'de oluşan dalgalar	40
Şekil 37. S1-F-A10-CY'nin burkulma sonrası durumu	41
Şekil 38. S1-F-A10-CY'nin burkulma yükü- deplasman grafiği	41
Şekil 39. S1-F-A10-CY'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	42
Şekil 40. S2-F-A10-CF'de oluşan dalgalar	43
Şekil 41. S2-F-A10-CF'nin burkulma sonrası durumu	43
Şekil 42. S2-F-A10-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği.....	44
Şekil 43. S2-F-A10-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	44
Şekil 44. S3-F-A5-CY'de oluşan dalgalar	45
Şekil 45. S3-F-A5-CY'nin burkulma sonrası durumu	46
Şekil 46. S3-F-A5-CY'nin burkulma yükü- deplasman grafiği	46
Şekil 47. S3-F-A5-CY'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	47
Şekil 48. S4-F-A5-CF'de oluşan dalgalar	48
Şekil 49. S4-F-A5-CF'nin burkulma sonrası durumu	48
Şekil 50. S4-F-A5-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği.....	49
Şekil 51. S4-F-A5-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	49
Şekil 52. S5-Y-A10-C400'de oluşan dalgalar.....	50
Şekil 53. S5-Y-A10-C400'ün burkulma sonrası durumu.....	51

Şekil 54. S5-Y-A10-C400'ün burkulma yükü- deplasman grafiği	51
Şekil 55. S5-Y-A10-C400'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	52
Şekil 56. S6-Y-A10-CF'de oluşan dalgalar	53
Şekil 57. S6-Y-A10-CF'nin burkulma sonrası durumu	53
Şekil 58. S6-Y-A10-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği	54
Şekil 59. S6-Y-A10-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	54
Şekil 60. S7-Y-A10-C100'de oluşan dalgalar.....	55
Şekil 61. S7-Y-A10-C100'ün burkulma sonrası durumu.....	56
Şekil 62. S7-Y-A10-C100'ün burkulma yükü- deplasman grafiği	56
Şekil 63. S7-Y-A10-C100'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	57
Şekil 64. S8-Y-A5-C100'de oluşan dalgalar.....	58
Şekil 65. S8-Y-A5-C100'ün burkulma sonrası durumu.....	58
Şekil 66. S8-Y-A5-C100'ün burkulma yükü- deplasman grafiği	59
Şekil 67. S8-Y-A5-C100'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	59
Şekil 68. S9-Y-A5-C400'de oluşan dalgalar.....	60
Şekil 69. S9-Y-A5-C400'ün burkulma sonrası durumu.....	61
Şekil 70. S9-Y-A5-C400'ün burkulma yükü- deplasman grafiği	61
Şekil 71. S9-Y-A5-C400'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği	62
Şekil 72. S10-Y-A5-CF'de oluşan dalgalar	63
Şekil 73. S10-Y-A5-CF'nin burkulma sonrası durumu	63
Şekil 74. S10-Y-A5-CF'nin burkulma yükü-deplasman grafiği	64
Şekil 75. S10-Y-A5-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği.....	64
Şekil 76. Deneysel ve teorik ilk burkulma değerleri	67
Şekil 77. Silindirlerin enerji absorbe kapasitesi	68

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

%	: Yüzde işareti
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polimer)
cm	: Santimetre
CO₂	: Karbondioksit
EIS	: Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
g	: Gram
HCl	: Hidroklorik asit
kPa	: Kilopascal
LVDT	: Linear Variable Differential Transformer (Deplasman ölçüm cihazı)
m	: Metre
mm	: Milimetre
N	: Newton
NaCl	: Sodyum klorür
pH	: Power Hydrogen (Hidrojenin Gücü)

GİRİŞ

İnce cidarlı çelik tanklar silo, sıvı ve gaz tankı, deniz yapıları, soğutma kuleleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda ve mühendislik alanlarında sıkça kullanılmaktadır. Kullanım alanı oldukça yaygın olan ince cidarlı çelik tanklar, hafif olmalarına rağmen yüksek mukavemet değerleri sundukları için sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tür yapıların kullanım alanlarının artması dolayısıyla, yapılarda kullanım ömrü boyunca oluşacak doğal veya dış etkenler kaynaklı etkilerin incelenmesi gerekmektedir.

İnce cidarlı çelik tankların depolama amaçlı kullanıldığı durumlarda kullanım ömrü boyunca oluşabilecek sorunlardan biri tank içerisindeki basıncın değişmesidir. Sıcaklık değişimi, malzeme seviyesindeki artma veya azalma, depolanan malzemenin hareket etmesi gibi etkenler tank içerisindeki basıncın değişmesine yol açmaktadır. Ayrıca tankların boşaltımı esnasında tank içerisinde vakum etkisi oluşabilmektedir. Bu tür basınç değişimleri dolayısıyla tanklar beklenenin üzerinde yüke maruz kalabilmektedir. Bunun sonucunda ise tanklarda burkulma gözlemlenebilmektedir. Genel olarak silindirik kabukların burkulma davranışı üç faktöre bağlıdır. Bu faktörler şunlardır:

1. Silindirlerin geometrik özellikleri
2. Silindir yapımında kullanılan malzemenin özellikleri
3. Silindirin maruz kaldığı yükler.

Bu faktörlerde gerçekleşecek değişiklikler silindirlerin burkulma kapasitesini doğrudan etkilemektedir.

Özellikle akışkan depolama için kullanılan ince cidarlı çelik tanklar, içerisinde depolanan sıvı veya gaz dolayısıyla korozyona maruz kalabilmektedir. Depolanan malzemenin düşük pH değerine sahip olması durumunda tankların iç yüzeyinde korozyon oluşmaktadır. Zaten ince olan cidar kalınlığı korozyon dolayısıyla iyice incelmekte ve tanklarda yapısal deformasyon oluşmaktadır. Oluşan deformasyon tankların patlamasına veya delinmesine yol açabileceğinden büyük risk teşkil etmektedir. Ayrıca korozyon dolayısıyla tankın cidar kalınlığının incelenmesi, burkulma kapasitesinin de düşmesine sebep olmaktadır.

Tanklarda korozyon, basınç değişimi gibi durumlar mekanik özellikleri etkilediğinden yapının kullanım ömrünü de etkilemektedir. Deforme olmuş bir ince cidarlı çelik tank beklenenden daha kısa sürede kullanım ömrünü tamamlayacaktır. Bu problemler göz önüne

alındığında, düşük pH değerine sahip bir sıvı ile doldurulan tankların mekanik özelliklerinin ve özellikle burkulma kapasitelerinin incelenmesi gerektiği görülmektedir.

Korozyon veya başka bir etken dolayısıyla burkulma kapasitesi azalmış bir yapı beklenenden daha düşük yükler altında deforme olacağından risk teşkil etmektedir. Bu sebeple deforme olmuş ve yük taşıma kapasitesi azalmış bir yapının güçlendirilmesi gereği doğmaktadır. Depolama amaçlı kullanılan ince cidarlı çelik tanklarda sıvı ile temasta olan ve korozyona uğrayan iç yüzeyin güçlendirilmesi dış yüzeyin güçlendirilmesine göre daha zordur. Çünkü tank içerisinde güçlendirme yapabilmek için tankın boşaltılması gerekmektedir. Mevcut yapılar düşünüldüğünde güçlendirme için en uygun seçenek tankın dış yüzeyinde bir güçlendirme yapmaktır.

Bu çalışmada korozyon dolayısıyla cidar kalınlığı incelen çelik tankların güçlendirilmesi amacıyla tankın dış yüzeyine CFRP (Karbon Lifle Güçlendirilmiş Polimer) kumaşlar yapıştırılacaktır. Yapı sektöründe kullanımı oldukça yaygınlaşan CFRP malzemeler özellikle deforme olmuş yapı bileşenlerinde kullanılmaktadır. Hafif olmalarının yanında yüksek mukavemet değerlerine sahip olmaları güçlendirme için tercih edilmelerinde en önemli etkidir. Ayrıca istenilen boyutta kesilip istenilen yönde yapıştırılabilmeleri, kullanım ve uygulama kolaylığı sunduğundan CFRP malzemeler güçlendirme için sıkça tercih edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, hidroklorik asit etkisindeki ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasitesi incelenmiştir. Çalışmanın asıl hedefleri şöyle sıralanabilir:

1. Asidik korozyonun silindirlerin burkulma ve burkulma sonrası kapasitesine etkisini çözeltideki asit oranına ve silindirlerin doluluk oranına bağlı olarak incelemek.
2. Silindirlerde korozyon sebebiyle oluşacak ağırlık kaybını belirlemek.
3. Korozyon dolayısıyla burkulma kapasitesinde azalma olacak silindirlerin yüzeyine çeşitli boyutlarda CFRP kumaşlar yapıştırıp güçlendirilerek dayanım kaybının ne derecede geri kazanılabileceğinin araştırılması.
4. Deneyler sonucunda elde edilen burkulma değerleri ile teorik formüllerden elde edilen burkulma değerlerinin kıyaslanması.

KURAMSAL TEMELLER

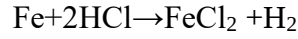
Korozyon

Korozyon doğadaki denge sebebiyle malzemelerin daha kararlı oldukları hale dönmesi olayıdır (Singh 2014). Günümüzde kullanılan çoğu metal (altın ve platin hariç) doğada bileşik halinde bulunmaktadır. Doğadan bileşik halinde alınan ve işlenerek metal veya alaşım olarak kullanılan bu malzemelerin doğal hallerine dönme eğilimi yüksektir. Bu eğilimin sonucu olarak metaller ve alaşımlar bulundukları ortamdaki elemanlar ile reaksiyona girip önce iyonik hale, daha sonra ise ortamdaki diğer elementlerle birleşip bileşik haline dönmeye çalışırlar. Korozyon, kararsız halde bulunan metallerin atmosferik ortamda kararlı hale dönme sürecidir (Marcus 2011). Korozyon sürecini gösteren bir görsel Şekil 1’de verilmiştir.

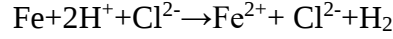


Şekil 1. Korozyon döngüsü (Anonymous 2019).

En temel korozyon reaksiyonlarından biri, saf bir demirin güçlü bir asit olan hidroklorik asitin içerisine atılması durumunda oluşur. Demirin asitle etkileşime geçmesiyle ilk aşamada çözelti köpürmeye başlar. Bu reaksiyon şu şekilde ifade edilebilir:



Demir hidroklorik asitin içerisine atıldığında demirin oksidasyon ile kaybettiği elektronları hidrojen iyonları alır. Metalin yüzeyinde gerçekleşen bu elektron alışverişinde elektronların kaybedildiği bölgeler anot, absorbe edildiği bölgeler ise katot olarak adlandırılır. Negatif yüklü iyonlar anottan katoda, pozitif yüklü hidrojen iyonları ise katottan anoda hareket ederek metal yüzeyinde korozyon oluşmasına sebep olur. Demir ile HCl asit arasındaki reaksiyon elektrokimyasal seviyede şu şekilde ifade edilebilir:



Burada demir oksidasyonla iki elektron vererek demir iyonuna dönüşür. Bu iki elektronu hidrojen iyonu alarak hidrojen gazına dönüşür. Anodik bölgelerin metal yüzeyinde hareketiyle üniform korozyon oluşur (Schweitzer 2010).

Metalik korozyon çeşitleri

Genel (üniform) korozyon

Genel korozyon, korozyona maruz kalan yüzeyde eşit oranda metal kaybı olmasıdır. Genel olarak malzemenin yüzeyinde eşit oranda gerçekleşen korozyon olarak tanımlanabilmektedir. Genelde bir kimyasal etki dolayısıyla ya da metalik bileşenin metal iyonlarına ayrışmasıyla oluşur. Üniform korozyon en sık görülen korozyon çeşididir.

Taneler arası korozyon

Bu korozyon tipi, metalin tane sınırlarında gerçekleşen özel bir korozyon türüdür. Metallerin eritilmesi ya da soğutulması esnasında kristallerin uç bölgelerinde oluşan bozulmalar sonucu bazı bölgeler korozyona karşı dayanıksız hale gelebilir. Bu korozyon, taneler arası sınır çizgilerinde meydana gelir. Taneciğin gövdesinde çok fazla hasar görülmez. Tane sınırı malzemesi anot, tanenin büyük kısmı ise katot olarak davranır. Böylece korozyon metale derinlemesine nüfuz ederek zarar verir.

Galvanik korozyon

Aynı ortamda birbirine bağlanan iki farklı metal arasında oluşan korozyondur. Bu tip korozyona boru bağlantılarında (özellikle eski boruların yeni borulara bağlandığı noktada), kaynak bölgelerinde rastlanmaktadır. İki farklı metalin birbirine bağlandığı noktadaki elektriksel potansiyel sebebiyle çözünme daha hızlı gerçekleşmektedir. Bağlanan metallerden daha soy olan katot, daha aktif olan ise anot olarak görev yapar. Galvanik korozyon oluşmasını önlemek için galvanik dizide birbirine yakın olan metallerin seçilmesi gerekmektedir.

Aralık (çatlak) korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan bir çatlakta ya da aralıkta oksijen transferinin zorlaşması sebebiyle meydana gelen yerel korozyon türüdür. Birbiri ile iyi örtüşmeyen iki yüzey arasında oluşur. Metal yüzeyindeki boşluklar, çatlaklar vb. gibi bölgelerde çözelti durgun halde kalır ve bu bölgelere oksijen transferi zorlaşır. Bu korozyonun asıl sebebi oksijen konsantrasyonlarındaki farklılıklardır. Çok küçük çatlaklarda bile bu korozyon gözlemlenebilir. Çatlak, aralık bölgesi anot, çatlağın çevresindeki metal yüzey ise katot olarak görev yapar. Perçin ve cıvatalı bağlantılarda sıkça görülmektedir.

Oyulma (çukur) korozyonu

Çukur korozyonu lokalize edilmiş bir bölgedeki metal kaybı olarak ifade edilebilir. Yüzeyde derin ve küçük bir delik şeklinde gözlemlenir. Çukur korozyonu genelde durgun halde sıvı içeren tanklarda ve sıvının akış hızının yavaşladığı borularda görülür. Oluşan çukur malzemenin kalınlığını oldukça azaltabilmekte hatta bazen delebilmektedir. Bu tip korozyonda deliğin dibi anot, metalin yüzeyi ise katot görevini üstlenir. Çukur korozyonu sebebiyle lokal dayanımın düşmesi, yapısal deformasyonlara sebep olabilir. Çukur korozyonunu çevre sıcaklığı, temas eden sıvının pH değeri etkiler.

Erozyonlu korozyon

Erozyon terimi mekanik kuvvetlerden kaynaklanan bozulmayı ifade eder. Erozyona katkıda bulunan faktörlerin metalin korozyon hızını arttırmasına erozyon korozyonu denir. Korozif çözeltilerin metalin yüzeyinden hızlı bir şekilde akması halinde erozyon korozyonu oluşur. Erozyon korozyonunu etkileyen en önemli faktör akış hızıdır.

Gerilmeli korozyon çatlaması

Gerilmeli korozyon çatlaması, statik çekme gerilimi varlığında alaşımların çatlamasıyla gecikmeli hasar görmeleri olarak tanımlanır. Korozif ortamdaki metal, aynı zamanda statik bir gerilim altında ise metalin çatlaması korozyonun başlaması için uygun ortam oluşmasını sağlar.

Biyolojik korozyon

Yaşayan organizmaların aktiviteleri dolayısıyla metalde oluşan, asit ve sülfür gibi bileşiklerin oluşturduğu korozyondur. Nitrik asit üretimi, organik asit üretimi, amonyak üretimi, bakteriler tarafından sülfürik asit üretimi biyolojik korozyona sebep olabilir.

Seçici korozyon

Alaşımdaki bileşenlerden birinin korozyon dolayısıyla ayrılması seçici korozyon olarak adlandırılır. Pirinçte inkonun seçici çözünmesi bu korozyonun en bilinen örneğidir. Alaşımdan ayrılan bileşen genelde daha az asal olan bileşendir.

Korozyon yorulması

Korozyon yorulması bir metalin korozif ortamda tekrarlanan yükler altında atlmasıdır. Uygulanan yük arttıkça çatlama için gereken zaman kısılır (Schweitzer 2010).

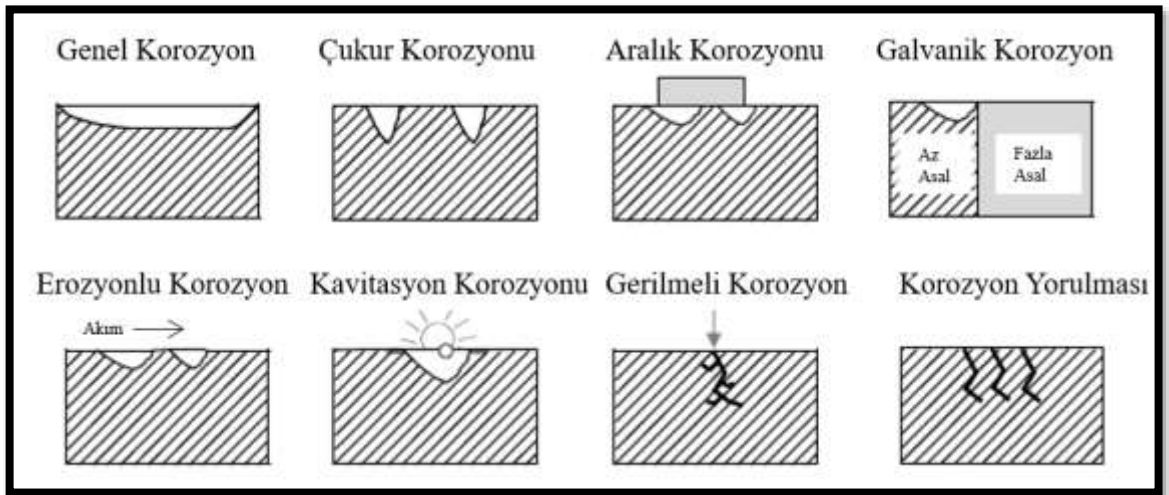
Sıvı metaller sebebiyle oluşan korozyon

Metallerin sıvı metallerle temas ettiği lehimleme, galvanizleme gibi işlemler dolayısıyla oluşan korozyon çeşididir. Metalin sıvı metalle uzun süre temas halinde bulunması sonucu oluşur.

Kavitasyon korozyonu

Akışkan hızının yüksek olduğu durumlarda karşılaşılır. Akışkan içerisinde bulunan kabarcıklar (gaz veya buhar) dolayısıyla oluşur. Kabarcıkların metal yüzeyinde ani patlamasıyla oluşturduğu hasar kavitasyon korozyonu olarak adlandırılır (Anonymous 2021).

Günümüzde sıkça karşılaşılan bazı metalik korozyon çeşitlerine ait detaylar şekil 2’de verilmiştir.



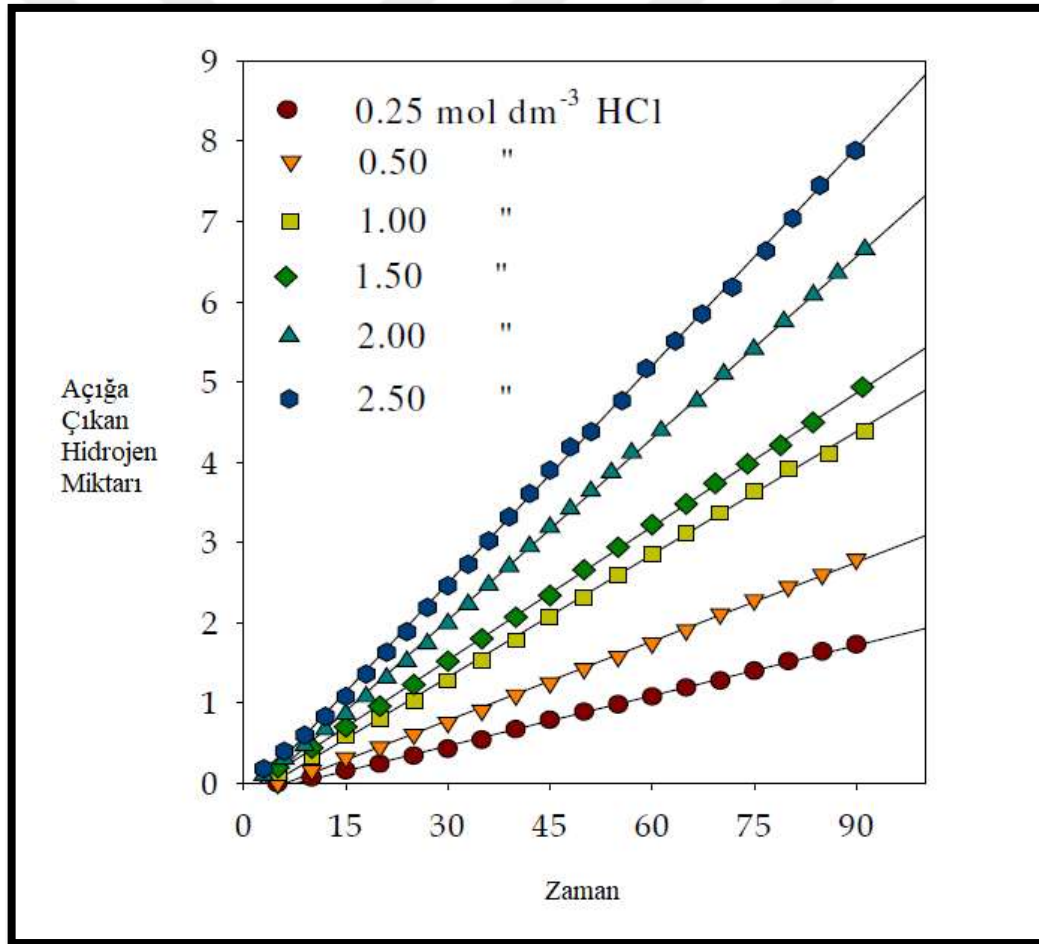
şekil 2. Korozyon eşitleri (Landolfo *et al.* 2010)

Korozyonun malzeme üzerindeki etkileri

18. yüzyıldan itibaren elik üretiminin artmasıyla birlikte korozyonun hayatımızdaki önemi artmıştır. Korozyon nedeniyle malzemede kayıp oluşmakta ve çevreye zarar verilmektedir (akır 2016).

Korozyonun sağlık açısından da önemi bulunmaktadır. Çünkü, elik malzemeler cerrahi alanında da kullanılmaktadır. rnek olarak, tıbbi implant malzemesi olarak kullanılan ostenitik paslanmaz çelikler verilebilir. Bu malzemenin oyuklanma ve aralık korozyonu gibi lokal korozyon dirençleri düşük olduğu için vct içerisinde korozyona uğramaları sonucu salınan iyonlarla vcda zarar verebilmektedir (elik 2010).

Noor ve Al-Moubaraki (2008) tarafından yapılan çalışmada düşük karbonlu çeliğin çeşitli oranlarda HCl asit içeren 50 ml'lik çözeltilerdeki korozyon davranışı incelenmiştir. Farklı oranda HCl asit içeren çözeltilerde açığa çıkan Hidrojen miktarı şekil 3'te verilmiştir. Asit oranının fazla olduğu çözeltilerde metal daha hızlı çözündüğünden daha fazla Hidrojen açığa çıkmıştır. Son olarak artan asit oranının korozyon hızını ve korozyon oranını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca artan asit oranı ile malzeme yüzeyinde görülen korozyon hasarlarının (genel ve çukur korozyonu) arttığı ifade edilmiştir.



şekil 3. Farklı oranda HCl asit içeren çözeltilerde zamanla açığa çıkan Hidrojen miktarı (Noor and Al-Moubaraki 2008)

Korozyon oranı ortam şartlarına göre değişkenlik gösterir. Yapılan bir çalışmada ortam sıcaklığının artmasının korozyon oranını arttırdığı ve malzemenin kullanım ömrünü kısalttığı ifade edilmiştir (Gutman *et al.* 2016).

Çelik yapılar çevresel koşullar dolayısıyla korozyona maruz kalmaktadır. Korozyonun kesit özelliklerini zayıflatmasıyla çelik elemanların taşıma kapasitesi düşmektedir. Kapasitedeki bu düşüş güvenlik açısından sıkıntılar oluşturabilmektedir. Korozyonun çelik üzerinde en yaygın etkisi yüzeyde malzeme kaybına neden olması ve daha ince kesitler oluşmasına neden olmasıdır. İncelen kesitlerin kesit alanı, atalet momenti gibi özellikleri de değişmektedir. Ayrıca korozyon elemanın rijitliğinin düşmesine de sebep olmaktadır (Sharifi and Rahgozar 2010b).

Wang *et al.* (2017) çalışmalarında korozyonun, çeliğin mekanik performansı üzerindeki etkilerini yüzey ölçümleri ve çekme testleri yaparak araştırmışlardır. Sekiz yıl dış ortamda kalmış bir çelik kafesten kesilen parçalar üzerinde çalışmışlardır. Numunelerin yüzeyinde yapılan incelemelerde çukur ve genel korozyon olduğu belirlenmiştir. Korozyon hasarı arttıkça deformasyon miktarı ve mukavemetin azaldığını ifade etmişlerdir. Korozyonun sebep olduğu kalınlık kaybı çelik kirişlerin taşıma kapasitesini önemli derecede düşürmüştür.

Çelik elemanlarda kalınlık, yükseklik gibi özelliklerin azaltılması mekanik özelliklerin de azalmasına yol açmaktadır (Sağıroğlu *et al.* 2020).

Korozyon oranının belirlenmesinde ana parametreler kesit kaybı ve ağırlık kaybıdır. Korozyon dolayısıyla elemanların geometrik özelliklerinde değişiklikler olmaktadır. Böylece malzemenin mekanik özellikleri düşmektedir. Korozyon malzemenin bulunduğu ortama göre değişiklik göstermektedir. Cinitha *et al.* (2014) çalışmalarında düşük karbonlu çelik basınç çubuklarının korozyon dolayısıyla mekanik özelliklerindeki azalmaları belirlemişlerdir. Deneyler köşebent ve tüp elemanlardan alınan örnekler üzerinde yapılmıştır. Numuneler değişen oranda (%10- %40) korozyona maruz bırakıldıktan sonra, basınç testi sonuçlarına göre maksimum yük taşıma kapasitelerindeki azalışın belirlenmesi amaçlanmıştır. Yaptıkları bu çalışmada köşebent şeklindeki elemanlardan alınan numunelerdeki maksimum yük taşıma kapasitesindeki azalışın %37,91'e kadar ulaşabileceğini belirlemişlerdir. Tüplerden alınan numunelerde ise bu azalmanın %25'e kadar ulaşabileceğini belirtmişlerdir.

Sharifi ve Rahgozar (2010a) çalışmalarında petrokimya endüstrisinde kullanılan üç adet çelik I kirişte korozyon dolayısıyla meydana gelen kalınlık kaybını ele almışlardır. Çelik elemanların korozyon dolayısıyla yük taşıma kapasitelerinde azalma olmaktadır. Bu elemanlarda korozyonun en yaygın etkisi olarak başlıklardaki kesit kaybı ve gövdedeki delikler gösterilmiştir. Bu kayıplar dolayısıyla profillerin kesme yükü kapasitesinde ve moment taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiştir. Elemanların korozyon sonrası kesme kapasitelerini hesaplayarak korozyonsuz durum ile kıyaslamışlardır.

Lugauskas *et al.* (2016) çalışmalarında alüminyum ve düşük karbonlu çeliğin dış ortamda uzun süre kalmalarının malzemeye etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla 2002-2012 yılları arasında üç farklı ortamda (kırsal, sanayi ve deniz ortamı) teste tabi tutulan numuneler incelenerek oda şartlarında test edilen numunelerle karşılaştırılmıştır. Çelik ve alüminyum malzemelerin korozyonunun bulundukları ortamın atmosferik korozyon seviyesine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Ortamın atmosferik korozyon seviyesinin belirlenmesinde kütle kaybı yöntemini kullanmışlardır. Numuneler incelendiğinde en yüksek kütle kaybının deniz bölgesinde test edilen numunede gerçekleştiği görülmüştür.

Metalle etkileşim halinde olan sıvının pH değeri korozyon hasarını etkilemektedir. İçme sularının taşındığı borularda suyun pH değeri, oksijen içeriği, klorür içeriği, sülfür içeriği oluşacak korozyon miktarını etkilemektedir. Korozyon hem boru malzemesine zarar vermekte hem de içme suyu ile etkileşime geçmesi durumunda sağlık açısından risk teşkil etmektedir. Korozyon davranışı boruların içerisinde bulunan suyun kimyasal özelliklerine bağlıdır (Manliza 2003).

Qiao (2011) çalışmasında su borularının performansının malzeme özelliğinden, kullanım ömründen, boru boyutlarından ve iklim şartlarından etkilendiğini belirtmiştir. Boruların içinde ve dışında oluşan korozyon dolayısıyla boru efektif kalınlığının azaldığı belirlenmiştir. Korozyon zamanla boru hatlarının kalınlıklarını azaltarak çatlaklar oluşmasına sebep olmuştur.

Becerra *et al.* (2000) çalışmalarında yağ içeriğinin suda yağ emülsiyonlarında AISI-SAE 1010 karbon çeliğinin korozyonu üzerindeki etkisini, potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile incelemişlerdir. %0,2 NaCl içeren tuzlu su ve yüzey aktif madde çözeltisi kullanmışlardır. Yağ içeriği arttıkça elektrokimyasal aktivite azalmaktadır. Düşük oranda yağ içeren emülsiyonlarda (<%20-40) yağ içeriği arttıkça korozyon oranının arttığı görülmüştür.

Patané *et al.* (2002) çalışmalarında bir sualtı soluma cihazının parçası olan ve korozyon dolayısıyla hasar gören bir hava tankını incelemişlerdir. Kırılma bölgesinde oluşan çukur korozyonu Şekil 4'te görülmektedir. Basınçlı gaz depolama tanklarında yer alan yoğunlaşmış sudaki CO₂ içeriği suyun pH değerinin düşürmüştür. Asidik özelliği artan su tankın içerisinde korozyon oluşmasına sebep olmuştur. Silindirin iç yüzeyinde üniform korozyon gözlenmiştir.



Şekil 4. Kırılma bölgesinde oluşan çukur korozyonu (Patané *et al.* 2002)

Yapılan bir çalışmada su altı kaynak birleşiminin galvanik korozyon davranışı incelenmiştir. Birleşim bölgesinde meydana gelen galvanik korozyonun korozyon sürecini hızlandığı ifade edilmiştir. Bu bölgede kaynak metali katodik, ana metal ve sıcaklıktan etkilenen bölge ise anodik görev yaparak korozyonu hızlandırmıştır. Kaynak metali ve ana metalin birbirinden farklı olması sebebiyle birleşim bölgeleri galvanik korozyona karşı dayanıksız olduğu ifade edilmiştir (Kong *et al.* 2018).

Korozyondan kaynaklanan hasar ince cidarlı yapıların performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Chegeni *et al.* (2019) yaptıkları çalışmada korozyon derinliği ve korozyon şeklinin ince cidarlı çelik boruların performansına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla iki grup numune hazırlanmıştır. İlk gruptaki numuneler 1,2 mm ve 2,4 mm korozyonlu (boru kalınlığının %20 ve %40'ı) olarak test edilerek korozyon derinliğinin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İkinci gruptaki numunelerde ise korozyon derinliği sabit tutulup (1,36 mm), numuneler üzerinde açılan deliklerin şekli değiştirilerek test edilmiştir (kare, yuvarlak ve dikdörtgen delikler). Korozyon derinliği arttıkça eğilme kapasitesi azaldığı görülmüştür. Korozyondan etkilenen yüzey alanı büyüdükçe eğilme kapasitesinin düştüğü belirlenmiştir.

Zhao *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada oyulma korozyonunun ince cidarlı silindirik tüplerin eğilme kapasitesi üzerindeki etkilerini doğrusal olmayan nümerik analizlerle araştırmışlardır. Silindirlerin kalınlığını azaltarak korozyonu simüle etmişlerdir. Silindirin çeşitli bölgelerinde korozyon çukurları oluşturulmuştur. Korozyon şeklinin eğilme kapasitesini etkilediği ifade edilmiştir. Korozyon dolayısıyla sıkıştırılan tarafta oluşan burkulma eğilme kapasitesinin düşmesine neden olmuştur.

Li *et al.* (2019) çalışmalarında CFRP plakalar ile korozyona uğramış çelik plakalar arasındaki bağı incelemişlerdir. Korozyon için her dört saatte bir beş dakika boyunca sodyum klorit çözeltisi püskürtülmüştür. Korozyon süreleri ve yapışkan kalınlıkları farklı numuneler üzerinde incelemeler yaparak deformasyonun üzerinde yapıştırıcı kalınlığının etkisinin korozyon süresinin etkisinden daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

İnce cidarlı silindirik tüplerin servis ömrü boyunca korozyona maruz kaldığı durumlar bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada korozyona uğramış silindirik tüplerin moment kapasiteleri araştırılmıştır. Nümerik kısımda korozyonu simüle etmek için silindir kalınlığı azaltılmıştır. Korozyon kalınlığının ve oluşan korozyon çukuru derinliğinin moment kapasitesine etkisi incelenmiştir. Tüplere eksenel ve eksantrik yükleme yapılmıştır. Korozyon tüplerin moment kapasitesinin düşmesine neden olmuştur (Zhao *et al.* 2021).

İnce Cidarlı Çelik Tanklar

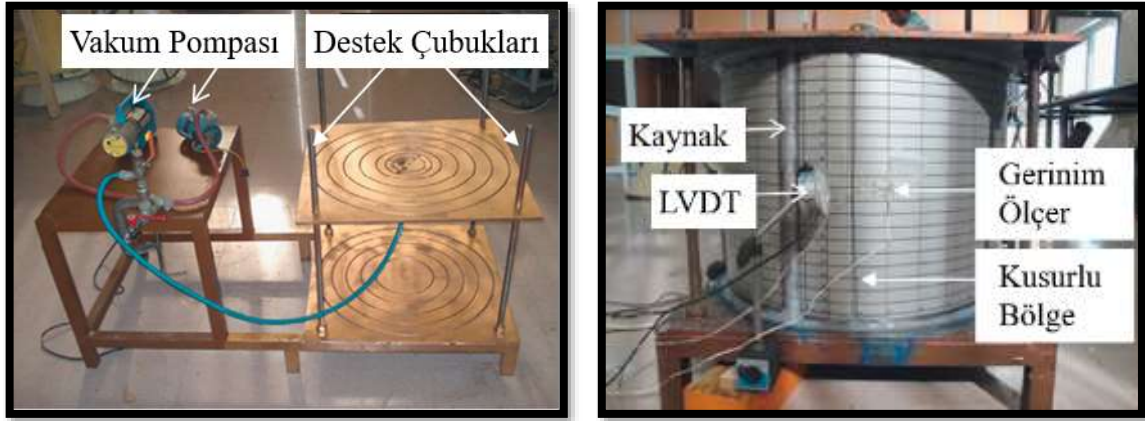
İnce cidarlı çelik tanklar son yıllarda özellikle endüstriyel alanlarda ve mühendislik alanlarında kullanım oranı gittikçe artan yapılardır. Malzemenin ince olması sayesinde sundukları düşük ağırlığın yanında, yüksek mukavemete sahip oldukları için kullanımları her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Çeşitli alanlarda çeşitli etkilere maruz kalarak kullanılan ince cidarlı çelik tankların incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır.

Kabuklar denizaltılar, füzeler, tanklar ve sıvı rezervuarlarının imalatında sıkça kullanılmaktadır. Bu nedenle çeşitli etkiler altında burkulmalarının incelenmesi önem arz etmektedir. Kabukların burkulma davranışı ile boyutları arasında ilişki bulunmaktadır (Korucuk *et al.* 2019). Genelde uygulamada kullanılan kabukların R/t oranı 300 ile 1000 arasında değişmektedir. Yapılan bir çalışmada dış basınç etkisinde kabukların burkulma kapasiteleri incelenmiştir. Kabukların boyu uzadıkça burkulma kapasitelerinin azaldığı gözlemlenmiştir (Golzan and Showkati 2008).

İnce cidarlı konik kabuklar oldukça hassas yapılardır ve burkulma kapasiteleri malzemenin başlangıç kusurlarından etkilenmektedir. Burkulma kapasitelerinin tespiti için teorik formüller yer almaktadır. Yapılan bir çalışmada kabukların burkulma kapasitelerine boyut etkisi incelenmiş, boy uzadıkça kusurların etkisinin daha da arttığı gözlemlenmiştir. Burkulma için verilen teorik formüllerle kıyaslama yapılarak formüllerin yetersizliği ortaya konulmuştur. Kabukların burkulma yükünün başlangıç kusurları ve yüksekliğe bağlı olduğu ifade edilmiştir (Maali *et al.* 2018a; Maali *et al.* 2018b).

Fatemi *et al.* (2013) çalışmalarında H/R, R/t (H: yükseklik, R: yarıçap t: kalınlık) ve kusur oranları (4t, 8t) değişen numuneleri dört grupta inceleyerek burkulma davranışlarını gözlemlemişlerdir. İnce cidarlı kabuk yapıların çeşitli yüklemeler altında yük taşıma kapasitelerinin büyük ölçüde geometrik kusurların kesitsel form derinliğine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Bu kusurlar üretim veya kaynak yapımı esnasında ortaya çıkabilmektedir. Çalışmada kullanılan test sistemine ait fotoğraf Şekil 5'te verilmiştir. Ayrıca Şekil 5'te numunenin yerleşimi ve ölçüm cihazları gösterilmiştir. Başlangıçtaki kusurların derinliği

arttıkça burkulma kapasitesinin düştüğü belirtilmiştir. Deney sonrası numunede oluşan V şeklindeki hasar Şekil 6’da görülmektedir.



Şekil 5. Deney düzeneği ve numunenin yerleşimi (Fatemi *et al.* 2013)



Şekil 6. Oluşan hasar çizgileri (Fatemi *et al.* 2013)

Silindirik çelik yapıların burkulma davranışı birleşim noktalarındaki kaynak sebepli kusurlardan etkilenmektedir. Niloufari *et al.* (2014) yaptıkları çalışmada t/R oranlarına göre üç farklı gruba ayrılan 12 numuneyi hidrostatik basınç altında test etmişlerdir. Buna göre farklı t/R oranlarında oluşan geometrik kusurların silindirlerin burkulma kapasitesini artırıcı veya azaltıcı etkiye sahip olabileceğini belirtmişlerdir.

İnce cidarlı çelik tankların güçlendirilmesi

Kullanım ömrü boyunca çeşitli etkiler dolayısıyla mekanik özelliklerinde kayıp meydana gelen yapı elemanlarının güçlendirilmesi oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Son yıllarda güçlendirme yöntemlerinin uygulandığı çalışmalar araştırmacılar tarafından sıklıkla incelenmektedir (Maali *et al.* 2016a; Maali *et al.* 2016b; Kılıç *et al.* 2020a; Kılıç *et al.* 2020b; Maali *et al.* 2020; Aydın *et al.* 2021a).

İnce cidarlı tankların çeşitli mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla güçlendirilme yapılması oldukça yaygındır. Özellikle tanklara dışarıdan yapılacak güçlendirme için en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri tankların CFRP (karbon fiberle güçlendirilmiş polimer) kumaşlar ile kaplanmasıdır. Hasar görmüş elemanların dıştan CFRP ile sarılarak güçlendirilmesi etkili bir yöntemdir (Deng *et al.* 2018; Aydın *et al.* 2019; Çınar 2020; Aydın *et al.* 2021b; Maali *et al.* 2021).

Taraghi *et al.* (2021) yaptıkları nümerik çalışmada ince cidarlı silindirlerin burkulma kapasitesini arttırmak için CFRP güçlendirmesi yapmışlardır. CFRP kompozitlerin güçlendirmede iyi olması sebebiyle bu malzemeyi seçmişlerdir. Çalışma kapsamında burkulma davranışına farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. Çalışmada narinlikleri farklı olan silindirler incelenmiştir. Ayrıca silindirlere CFRP uygulaması yatay ve dikey olacak şekilde kısmi olarak yapılmıştır. Her iki durumda da silindirin burkulma kapasitesi artmıştır. CFRP'nin yatay şekilde silindir çevresine sarılmasının dikey olarak uygulanmasından daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca kullanılan CFRP kalınlığının ve narinlik oranının burkulma kapasitesini önemli derecede etkilediği ifade edilmiştir.

FRP kompozitlerin kullanımı son yıllarda sundukları düşük ağırlıklarına rağmen yüksek mukavemet gibi avantajlar sebebiyle oldukça artmıştır. Düzensiz yüzeylere uygulanabilme kolaylıkları ve farklı doğrultulardaki malzeme özelliklerinin uygulamaya göre uyarlanabilmesi FRP kompozitlerin tüpler ya da ince cidarlı elemanlarda kullanılarak elemanlarda oluşacak yerel burkulmaları önleyici davranış göstermesini sağlamaktadır (Teng *et al.* 2012).

Maali *et al.* (2019) ince cidarlı çelik silindirik kabukların burkulma davranışına dent ve CFRP etkisini incelemişlerdir. 14 numune CFRP'li ve CFRP'siz olarak iki gruba ayrılmıştır. Dikey, yatay ve 45°'lik açı ile dentler yerleştirilerek dış basınç altında burkulma davranışları incelenmiştir. Dent derinliği 2tc ve 4tc olarak seçilmiştir. Bu çalışmada yüksekliği 500 mm, kalınlığı 1 mm ve yarıçapı 500 mm olan silindirler kullanılmıştır. Silindirlerin burkulma kapasitesinin CFRP güçlendirmesi ile arttığı gözlemlenmiştir. Buna rağmen silindirlerin tüm yüzeyinin CFRP ile kaplanmasının ekonomik olmayacağı belirtilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler teorik formüllerle kıyaslanarak formüllerin yetersizliği ortaya koyulmuştur.

Teng ve Hu (2007) çalışmalarında çelik boruların FRP kaplama ile güçlendirilmesini incelemişlerdir. Dört adet numunenin incelendiği bu çalışmada çelik borular üç kata kadar FRP ile kaplanarak aksenal basınç altında test edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu FRP güçlendirmesinin kalınlığının artırılmasının, çelik boruların sünekliğini önemli derecede arttırdığı ifade edilmiştir. Fakat kalınlıktaki bu artışın boruların içten burkulmaya başladığında etkisini kaybetmesinden dolayı burkulma kapasitelerinde limitli bir artış olmaktadır. Bu

davranış dolayısıyla depreme karşı yapılacak güçlendirmede FRP kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Numunelere ait fotoğraflar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Çalışmada kullanılan numuneler (Teng ve Hu 2007)

Ghazijahani *et al.* (2015) ince cidarlı çelik silindirlerin kereste ile doldurulup CFRP ile güçlendirilmesinin silindirlerin yük taşıma kapasitesine etkisini araştırmışlardır. Eksenel basınç etkisi altında çeşitli güçlendirmelerle test edilen numunelerde en yüksek dayanım kereste ile doldurulup üç kat CFRP kumaş ile güçlendirilen numunede görülmüştür. CFRP silindiri dıştan burkulmaya karşı güçlendirmiştir fakat içeri doğru burkulmaya karşı aynı oranda bir güçlendirme yapamadığından silindirlerde içeri doğru burkulma davranışı baskın olmuştur. CFRP silindiri fil ayağı burkulması için güçlendirmiştir.

Literatürdeki bilgiler ışığında bu çalışmada korozyonun, ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasitesine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Korozyon için kullanılan hidroklorik asit (HCl) literatürdeki genel kullanım oranı dikkate alınarak çözeltide %5 ve %10 oranında kullanılmıştır. Silindirlere sırasıyla korozyon ve burkulma deneyleri yapılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

İnce cidarlı çelik tankların hidroklorik asit korozyonu etkisinde burkulma davranışlarının incelendiği çalışmanın bu bölümünde deneylerde kullanılan malzemeler, modellerin hazırlanışı, deney elemanları, deney düzeneği ve deneylerin yapılışı anlatılacaktır.

Materyal

Hidroklorik asit

Bu çalışmada silindirleri korozyona uğratmak için saflığı %30-32, yoğunluğu 1,15-1,16 g/cm³ olan, TS-EN ISO 9001:2008 standardına uygun olarak üretilen hidroklorik asit kullanıldı. Hidroklorik asitin genel kullanımı literatürde %5 ve %10 oranında olduğu için bu çalışmada da çözeltilerdeki HCl asit oranı %5 ve %10 olarak seçildi. Çalışmada kullanılan hidroklorik asitin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Hidroklorik Asitin Özellikleri

Spesifikasyon	Yaklaşık Değerler
Safiyet	%30,0-32,0
Yoğunluk	1,15-1,16 g/cm ³
Demir (Fe)	≤ %0,0005
Arsenik (As)	≤ %0,0001
Ağır Metaller (Pb gibi)	≤ %0,0001
Görünüm	Berrak

Foamboard levhalar

Asit çözeltisinin silindir içerisinde 24 saat boyunca kalması ve herhangi bir sızdırma olmaması amacıyla genelde ısı yalıtımı için kullanılan foamboard levhalar kullanıldı. Foamboard levhalar sızdırmazlık sağladıkları ve HCl asitten etkilenmedikleri için tercih edildi. Silindirler foamboard levhaların içerisine geçirildi ve sızdırmazlığı sağlamak için silindirin foamboard ile temas ettiği bölgeye içten ve dıştan silikon çekildi. Kullanılan foamboard levhalar Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Sızdırmazlık için kullanılan foamboard levha

CFRP kumaşlar

Numunelerde korozyon sonrası oluşan dayanım kaybını tolere etmek ve silindirlerin burkulma kapasitesini arttırmak amacıyla MasterBrace FIB 230/50 CFS tek yönlü, yüksek dayanımlı, karbon lifli polimer kumaşlardan (CFRP) yararlanıldı. Hafif olmalarının yanında yüksek mekanik dayanım sundukları için CFRP kumaşlar tercih edildi. Hafif ve kolay taşınabilir olmaları, iki yönde de istenilen boyutta kolayca kesilebilmeleri, eğilme ve kesmeye karşı dayanıklı olmaları, yorulma dayanımlarının yüksek ve sünme dayanımlarının düşük olması CFRP kumaşların sundukları avantajlar arasında gösterilebilir. 100-400-800 mm yüksekliğinde CFRP kumaşlar silindirlere sarılarak silindirlerin burkulma kapasiteleri arttırıldı. Bu çalışmada kullanılan CFRP kumaşın özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan CFRP kumaş Şekil 9’da görülmektedir.

Tablo 2. Kullanılan CFRP Kumaşın Özellikleri

Özellik	Değer
Malzemenin Yapısı	Karbon
Elastisite Modülü	230 000 N/mm ²
Çekme Dayanımı	4900 N/mm ²
Tasarım Kesit Kalınlığı	0,111 mm
Toplam Lif Ağırlığı	230 g/m ²
Kopmada Uzama	%2,1
Genişlik	500 mm



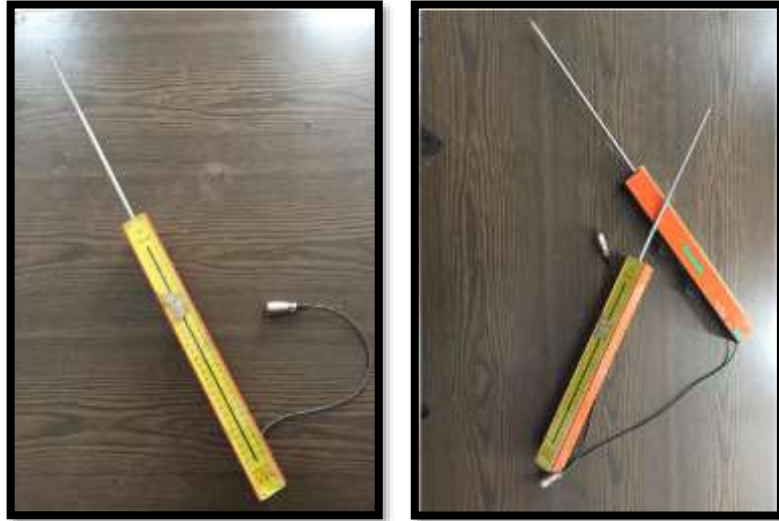
Şekil 9. Çalışmada kullanılan CFRP kumaş

Epoksi yapıştırıcı ve epoksili astar

CFRP kumaşın silindir yüzeyine yapıştırılması için MasterBrace P 3500 FRP için geliştirilmiş epoksi esaslı astar ve MasterBrace 4500 FIB (Lifli Polimer) sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcı kullanıldı. Hem astar hem de yapıştırıcı iki bileşen içermektedir. Bu bileşenler önerilen oranlarda karıştırılarak oluşturulan karışım silindir yüzeyine sürüldü.

LVDT deformasyon ölçme aleti

LVDT'ler (Linear Variable Differential Transformer) deformasyon ölçümünde kullanılan aletlerdir. Bu çalışmada SPD-300D model 300 mm'ye kadar deplasman ölçebilen dört adet LVDT kullanıldı. LVDT 'ler ile ölçülen deformasyon değerleri bilgisayara aktarılarak deplasman değerleri elde edildi. Şekil 10'da kullanılan LVDT'ler görülmektedir.



Şekil 10. LVDT deformasyon ölçüm aletleri

Strain gauge (gerinim pulu)

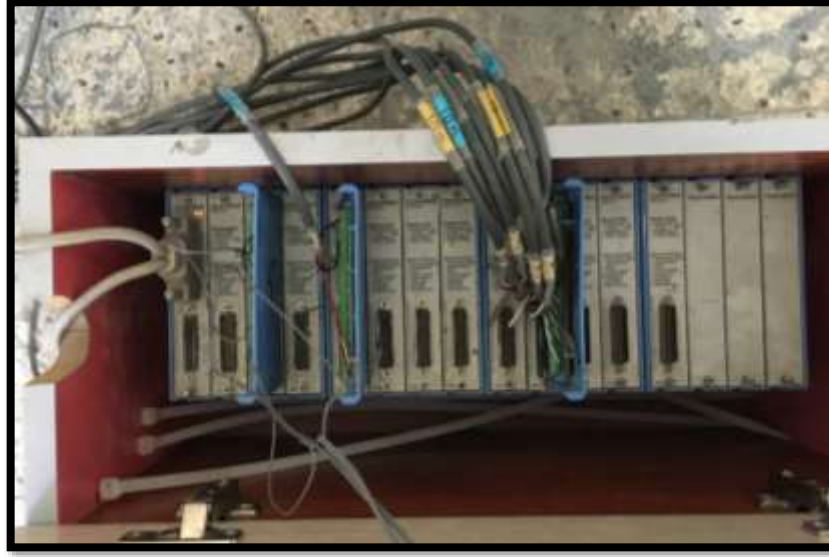
Gerinim pulları (Strain Gauge) şekil değişimini ölçen oldukça hassas cihazlardır. Gerinim pulları kullanılırken yapıştırılacağı yüzeyin iyice temizlenmesi ve yüzeye iyice sabitlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada her bir deney numunesinin yatay ve dikey şekil değişimini ölçmek amacıyla iki adet TML YEFLA-5 (5 mm x 3 mm boyutlarında, direnç değeri $121 \Omega \pm \%0,5$, duyarlılık katsayısı $2,1 \pm \%2$) model gerinim pulu sistemdeki şekil değişimlerini belirlemek için kullanıldı. Dirençlerle veri toplama sistemine bağlanan gerinim pulları yardımıyla yatay ve dikey gerinimler bilgisayar ortamına aktarıldı. Şekil 11’de çalışmada kullanılan gerinim pulları görülmektedir.



Şekil 11. Gerinim pulları

Veri toplama sistemi (Data logger)

Deney süresince LVDT, gerinim pulu (Strain gauge) ve hava pompasına ait verilerin toplanması için Insturinet I420 model 120 kanallı 13 portlu veri toplama cihazı kullanıldı. LVDT’ler, gerinim pulları ve hava pompası dirençler yardımıyla veri toplama cihazına bağlandı ve kablo yardımıyla veriler bilgisayara aktarıldı. Veriler bilgisayar üzerinde DasyLab programı ile okunduktan sonra MS Excel ortamına aktarıldı. Çalışmada kullanılan veri toplama cihazı Şekil 12’de görülmektedir.



Şekil 12. Veri toplama cihazı (Data logger)

Yöntem

Tezin bu bölümünde deneyde kullanılan silindirlerin hazırlanışı, korozyon ve burkulma deneylerinin yapılışı anlatılacaktır. Burkulma deneyi için kullanılan sistem tanıtılacaktır. Ayrıca silindirlere ait burkulma yüklerinin ve oluşabilecek yaklaşık dalga sayılarının hesaplanmasında kullanılan teorik formüller gösterilecektir.

Silindirlerin hazırlanışı

Çalışmada kullanılacak silindirlerin seçiminde boyut faktörü oldukça önemlidir. Boyut seçimi yapılırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli 3 faktörden ilki silindirlerin çok büyük olmaması gerektiğidir. Çalışılacak laboratuvar ortamına uygunluk ve kolaylık sağlaması açısından silindirlerin çok büyük olmaması gerekir. Bunun yanında silindirlerin çok küçük olması da istenen bir durum değildir. Küçük malzemelerin üretimi esnasında meydana gelebilecek problemler dolayısıyla silindirlerin yeterli büyüklükte olması gerekir. Son olarak silindirlerin yarıçap/kalınlık (r/t) oranları da günümüzde uygulamada kullanılan yapılara uygun olarak seçilmelidir. Uygulamada kullanılan silindirlerin genel r/t oranı 300-1000 arasındadır (Golzan and Showkati 2008). Bu tez çalışmada kullanılan silindirlerin boyut seçiminde yukarıda belirtilen faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan silindirlerin yarıçap/kalınlık oranı 444'tür. Uygulamada kullanılan aralıktadır ve laboratuvar şartlarına uygundur.

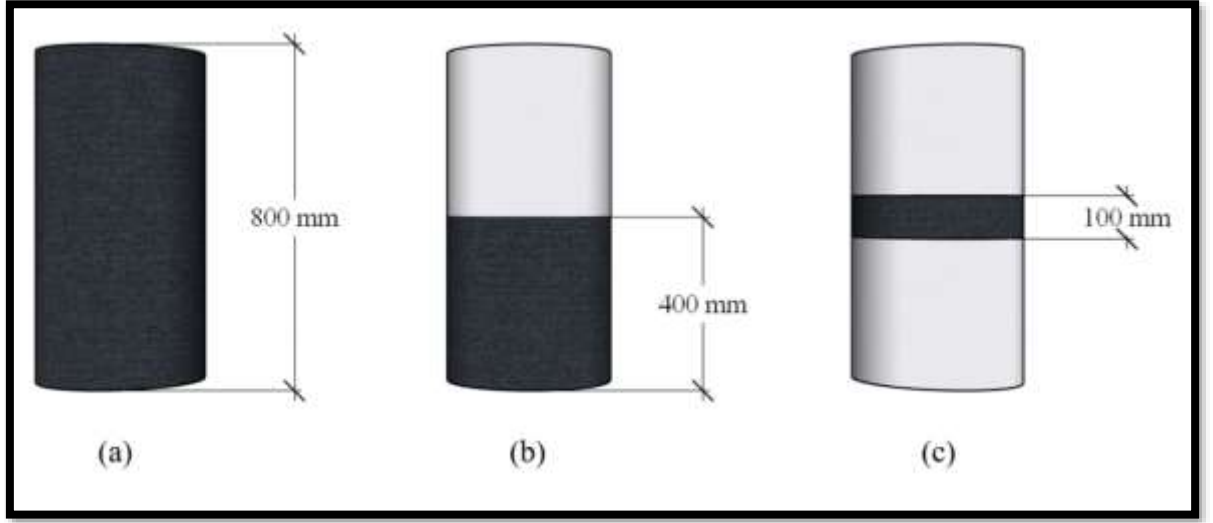
Silindir yapmak için kullanılan galvanizli 0,45 mm kalınlığında çelik levhalar 1260x800 mm boyutlarında dikdörtgen şekilde kesildi. Ardından silindirik makara kullanılarak silindir haline getirildi (Maali *et al.* 2015; Aydın *et al.* 2015). Birleşim bölgeleri lehimleme yapılarak

birbirine tutturuldu. Lehimleme birleşim için kullanılan birkaç yöntemden biridir. Yapım ve deney aşamalarında avantaj sağladığı için bu çalışmada silindirler lehimle birleştirildi. Lehimle birleştirme hem ekonomiktir, hem de malzeme ince olduğu için kaynak yapılması durumunda malzemede oluşacak kusurların oluşmamasını sağlar (Golzan and Showkati 2008). Çalışmada kullanılan silindir ve birleşim bölgesi Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. Çalışmada kullanılan silindir ve birleşim bölgesi

Bu çalışmada 800x400x0,45 mm boyutlarında 12 adet ince cidarlı çelik silindir kullanıldı. 10 adet silindir korozyonlu, iki adet silindir ise korozyonsuz şekilde test edildi. Korozyonlu olarak test edilen 10 numuneden dördü tamamen, altısı ise silindir yüksekliğinin yarısına kadar değişken oranda (%5 ve %10) HCl asit çözeltisiyle dolduruldu. Korozyon sonrasında silindirler değişken boyutlarda (100 mm-400 mm-800 mm) CFRP kumaş ile kaplandı. Farklı boyutlarda CFRP kumaş ile kaplanan silindir örnekleri Şekil 14'te verilmiştir. Korozyonsuz olarak test edilen iki model karşılaştırma amacıyla kullanıldı. Bu çalışmada silindirlerin özelliklerini belirten kısaltmalara ait detaylar şu şekildedir. S1-F-A10-CY: Silindir 1 (Silindir numarası); F: Doluluk oranı (F: Tam dolu ve Y: Yarı dolu); A10: %10 asit çözeltisi (%5 için 5, %10 için 10); CY: CFRP kaplaması (CY: kaplama yok, C400: Silindir yüksekliğinin yarısına kadar, CF: Silindir yüksekliği boyunca, C100: Silindir yüksekliğinin ortasında 100 mm CFRP ile kaplı). Silindirlere ait detaylar Tablo 3'te verilmiştir.



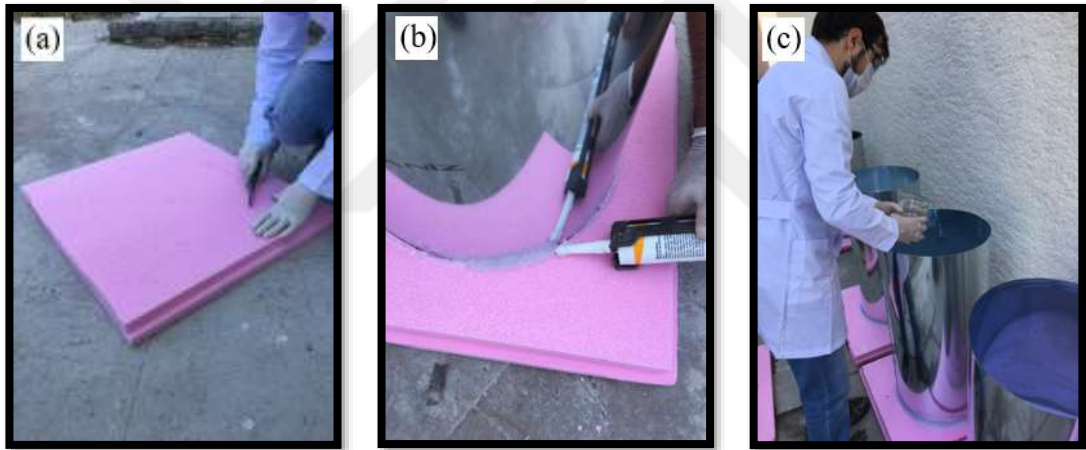
Şekil 14. Farklı boyutlarda CFRP kumaş ile kaplanmış numuneler (a) silindir yüksekliği boyunca (b) silindir yüksekliğinin yarısına kadar (c) silindir yüksekliğinin ortasında 100 mm CFRP kumaş ile kaplı silindir.

Tablo 3. Silindirlere Ait Detaylar

Gruplar	Silindirler	Doluluk	Çözeltideki HCl asit yüzdesi (%)	CFRP Kumaş Yüksekliği (mm)
Korozyonsuz	Korozyonsuz CFRP'siz	-	-	-
	Korozyonsuz CFRP'li	-	-	800
	S1-F-A10-CY	Tam Dolu	%10	-
Korozyonlu	S2-F-A10-CF	Tam Dolu	%10	800
	S3-F-A5-CY	Tam Dolu	%5	-
	S4-F-A5-CF	Tam Dolu	%5	800
	S5-Y-A10-C400	Yarı Dolu	%10	400
	S6-Y-A10-CF	Yarı Dolu	%10	800
	S7-Y-A10-C100	Yarı Dolu	%10	100
	S8-Y-A5-C100	Yarı Dolu	%5	100
	S9-Y-A5-C400	Yarı Dolu	%5	400
	S10-Y-A5-CF	Yarı Dolu	%5	800

Korozyon deneyi

Bu çalışmada silindirlerde korozyon oluşturma amacıyla TS-EN ISO 9001:2008 standardına uygun Hidroklorik Asit (HCl) kullanıldı. Dört adet silindir tamamen, altı adet silindir ise yarıya kadar HCl asit çözeltisi ile doldurularak test edildi. Silindirlerin ilk olarak korozyon öncesi ağırlıkları tartılarak not edildi. Doldurulacak çözeltinin kayıpsız bir şekilde 24 saat boyunca silindir içerisinde kalmasını sağlamak amacıyla silindirler foamboard levhalara geçirildi. Levhaların içerisine tam olarak oturtulduktan sonra silindirlerin levhalar ile temas bölgesi içeriden ve dışarıdan silikonlandı. Silikonun kuruması için yeterli süre beklendikten sonra silindir içerisine bir miktar su dolduruldu ve sızdırmazlığı kontrol edildi. Sızdırmazlığından emin olunan silindirlerin içerisine belirlenen oranlarda HCl asit ve su yavaş ve dikkatli bir şekilde dolduruldu. Korozyon deneylerinin tamamlanması için 24 saat beklendi. Deney tamamlandıktan sonra çözelti dikkatli ve güvenli bir şekilde boşaltıldı. Korozyon sonrası silindirlerin ağırlıkları tekrar tartıldı ve korozyonun sebep olduğu ağırlık kaybı belirlendi. Korozyon deneyinin aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Korozyon deneyi aşamaları (a) silindirin yerleştirileceği bölgenin belirlenmesi (b) yerleştirilen silindirin temas bölgesine silikon çekilmesi (c) silindire çözelti doldurulması.

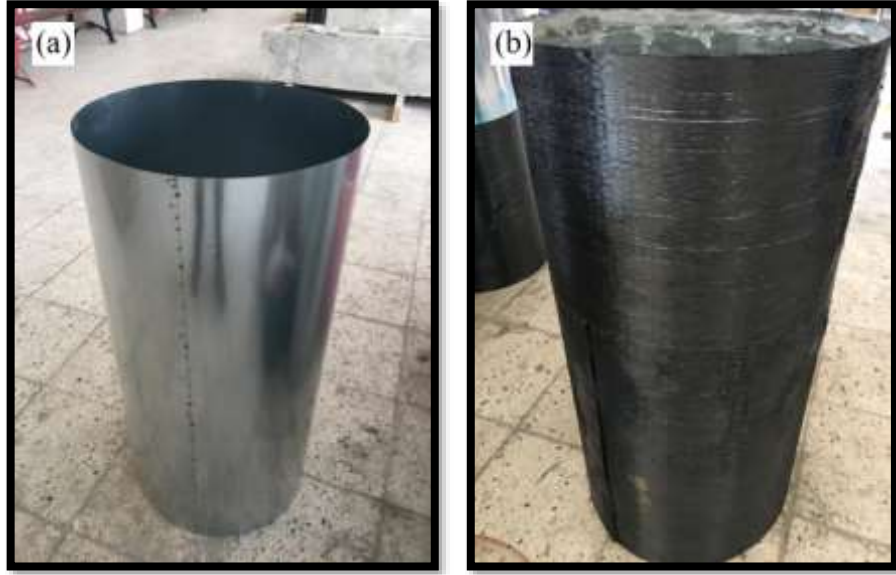
Burkulma deneyi

Silindirlerin korozyon deneyleri tamamlandıktan sonra burkulma deneylerine hazırlık aşamasına geçildi. İlk olarak CFRP kumaş yapıştırılarak test edilecek silindirler hazırlandı. Bu çalışmada üç silindir CFRP'siz, beş silindir tam CFRP kumaş kaplaması ile, iki silindir yarıya kadar CFRP kumaş kaplaması ile ve iki silindir de silindirin tam orta yüksekliğinde 100 mm CFRP kumaş ile kaplanarak test edildi. İlk olarak CFRP kumaş ile kaplanacak silindirlerin yüzeyine sürülecek olan astarın iki bileşeni belirlenen oranda (1:2,22) karıştırıldı. Ardından astar rulo yardımıyla silindirin yüzeyine sürüldü. Astarın kuruması için 24 saat beklendi. Ardından epoksi yapıştırıcının iki bileşeni belirlenen oranda karıştırılarak (1:2,94) rulo ile

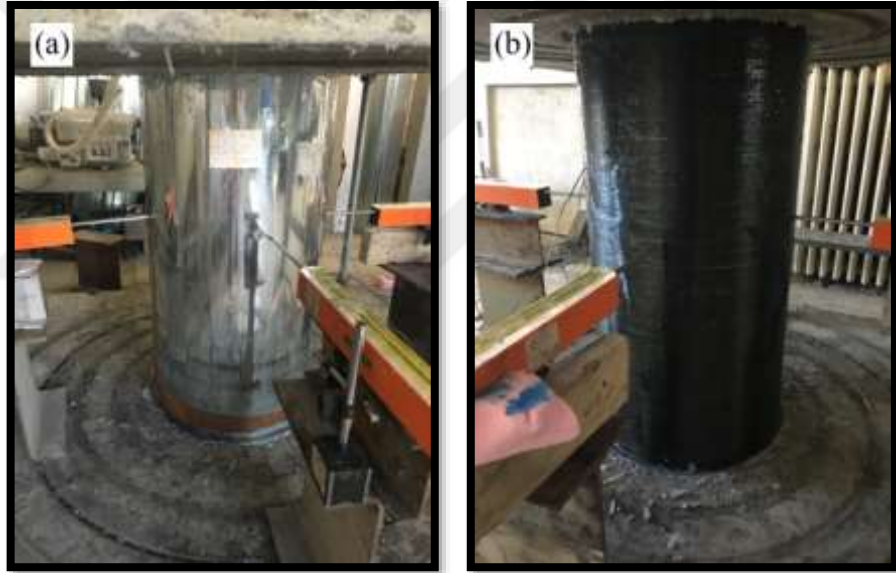
silindir yüzeyine sürüldü. Belirlenen boyutlarda CFRP kumaş kesilip silindir yüzeyine dikkatli bir şekilde yerleştirildi. CFRP kumaşın üzerine de yapıştırıcı sürülüp yapıştırıcının kuruması için yeterince beklendikten sonra silindirler burkulma deneylerine hazır hale geldi. Silindirlerin CFRP ile kaplanması aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 16’da verilmiştir. Numunelerin deney öncesi son halleri Şekil 17-18-19-20-21’de verilmiştir.



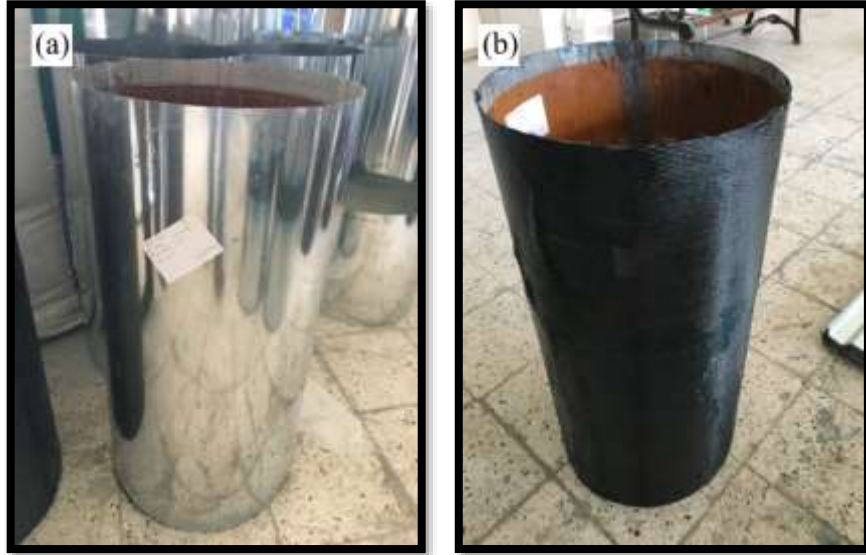
Şekil 16. CFRP uygulama aşamaları (a) silindir yüzeyine yapıştırıcı sürülmesi (b) uygun boyutta CFRP kumaş kesilmesi (c) silindir yüzeyine CFRP kumaş yapıştırılması (d) CFRP kumaş üzerine yapıştırıcı sürülmesi.



Şekil 17. Korozyonsuz silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) korozyonsuz CFRP'siz silindir (b) korozyonsuz tam CFRP'li silindir.



Şekil 18. %10 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S1-F-A10-CY (b) S2-F-A10-CF.



Şekil 19. %5 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S3-F-A5-CY (b) S4-F-A5-CF.

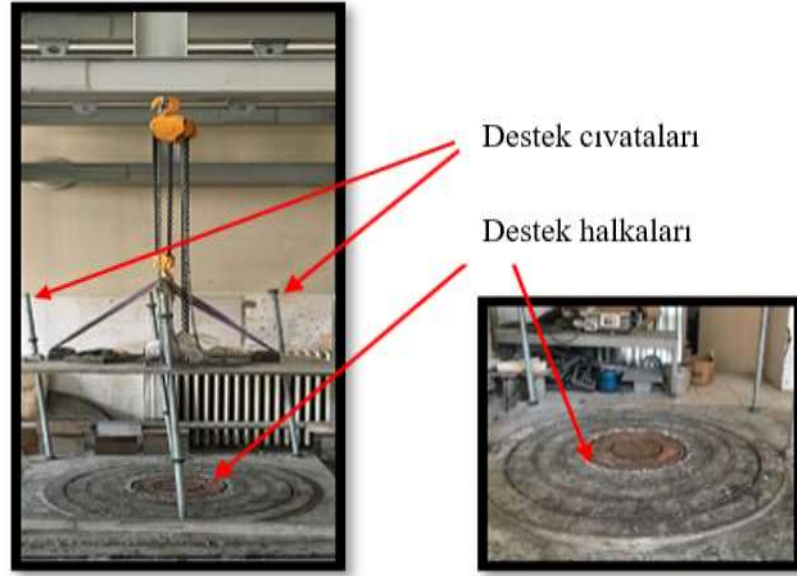


Şekil 20. %10 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S5-Y-A10-C400 (b) S6-Y-A10-CF (c) S7-Y-A10-C100.



Şekil 21. %5 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S8-Y-A5-C100 (b) S9-Y-A5-C400 (c) S10-Y-A5-CF

Silindirlerde burkulmanın gerçekleşmesi için kullanılan deney sistemi 1500x1500 mm boyutlarında ve 30 mm kalınlığında iki çelik levhadan oluşmaktadır. Üstteki levhanın ortasında iki adet delik bulunmaktadır. Bu deliklerden iki hava pompası ve deney sistemini birbirine bağlayan hava hortumu için, diğeri ise yük hücresi için açılmıştır. Ayrıca levhaların her birine ekstra altı delik açılarak destek cıvataları yerleştirilmiştir. Bu cıvatalar sayesinde üst plakanın hareketi sınırlandırılmıştır. Silindirlerin deney düzeneğine tam olarak yerleşmesi ve hareket etmemesi amacı ile çeşitli boyutlarda dairesel destekler levhalara kaynaklanmıştır. Deney düzeneği Şekil 22’de gösterilmiştir.

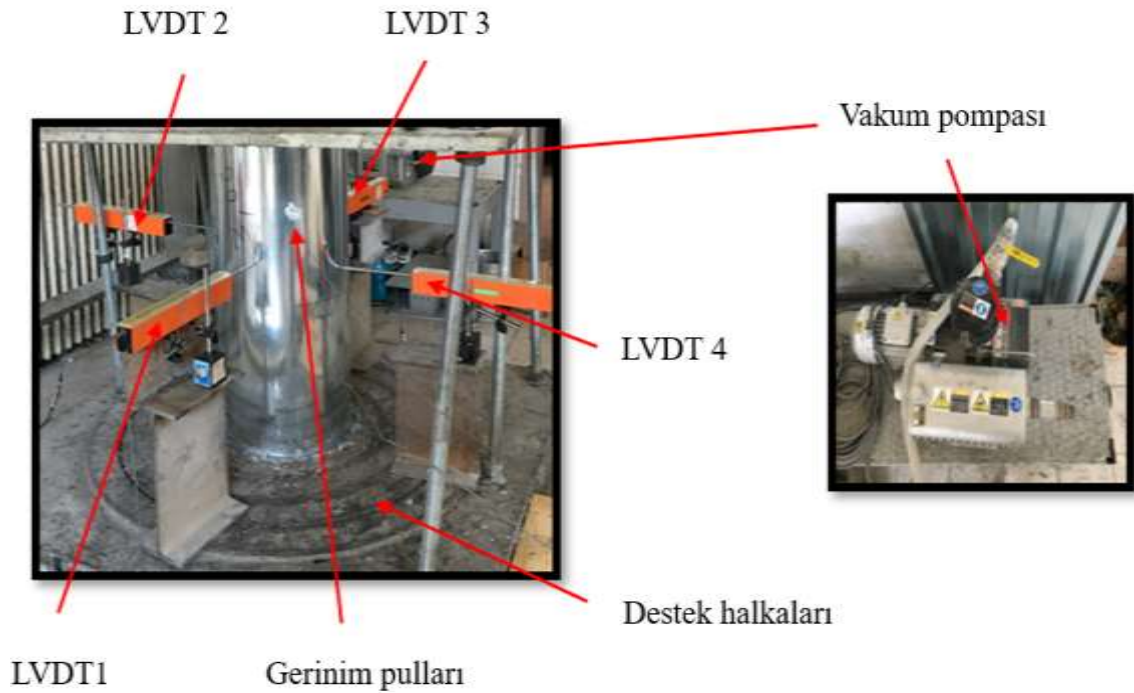


Şekil 22. Deney sistemi

Burkulma deneyleri için ilk olarak deneyin yapılacağı alet iyice temizlendi. Üst levha vinç yardımıyla kaldırıldı. Silindirler alttaki dairesel desteğe yerleştirilip üst levha yavaşça indirildi. Dairesel desteklere tam olarak oturtulduktan sonra silindirlerin levhalar ile temas bölgeleri hava sızmasını engellemek amacıyla dışarıdan silikonlandı. Silikonun kurumması için yeterli süre beklendi. Destek cıvatalarındaki somunlar sıkılarak deney sistemi sabitlendi. Deplasmanları ölçmek amacıyla dört adet LVDT silindir etrafına yerleştirildi. LVDT'lerin aynı yüksekliğe kurulmasına dikkat edildi. Silindir yüzeyi iyice temizlendikten sonra, şekil değişimlerini ölçmek amacıyla iki adet gerinim pulu dikey ve yatay şekilde yapıştırıldı. Deney sistemindeki düzenlemeler önceki çalışmalar incelenerek yapıldı (Teng *et al.* 2001). Yerleştirilen LVDT ve gerinim pullarının bulundukları konumlara ait bilgiler Tablo 4'te verilmiştir. Deney sistemine yerleştirilmiş bir numuneye ait fotoğraflar Şekil 23'te verilmiştir.

Tablo 4. Cihazların Yerleştirildiği Konumlara Ait Bilgiler

Gruplar	Silindirler	Cihazın Yerden Yüksekliği	
		LVDT (mm)	Gerinim Pulları (mm)
Korozyonsuz	Korozyonsuz CFRP'siz	480	600
	Korozyonsuz CFRP'li	460	580
Korozyonlu	S1-F-A10-CY	500	620
	S2-F-A10-CF	500	570
	S3-F-A5-CY	470	580
	S4-F-A5-CF	480	590
	S5-Y-A10-C400	470	610
	S6-Y-A10-CF	460	550
	S7-Y-A10-C100	480	550
	S8-Y-A5-C100	460	570
	S9-Y-A5-C400	500	580
	S10-Y-A5-CF	470	540

**Şekil 23.** Deney sistemine yerleştirilmiş örnek bir numune ve cihazların yerleşimi

LVDT'ler ve gerinim pulları yerleştirildikten sonra bu cihazlar dirençler yardımıyla veri toplama cihazına bağlandı. Bilgisayar üzerinden DasyLab programı açılarak deney öncesi değerler kontrol edildi. Deney süresince silindirlerin davranışının gözlemlenmesi amacıyla video kaydı alındı. Değerlerin doğruluğu teyit edildikten sonra hava pompasının vanası yavaşça

açıldı. Silindirlerin içerisindeki havanın vakumlanmasıyla burkulmalar oluştu. Deneyler burkulmalar tamamlanıncaya kadar ve hava sızıntısı oluncaya kadar devam ettirildi. İlk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri LVDT'ler, gerinim pulları ve video görüntüleri yardımıyla belirlendi.

Teorik burkulma değerleri ve dalga sayısı

Silindirlere ait teorik burkulma yükleri Jawad (1994), Ventsel ve Krauthammer (2001), Ross'un (2007) belirttiği formüller yardımıyla hesaplandı. Bu üç formülde de P_{cr} silindirlere ait kritik burkulma yükünü belirtmektedir.

Jawad Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = \frac{0,92E \left(\frac{te}{R} \right)^{2,5}}{\frac{Le}{R}} \quad (1)$$

Ventsel ve Krauthammer' Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = 0,92 \frac{Et}{L} \left(\frac{t}{rm} \right)^{1,5} \quad (2)$$

Ross' Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = \frac{2,6E \left(\frac{t}{d} \right)^{2,5}}{\frac{H}{d} - 0,45 \left(\frac{t}{d} \right)^{0,5}} \quad (3)$$

Bu teorilerde;

E: Elastisite modülü (Young modülü) = 210 GPa,

t: Efektif kalınlık= 0,45 mm,

d: Silindir çapı= 400 mm,

r= r_m : Silindir yarıçapı= 200 mm,

H= L_e : Silindir yüksekliği =800 mm

Silindirlerde yük etkisi altında oluşacak dalga sayısının yaklaşık değeri aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır (Fatemi *et al.* 2013; Teng *et al.* 2001)

$$n = 2,74 \sqrt{\frac{R}{L} \sqrt{\frac{R}{t}}} \quad (4)$$

Bu formülde n oluşacak yaklaşık dalga sayısını, R silindir yarıçapını, t silindir kalınlığını, L ise silindir yüksekliğini belirtmektedir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler verilecektir. Ayrıca teorik formüller yardımıyla hesaplanan burkulma yükleri ve oluşabilecek tahmini dalga sayısı da bu bölümde verilecektir.

Korozyon Deneyi Sonuçları

Korozyon metal yüzeyinde incelemeye yol açan ve bunun sonucunda malzeme ağırlığının düşmesine sebep olan bir olaydır. Bu çalışmada kullanılan hidroklorik asit oldukça saldırgan bir asit olduğu için malzemenin kalınlığında incelemeye sebep olacağı ön görülmüştür. Bu sebeple silindirlerin korozyon deneyi öncesinde ve çözelti boşaltıldıktan sonraki ağırlıkları tartılarak not edilmiştir. Silindirlerin deney öncesi ve sonrası ağırlıkları Tablo 5'te verilmiştir.

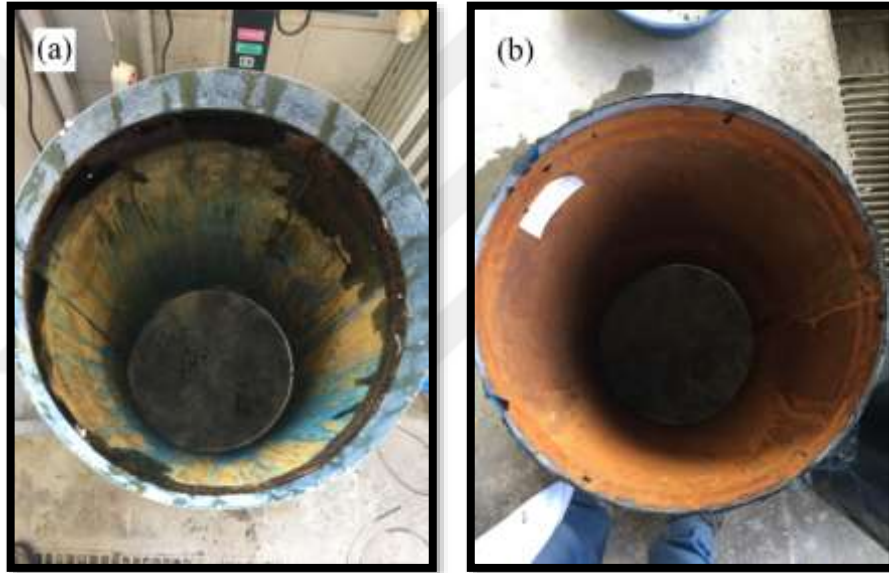
Tablo 5. Silindirlerin Korozyon Deneyi Öncesi ve Sonrası Ağırlıkları

Gruplar	Numuneler	Korozyon öncesi ağırlık (g)	Korozyon sonrası ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (%)
Korozyonsuz	Korozyonsuz	-	-	-
	CFRP'siz	-	-	-
	Korozyonsuz CFRP'li	-	-	-
Korozyonlu	S1-F-A10-CY	3100	2980	3,871
	S2-F-A10-CF	3080	2980	3,247
	S3-F-A5-CY	3080	3000	2,597
	S4-F-A5-CF	3100	3020	2,581
	S5-Y-A10-C400	3080	3060	0,649
	S6-Y-A10-CF	3080	3060	0,649
	S7-Y-A10-C100	3080	3060	0,649
	S8-Y-A5-C100	3080	3060	0,649
	S9-Y-A5-C400	3100	3080	0,645
	S10-Y-A5-CF	3100	3080	0,645

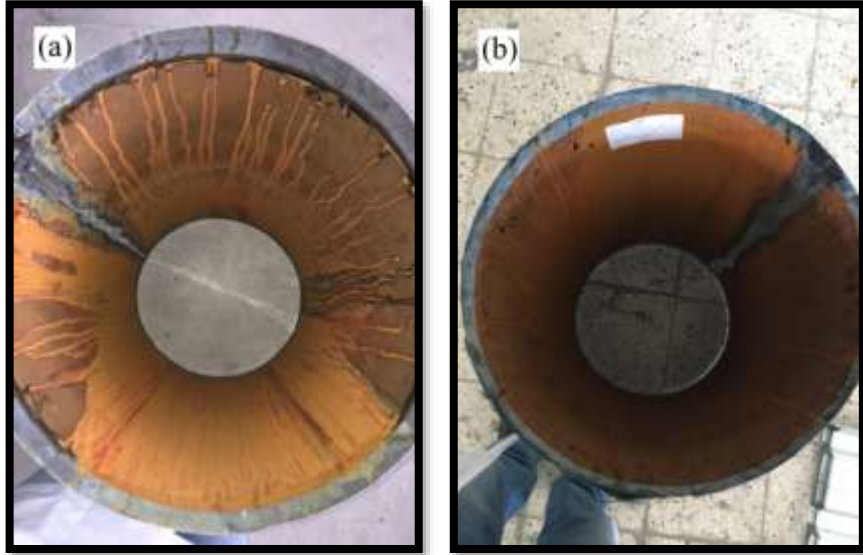
Elde edilen verilere bakıldığında silindirlerdeki ağırlık kaybının %3,871 ile %0,645 arasında değiştiği görülmektedir. Ağırlık kaybının en yüksek olduğu silindirler incelendiğinde

bu silindirlerin tam dolu silindirler olduğu görölmüştür. Silindirlerin doluluk oranının artması ağırlık kaybını arttırmıştır. Tam dolu silindirler kendi arasında incelendiğinde en yüksek ağırlık kaybı %10'luk asit çözeltisiyle doldurulan silindirlerde görölmüştür. Çözeltideki asit yüzdesinin artması beklendiğı gibi ağırlık kaybının da artmasına sebep olmuştur.

Yarı dolu silindirler incelendiğinde ise çözeltideki asit miktarı değişmesine rağmen ağırlık kaybında çok büyük bir farklılık olmadığı görölmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde ağırlık kaybına doluluğun etkisinin asit yüzdesinin etkisinden daha fazla olduğu görölmüştür. Silindirlere asit doldurulurken çözeltide köpürme oluştuğı gözlemlendi. Korozyonlu numunelerin çözelti boşaltıldıktan sonraki fotoğrafları Şekil 24-25-26-27'de verilmiştir. Korozyonlu bölgede renk değişimi oluştu. Genel olarak açık kahverengi ve açık mavi tonlarında renk değişimi oluştu.



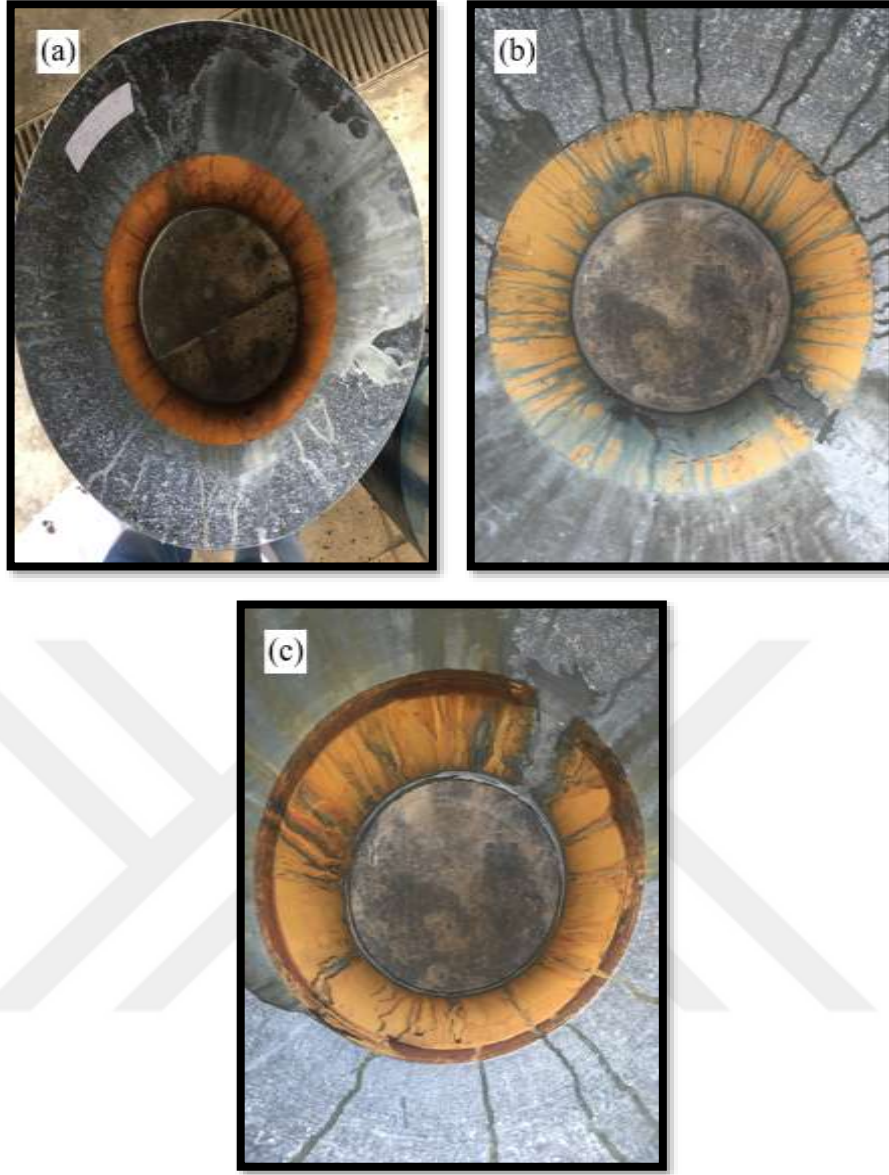
Şekil 24. %10 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S1-F-A10-CY (b) S2-F-A10-CF.



Şekil 25. %5 asit çözeltisiyle tam dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S3-F-A5-CY (b) S4-F-A5-CF.



Şekil 26. %10 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S5-Y-A10-C400 (b) S6-Y-A10-CF (c) S7-Y-A10-C100.



Şekil 27. %5 asit çözeltisiyle yarı dolu silindirlerin burkulma deneyi öncesi son durumu (a) S8-Y-A5-C100 (b) S9-Y-A5-C400 (c) S10-Y-A5-CF.

Burkulma Deneyi Sonuçları

Silindirlere ait burkulma değerleri LVDT'ler, gerinim pulları ve video görüntüleriyle belirlenmiştir. Veri toplama cihazıyla bilgisayara aktarılan verilerin düzenlenmesi sonucunda elde edilen burkulma değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirler ilk burkulmanın gerçekleşmesinden sonra da dayanım kaybetmeden bir miktar yük taşımaya devam etmişlerdir. Silindirlerin yük taşımaya devam etmesiyle yanal deplasmanlarda da artış gözlemlenmiştir. Silindirlere uygulanan aksenal basınç dolayısıyla dikey gerinimlerin, yatay gerinimlerden daha büyük olduğu görülmüştür. Çökme noktasında malzemede gerinimler elastikten plastiğe geçmiştir. Ayrıca silindirler deney boyunca ilk burkulma öncesi herhangi bir burkulma davranışı göstermediler ve ilk burkulma gerçekleştikten sonra burkulma sonrası kısma geçtiler yani direndiler.

Silindirlerde ilk burkulmadan genel burkulmaya kadar gerçekleşen burkulma kapasitesindeki artış oranı 1,38 kat ile 4,78 kat arasında değişkenlik göstermektedir. Genel burkulma kapasiteleri ilk burkulmaya kıyasla %27,46- %79,07 arasında değişmektedir. Çökme burkulma değerleri ilk burkulmaya kıyasla %-4,09 ile %57,5 arasında değişkenlik göstermektedir. İlk burkulmadan sonra gerçekleşen burkulma kapasitesindeki artışın en yüksek olduğu silindir S2-F-A10-CF'dir. En düşük olduğu silindir ise korozyonsuz CFRP'li silindiridir.

CFRP uygulaması yapılan tankların ilk burkulma kapasitesinde %66'ya kadar artış gerçekleşmiştir. Ayrıca korozyon dolayısıyla silindirlerin dayanımlarını %16 ile %64 arasında değişen oranlarda kaybettikleri görülmüştür.

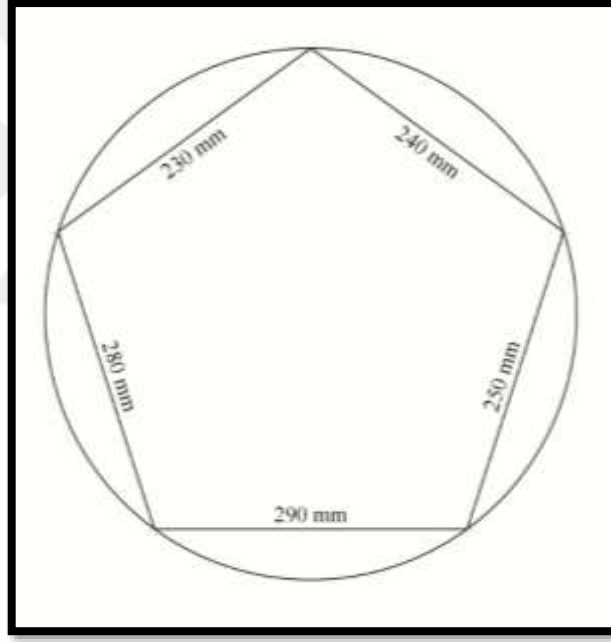
Tablo 6. Silindirlerin Burkulma Değerleri

Gruplar	Silindirler	İlk Burkulma (kPa)	Genel Burkulma (kPa)	Çökme Burkulması (kPa)
Korozyonsuz	Korozyonsuz CFRP'siz	40,85	95,63	93,05
	Korozyonsuz CFRP'li	120,19	165,68	115,46
Korozyonlu	S1-F-A10-CY	32,00	96,07	70,63
	S2-F-A10-CF	43,35	207,11	108,09
	S3-F-A5-CY	34,43	81,47	63,93
	S4-F-A5-CF	57,58	195,98	106,54
	S5-Y-A10-C400	47,77	141,86	84,05
	S6-Y-A10-CF	70,85	236,53	166,71
	S7-Y-A10-C100	43,42	104,40	87,37
	S8-Y-A5-C100	50,06	112,23	94,01
	S9-Y-A5-C400	71,52	159,56	131,24
	S10-Y-A5-CF	86,41	198,56	137,95

Korozyonsuz silindirler

Korozyonsuz CFRP'siz silindir

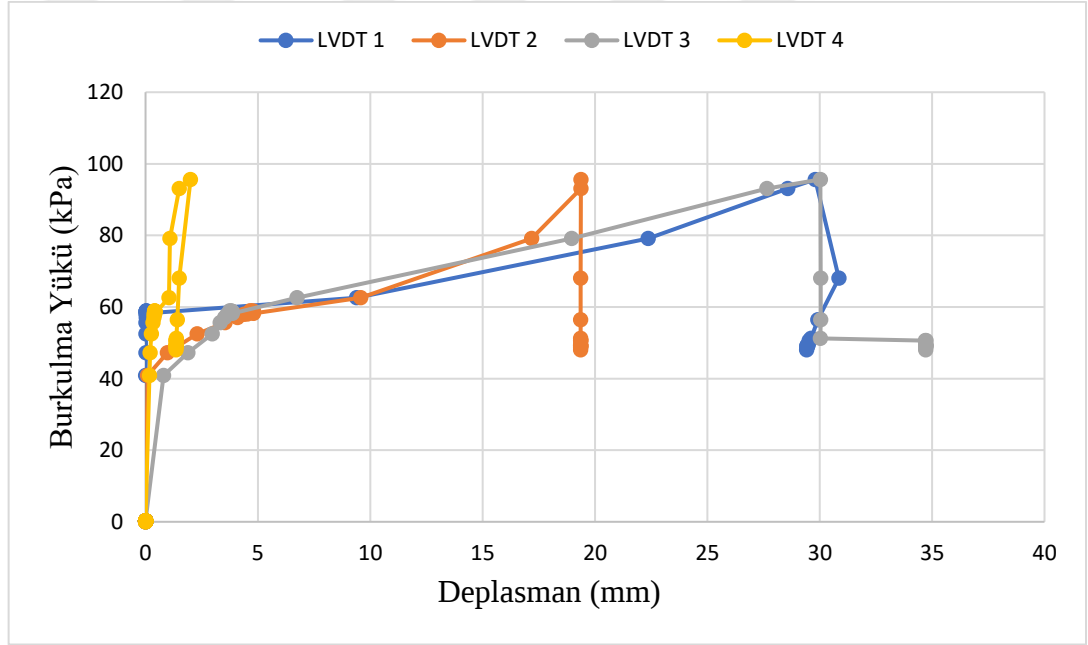
Bu silindir korozyonsuz ve CFRP kumaş yapıştırılmadan test edildi. Çalışmada kullanılan silindirlerin korozyonsuz ve CFRP'siz durumdaki burkulma kapasitesinin belirlenmesi amaçlandı. Silindir deney sistemine yerleştirilip ölçüm aletleri yerleştirildikten sonra deney başlatıldı. Burkulmalar tamamlanıncaya kadar deney sürdürüldü. Hava sızıntısının olmasıyla birlikte deney sonlandırıldı. Bu numunede toplamda beş adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 28'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 29'da verilmiştir. Korozyonsuz CFRP'siz numunenin burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değiştirme grafikleri Şekil 30 ve Şekil 31'de verilmiştir.



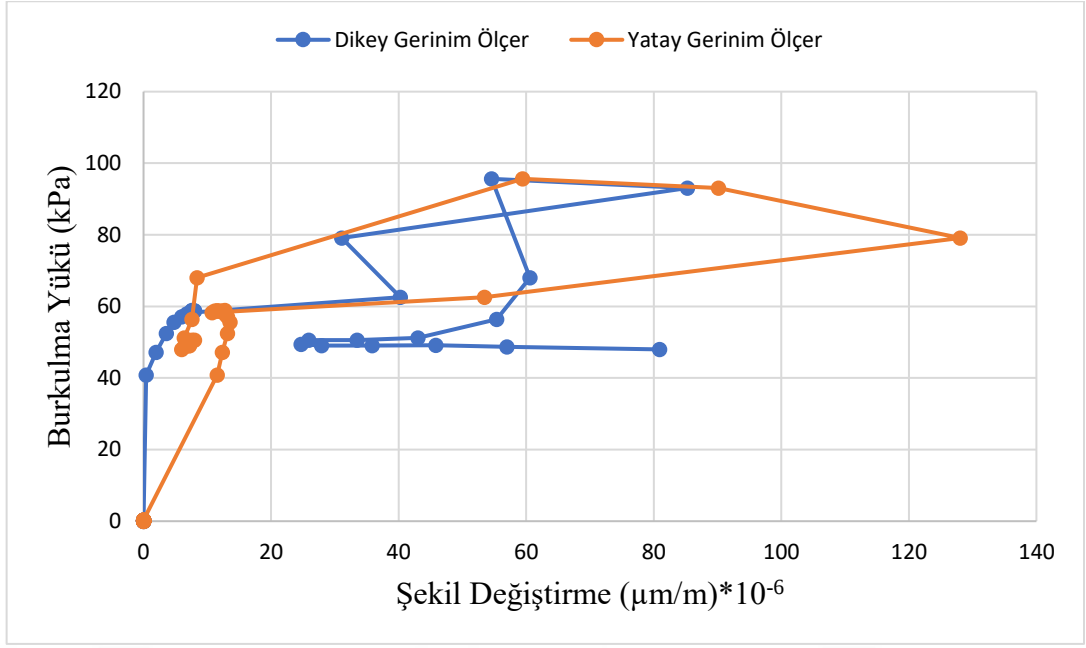
Şekil 28. Korozyonsuz CFRP'siz silindirde oluşan dalgalar



Şekil 29. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma sonrası durumu



Şekil 30. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma yükü- deplasman grafiğı



Şekil 31. Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

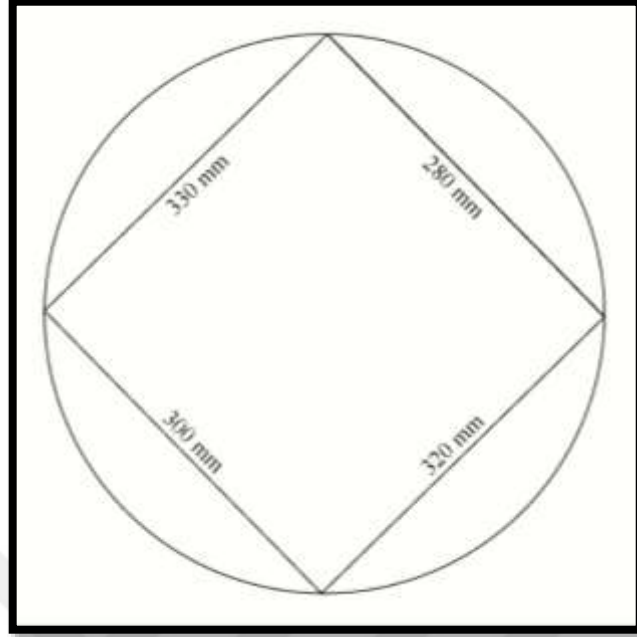
Şekil 30'da görüldüğü gibi silindirin etrafına yerleştirilen LVDT'lerden elde edilen yer değiştirme verileri birbirinden farklıdır. Bunun sebebi silindirin farklı noktalarında farklı dalgalanmalar oluşmasıdır. Ayrıca maksimum yük, yer değiştirmelerin ölçüldüğü farklı noktalarda aynı çıkmıştır. Şekil 31'deki grafik incelendiğinde yatay ve düşey olarak yerleştirilen gerinim pullarından elde edilen değerlerin göçme noktasında aynı olduğu belirlenmiştir.

Korozyonsuz CFRP'siz silindirin burkulma yükleri incelendiğinde genel burkulma yükünün, ilk burkulma yükünün 2,34 katı olduğu görülmektedir. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 2,28 katıdır. Silindirin genel burkulması, ilk burkulma yüküne göre %57,28 artmıştır. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yüküne göre %56,1 artmıştır. Bu artışlar silindirin ilk burkulmadan sonra yük taşımaya devam ettiğini göstermektedir.

Korozyonsuz CFRP'li silindir

Korozyonsuz olarak test edilen bu numunede silindirlerin CFRP kumaş ile güçlendirilmesinin silindirlerin doğal burkulma kapasitesine etkisinin belirlenmesi amaçlandı. Silindir yüzeyine silindir yüksekliği boyunca (800 mm) CFRP kumaş yapıştırıldı. Silindir sisteme yerleştirilip ölçüm aletleri de hazırlandıktan sonra deney başlatıldı. Hava sızıntısı olana kadar deney devam ettirildi. Deney bitirilip numune incelendiğinde toplamda dört adet burkulma dalgası olduğu gözlemlendi. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 32'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 33'te verilmiştir.

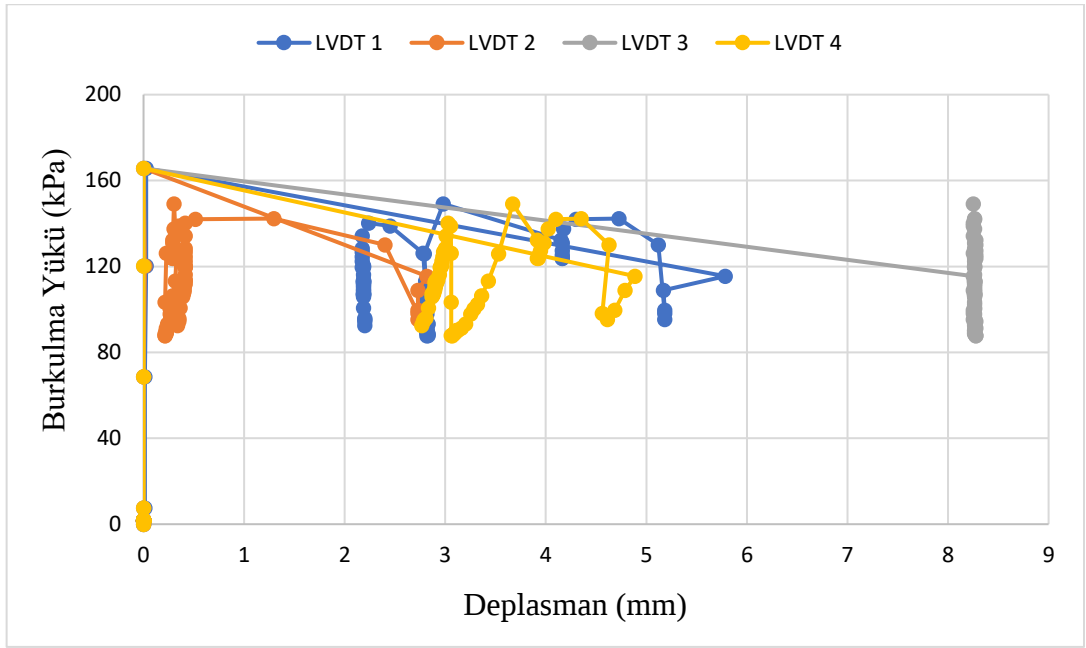
Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 34 ve Şekil 35'te verilmiştir.



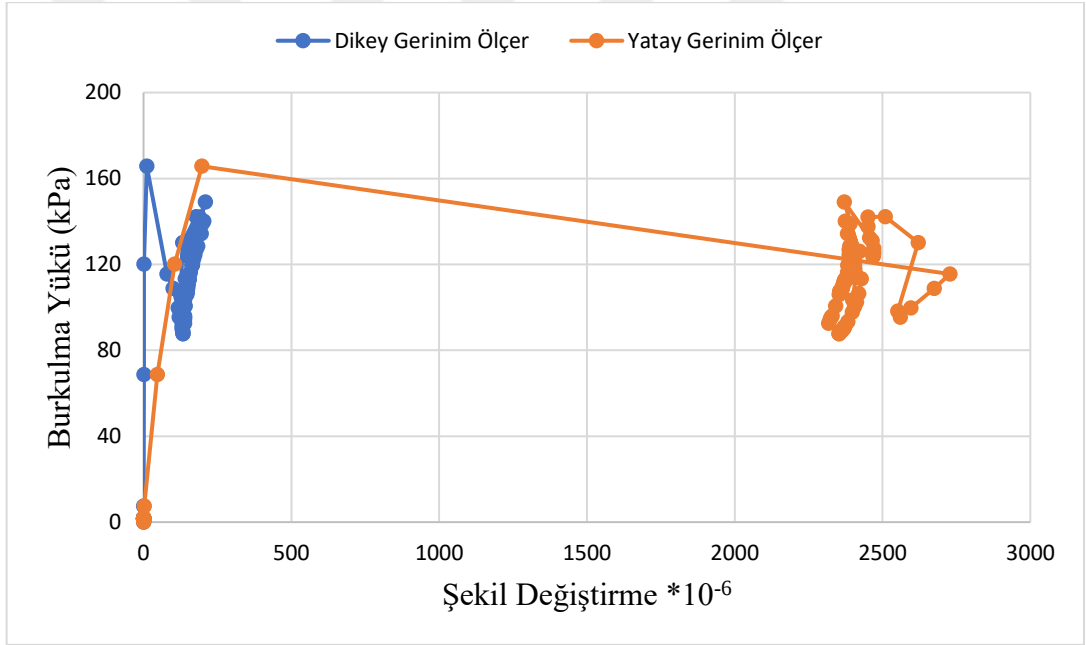
Şekil 32. Korozyonsuz CFRP'li silindirde oluşan dalgalar



Şekil 33. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma sonrası durumu



Şekil 34. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma yükü- deplasman grafiği



Şekil 35. Korozyonsuz CFRP'li silindirin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Korozyonsuz CFRP'li silindirin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,38 katıdır. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 0,96 katıdır. Genel burkulma yükü, ilk burkulma yüküne göre %27,46 artmıştır. Göçme burkulması ise ilk burkulma yüküne göre %4,1 azalmıştır.

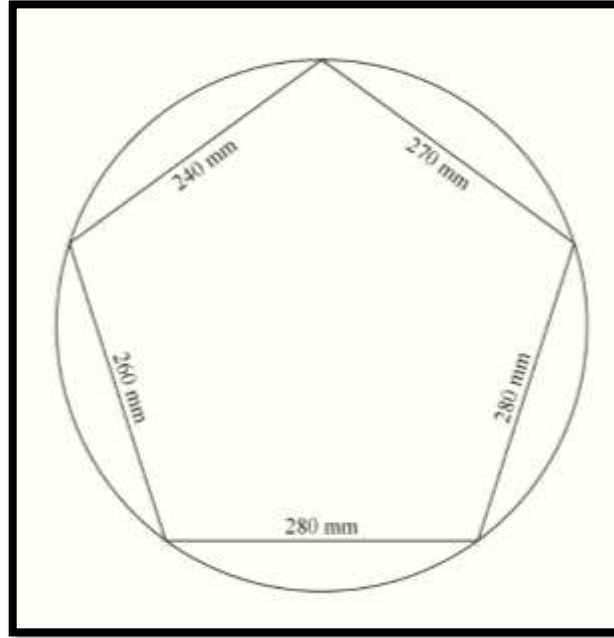
Korozyonsuz silindirlerin yük-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde yatay ve dikey şekil değiştirmelerin belli bir noktadan sonra azalmaya geçtiği görülmektedir. Korozyonsuz silindirler kendi arasında karşılaştırıldığında her iki silindirde de genel burkulma yükünün ilk burkulma yükünden daha yüksek olduğu görülmektedir. CFRP'li silindirin ilk burkulma, genel

burkulma ve çökme burkulması kapasitesi, CFRP'siz silindire göre sırasıyla %66-%42-%19 daha yüksektir. Burkulma yükleri incelendiğinde CFRP uygulamasının en büyük etkiyi ilk burkulma kapasitesi üzerinde yaptığı görülmektedir. Silindirin CFRP ile kaplanması, ilk burkulma kapasitesini 2,94 kat arttırabildiği görülmektedir. CFRP uygulaması silindiri rijitleştirerek burkulma kapasitesini arttırmıştır. Rijitleşme sonucunda CFRP'li silindir daha az yer değiştirme yapmıştır. Silindirin CFRP ile kaplanması dalga sayısını azaltmıştır.

%10'luk asit çözeltisiyle tam dolu silindirler

%10'luk asit çözeltisi ile tam dolu CFRP'siz silindir

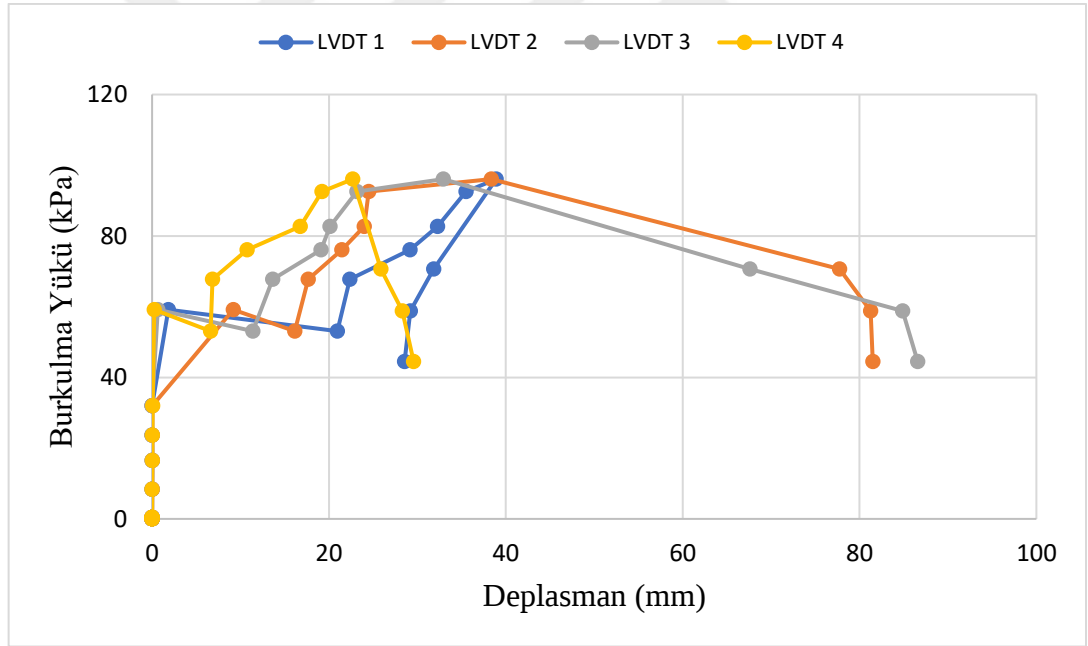
Bu numune korozyonun maksimum etkisinin belirlenmesi için %10 oranında HCl asit çözeltisi ile tamamen doldurulup CFRP kumaş yapıştırılmadan test edildi. Silindir çözeltiyle tamamen doldurularak 24 saat boyunca korozyon için beklendi. Korozyon deneyi sonrasında çözelti boşaltıldı. Silindir burkulma deneyleri için sisteme yerleştirildi. Ölçüm cihazları da yerleştirilip ayarlandıktan sonra deney başlatıldı. Hava sızıntısıyla birlikte deney sonlandırıldı. Bu numunede toplamda beş adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 36'da verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 37'de verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 38 ve Şekil 39'da verilmiştir.



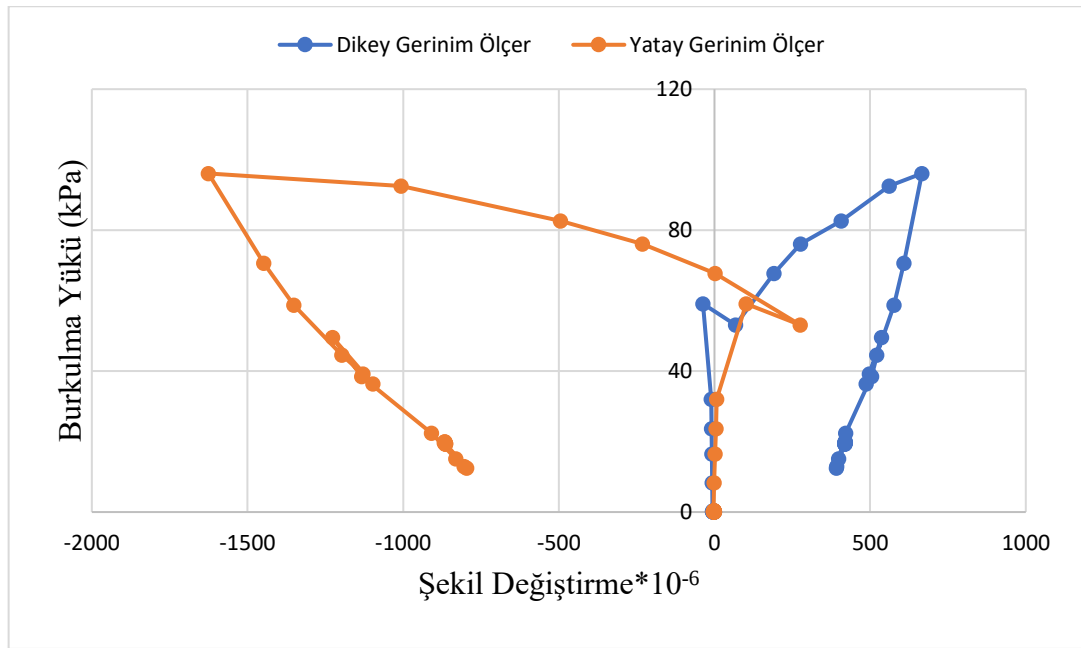
Şekil 36. S1-F-A10-CY'de oluşan dalgalar



Şekil 37. S1-F-A10-CY'nin burkulma sonrası durumu



Şekil 38. S1-F-A10-CY'nin burkulma yükü- deplasman grafiği



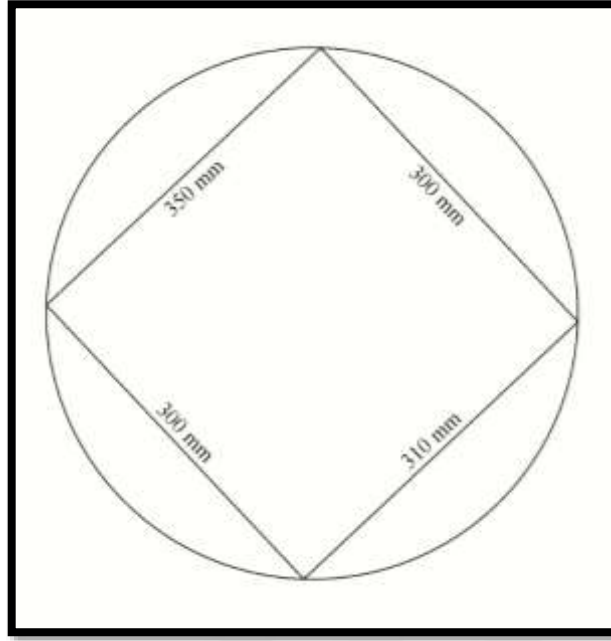
Şekil 39. S1-F-A10-CY'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Silindirin genel burkulma yükü ilk burkulma yükünün üç katı, göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 2,21 katıdır. Silindirin genel burkulma yükü ilk burkulma yüküne göre %66,69 artmıştır. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yüküne göre %54,69 artmıştır.

CFRP'siz korozyonsuz silindirle karşılaştırıldığında S1'in ilk burkulma kapasitesi %21,66 göçme burkulması kapasitesi ise %24,1 azalmıştır. Fakat genel burkulma kapasitesi korozyonsuz silindirle neredeyse aynı çıkmıştır. Korozyon silindirin burkulma kapasitesinin düşmesine sebep olmuştur.

%10'luk asit çözeltisi ile tam dolu tam boy CFRP'li silindir

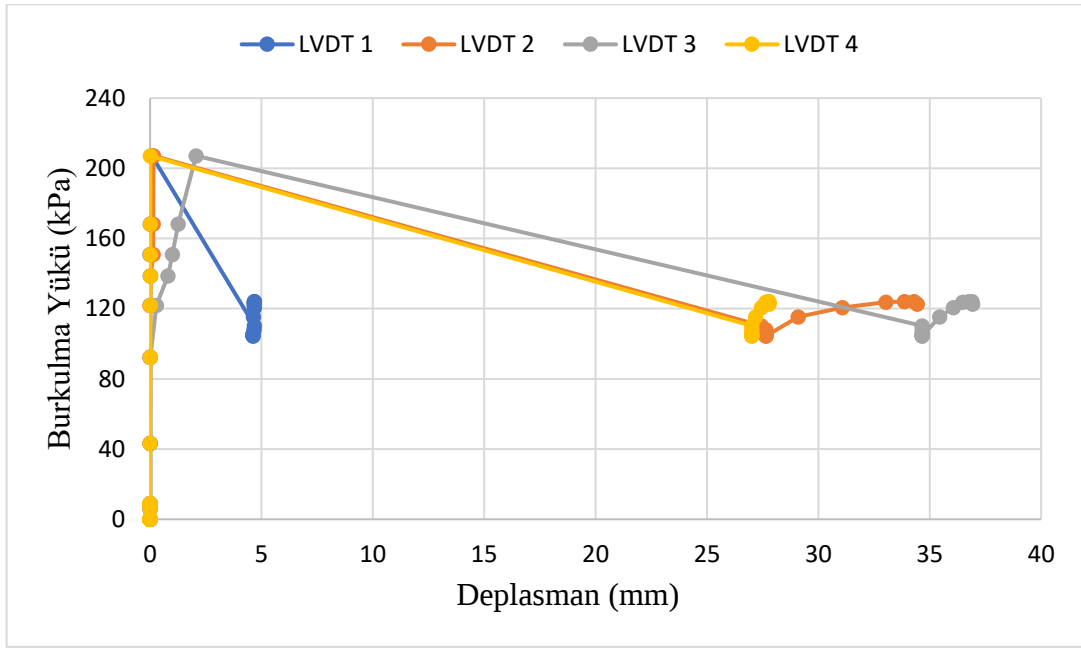
Bu silindir %10 oranında HCl asit çözeltisiyle tamamen doldurularak test edildi fakat S1-F-A10-CY'den farklı olarak bu numune silindir yüksekliği boyunca (800 mm) CFRP kumaş yapıştırılarak test edildi. Bu sayede korozyonun oluşturacağı dayanım kaybının ne oranda tölere edilebileceğinin belirlenmesi amaçlandı. Korozyon için çözelti doldurulup 24 saat beklendi. Çözelti boşaltılıp numune burkulma deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm aletleri ayarlandıktan sonra deney başlatıldı ve hava sızıntısıyla birlikte deney sonlandırıldı. Bu numunede dört adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 40'ta verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 41'de verilmiştir. Burkulma yükü-deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 42 ve Şekil 43'te verilmiştir.



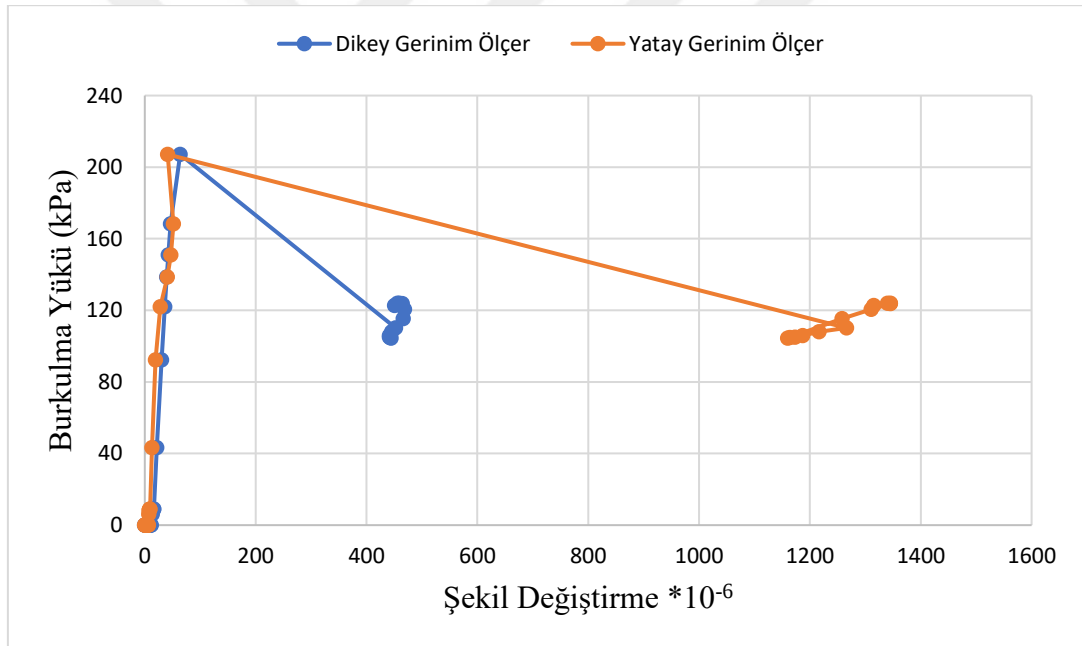
Şekil 40. S2-F-A10-CF’de oluşan dalgalar



Şekil 41. S2-F-A10-CF’nin burkulma sonrası durumu



Şekil 42. S2-F-A10-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği



Şekil 43. S2-F-A10-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Silindirin burkulma değerleri incelendiğinde, silindirin genel burkulması ilk burkulmasına göre %79,07 artmıştır. Göçme burkulması ise ilk burkulma yüküne göre %59,89 artmıştır. Silindirin genel burkulması, ilk burkulmasının 4,78 katıdır. Göçme burkulması ise ilk burkulmanın 2,49 katıdır.

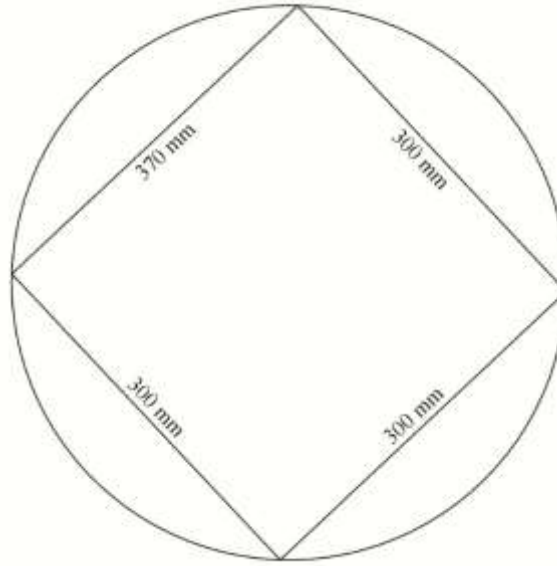
Bu gruptaki iki silindir incelendiğinde, ilk burkulmadan sonra burkulma kapasitesinde gerçekleşen artışın en fazla CFRP'li S2'de olduğu görülmüştür. S2'nin ilk burkulma kapasitesi, S1'in ilk burkulma kapasitesinin 1,35 katıdır. S2'nin ilk burkulma kapasitesi

CFRP'li korozyonsuz silindire göre %63,93 azalmıştır. Burada da korozyonun burkulma kapasitesini düşürdüğü görülmektedir.

%5'lik Asit Çözeltisiyle Tam Dolu Silindirler

%5'lik asit çözeltisi ile tam dolu CFRP'siz silindir

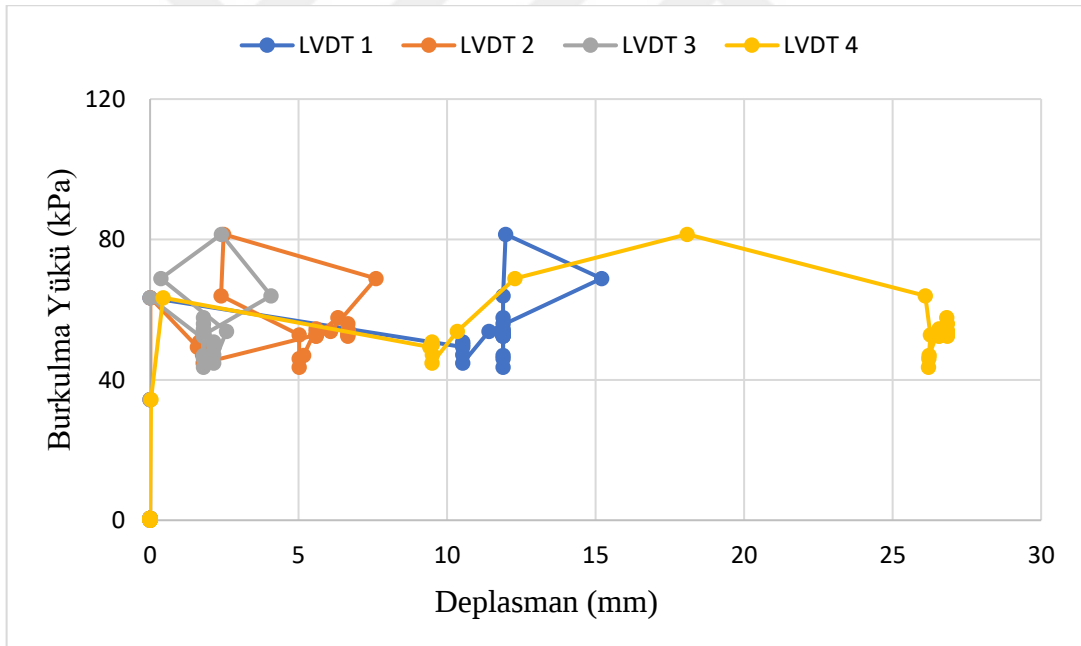
Bu numune asit oranının korozyon üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla %5 HCl asit çözeltisiyle tamamen dolduruldu. CFRP kumaş yapıştırılmadan test edilen bu numune korozyon tamamlandıktan sonra deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm aletlerinin hazırlanmasıyla birlikte deney başlatıldı. Burkulma deneyi sonrasında numune incelendiğinde toplamda dört adet burkulma dalgası oluştuğu belirlendi. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 44'te verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 45'te verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 46 ve Şekil 47'de verilmiştir.



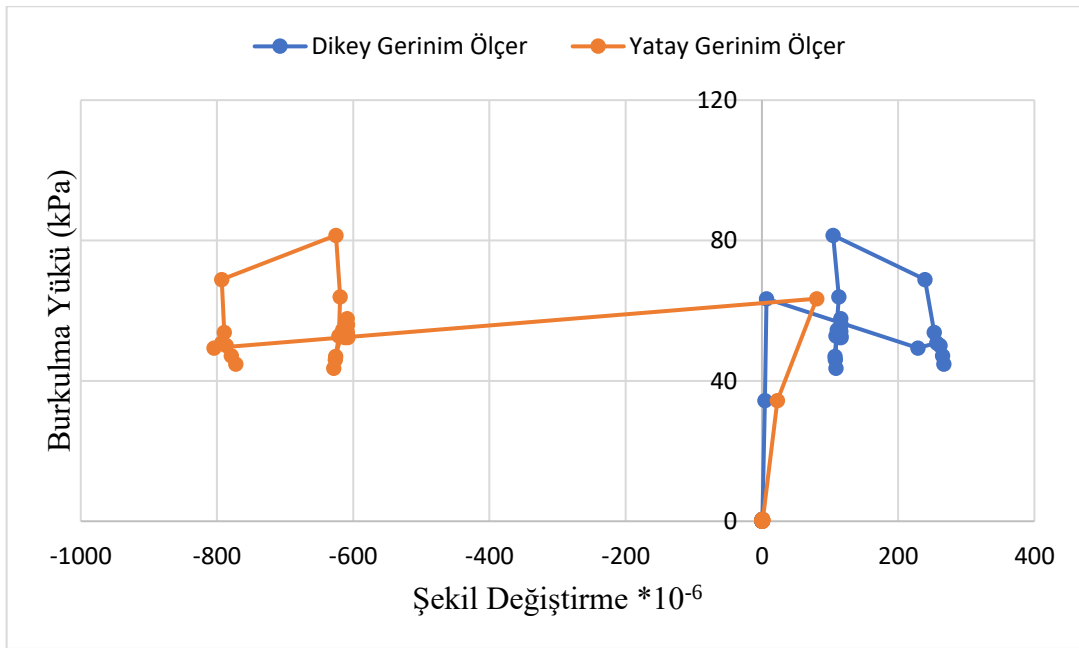
Şekil 44. S3-F-A5-CY'de oluşan dalgalar



Şekil 45. S3-F-A5-CY'nin burkulma sonrası durumu



Şekil 46. S3-F-A5-CY'nin burkulma yükü- deplasman grafiği

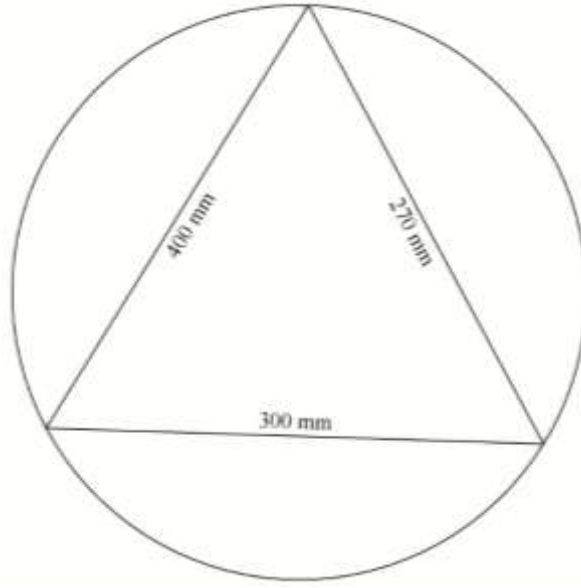


Şekil 47. S3-F-A5-CY'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Silindirin burkulma yükleri incelendiğinde, genel burkulma yükü ilk burkulma yükünün 2,37 katıdır. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 1,86 katıdır. İlk burkulmaya göre genel burkulma %57,74, çökme burkulması ise %46,14 artmıştır. Bu silindirde ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %15,72 azalmıştır. Korozyon silindirin burkulma kapasitesini azaltmıştır.

%5'lik asit çözeltisi ile tam dolu tam boy CFRP'li silindir

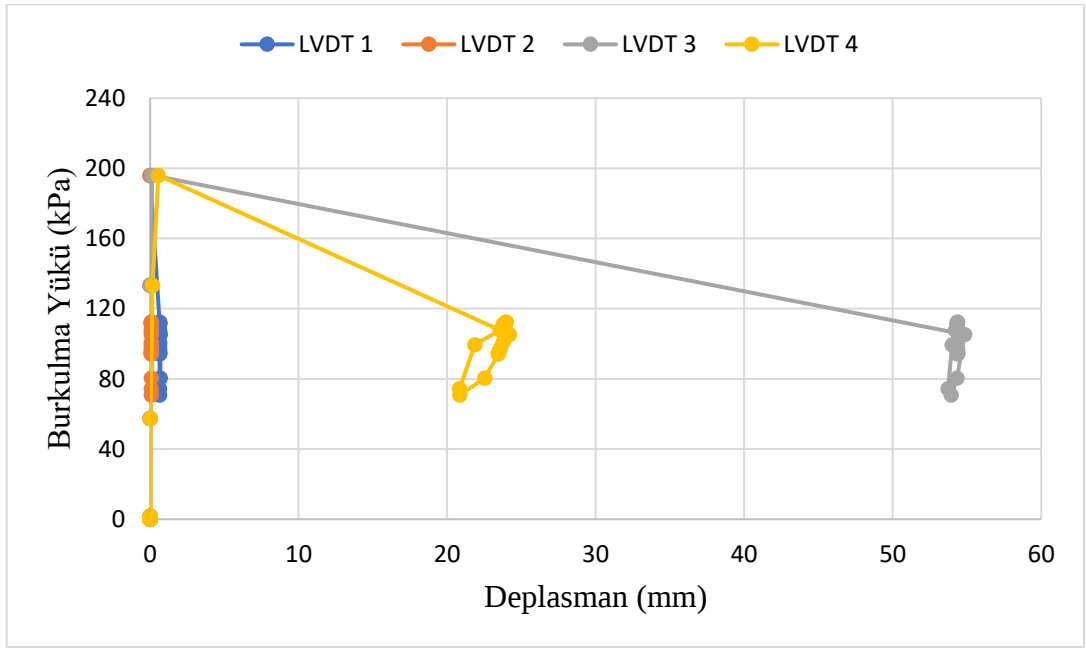
Bu numune de %5 asit çözeltisiyle tamamen doldurularak test edildi. S3'ten farklı olarak silindir yüksekliği boyunca (800 mm) CFRP kumaş ile kaplandı. CFRP kumaşın düşük asit oranlı çözeltilerin oluşturacağı korozyon üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlandı. Korozyon deneyi tamamlandıktan sonra uygun boyutta CFRP kumaş silindir yüzeyine yapıştırılarak silindir deneye hazır hale getirildi. Ölçüm aletleri kontrol edilip deney başlatıldı. Hava sızıntısı olana kadar deney devam ettirildi. Numunede toplamda üç adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 48'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 49'da verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 50 ve Şekil 51'de verilmiştir.



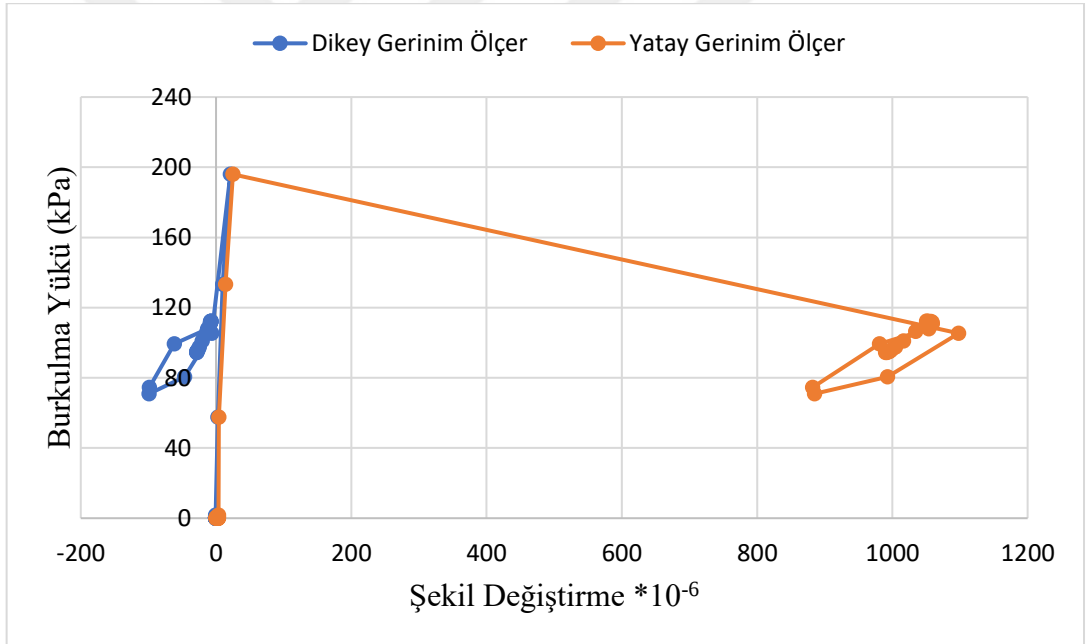
Şekil 48. S4-F-A5-CF’de oluşan dalgalar



Şekil 49. S4-F-A5-CF’nin burkulma sonrası durumu



Şekil 50. S4-F-A5-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği



Şekil 51. S4-F-A5-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Bu silindirin genel burkulma yükü ilk burkulma yükünün 3,4 katıdır. Göçme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 1,85 katı bulunmuştur. Silindirin ilk burkulma yüküne göre genel burkulma yükü %70,62 çökme burkulması yükü ise %45,95 artmıştır. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'li korozyonsuz silindire göre %52,08 azalmıştır.

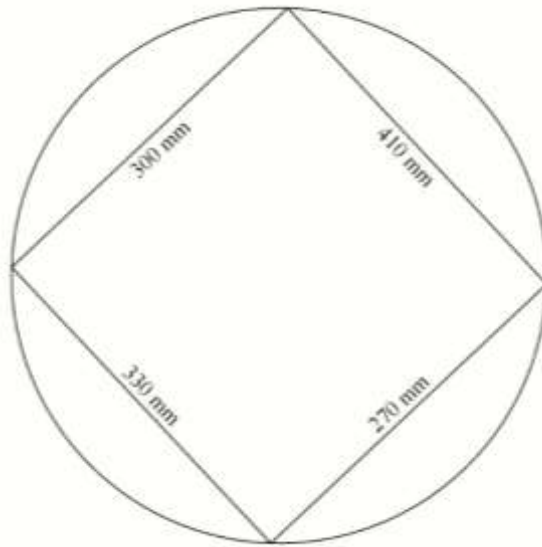
Bu gruptaki iki silindirin ilk burkulmadan sonra burkulma kapasitelerinde artış incelendiğinde S4'ün burkulma kapasitesindeki artışın S3'ten daha yüksek olduğu görülmüştür. S4'ün ilk burkulma kapasitesi S3'ün ilk burkulma kapasitesinin 1,67 katıdır. Tam CFRP

uygulaması yapılarak silindirin ilk burkulma kapasitesi %26 arttırılmıştır. Beklenildiği gibi CFRP ile kaplanan silindirde daha az dalga oluşmuştur.

%10'luk Asit Çözeltisiyle Yarı Dolu Silindirler

%10'luk asit çözeltisi ile yarı dolu 400 mm CFRP'li silindir

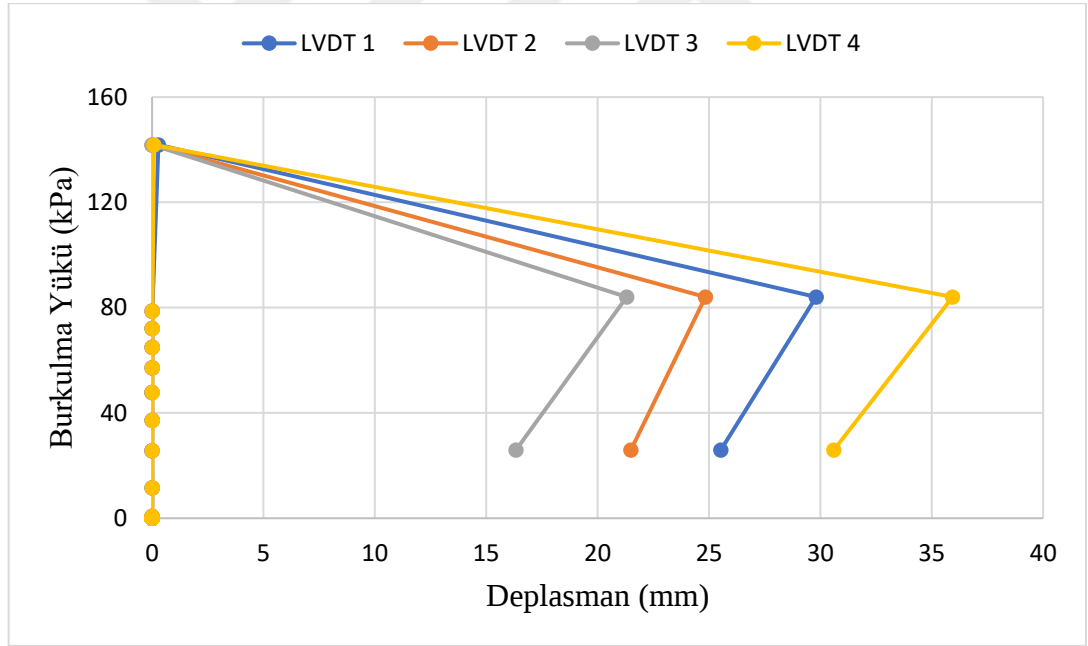
Bu silindir yarı dolu olacak şekilde %10 oranında HCl asit içeren çözeltiyle doldurularak test edildi. Ayrıca silindir yüksekliğinin yarısı kadar (400 mm) CFRP kumaş ile kaplandı. Bu modelin hazırlanmasında doluluk oranının azaltılmasının ve korozyonlu bölgeye CFRP kumaş yapıştırılmasının burkulma kapasitesi üzerinde ne gibi etkilerinin olacağının belirlenmesi amaçlandı. Bu amaçla korozyonlu bölgeye dıştan CFRP kumaş yapıştırıldı. Numune deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm cihazları yerleştirilip ayarlandı ve deney başlatıldı. Hava sızıntısı oluşuncaya kadar deney devam ettirildi. Bu numunede toplamda dört adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 52'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 53'te verilmiştir. Burkulma yükü-deplasman ve burkulma yükü-şekil değişimi grafikleri Şekil 54 ve Şekil 55'te verilmiştir.



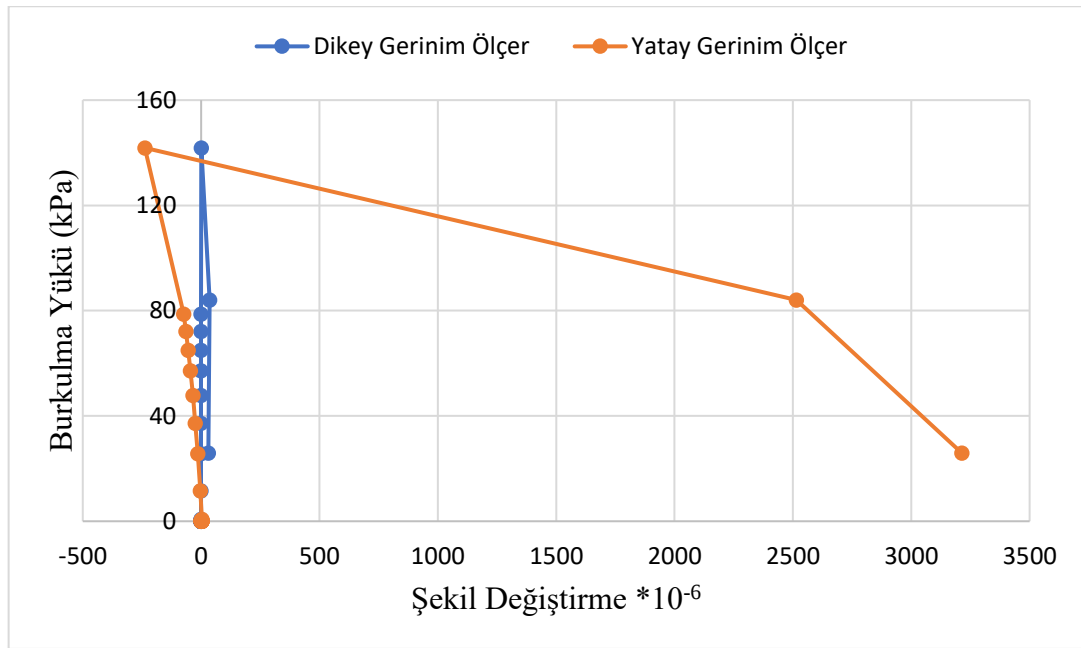
Şekil 52. S5-Y-A10-C400'de oluşan dalgalar



Şekil 53. S5-Y-A10-C400'ün burkulma sonrası durumu



Şekil 54. S5-Y-A10-C400'ün burkulma yükü- deplasman grafiği

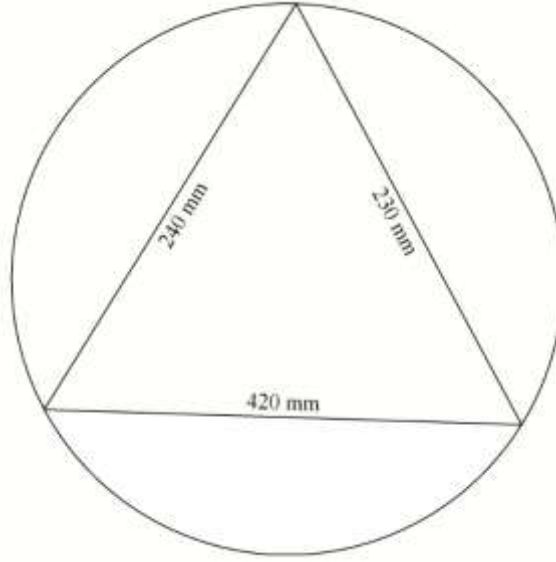


Şekil 55. S5-Y-A10-C400'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Bu silindirde genel burkulma ilk burkulmanın 2,97 katı, çökme burkulması ise ilk burkulmanın 1,76 katı bulunmuştur. İlk burkulmaya göre genel burkulma %66,33, çökme burkulması ise %43,16 artmıştır. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %14,48 artarken, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %60,25 azalmıştır.

%10'luk asit çözeltisi ile yarı dolu tam boy CFRP'li silindir

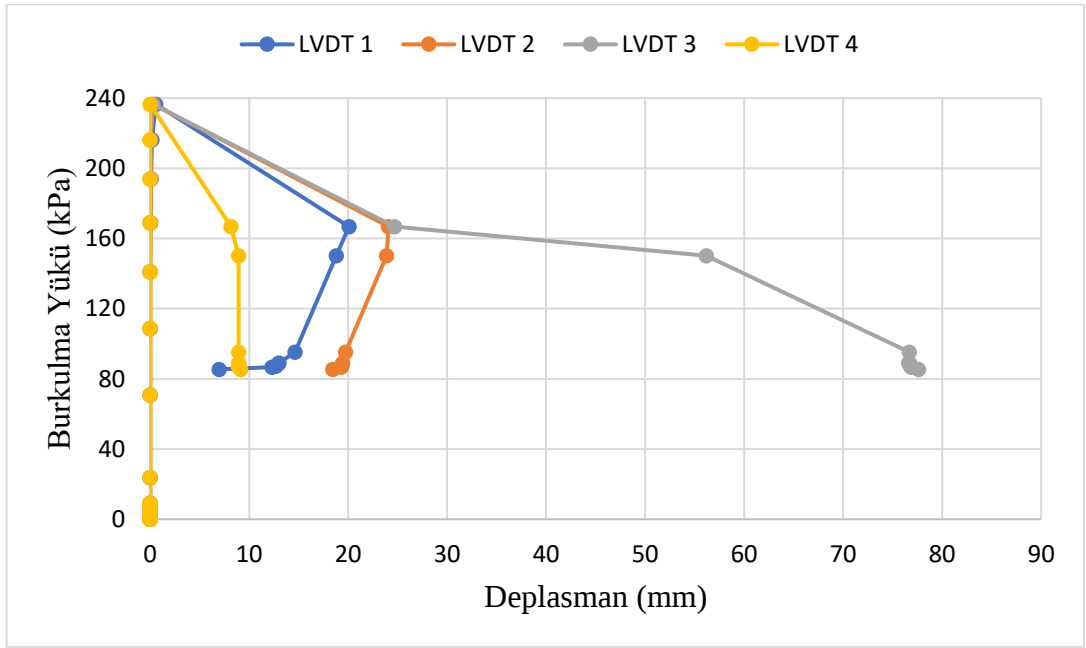
Bu model %10 asit çözeltisiyle yarıya kadar doldurularak test edildi. S5'ten farklı olarak CFRP kumaş uygulaması bu numuneye silindir yüksekliğinin tamamı boyunca (800 mm) yapıldı. CFRP kumaşın silindir yüksekliği boyunca yapıştırılmasının yarı dolu silindirlere etkisinin belirlenmesi amaçlandı. Uygun boyutta CFRP kumaş yüzeye yapıştırıldıktan sonra silindir deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm cihazları hazırlandıktan sonra deney başlatıldı. Hava sızıntısıyla birlikte deney bitirildi. Bu numune deney sonrasında incelendiğinde toplamda üç adet burkulma dalgasının olduğu gözlemlendi. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 56'da verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 57'de verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 58 ve Şekil 59'da verilmiştir.



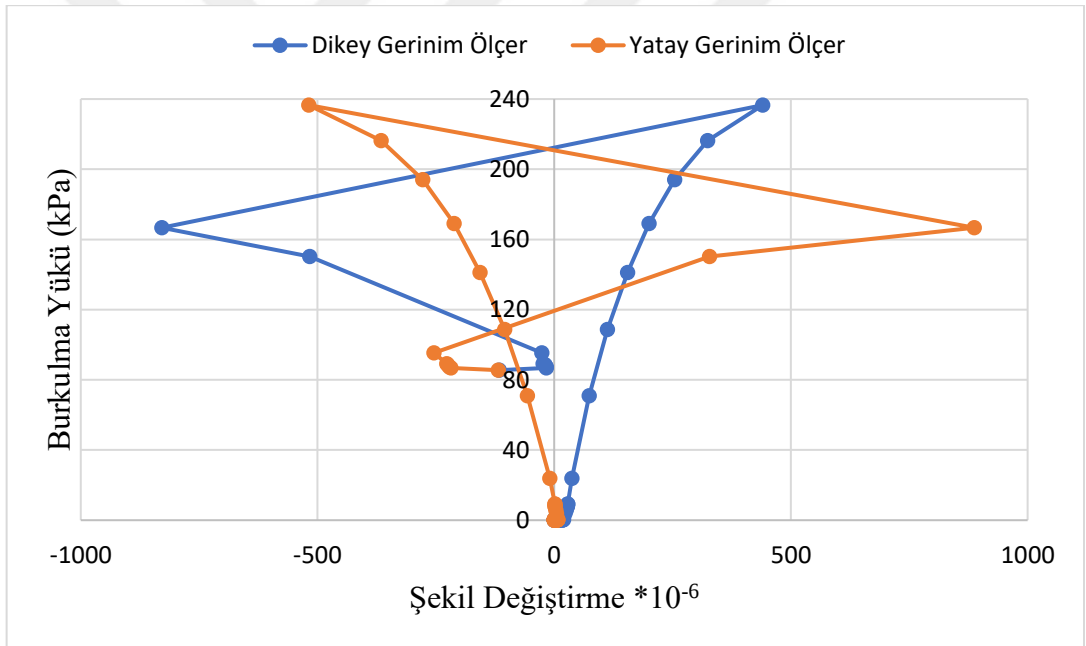
Şekil 56. S6-Y-A10-CF’de oluşan dalgalılar



Şekil 57. S6-Y-A10-CF’nin burkulma sonrası durumu



Şekil 58. S6-Y-A10-CF'nin burkulma yükü- deplasman grafiği

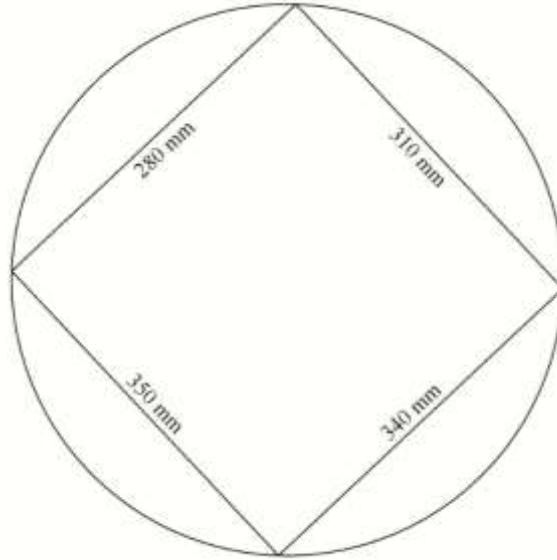


Şekil 59. S6-Y-A10-CF'nin burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Bu silindirde genel burkulma ilk burkulmanın 3,34 katı, çökme burkulması ise ilk burkulmanın 2,35 katı bulunmuştur. Silindirin genel burkulması ilk burkulmaya göre %70,05 artmıştır. Gökme burkulması ise ilk burkulmaya göre %57,5 artmıştır. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %42,34 artarken, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %41,04 azalmıştır.

%10'luk asit çözeltisi ile yarı dolu 100 mm CFRP'li silindir

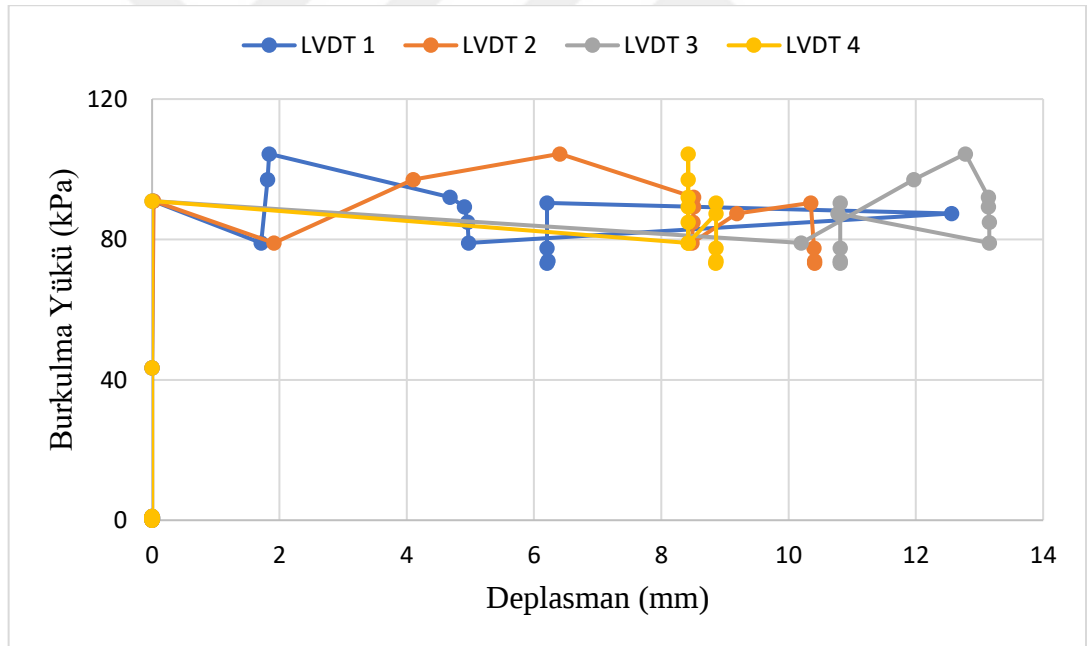
Bu numune de yarı dolu ve %10 oranında asit içeren çözeltiyle doldurularak test edildi. Fakat S5 ve S6'dan farklı olarak bu numuneye silindir yüksekliğinin tam ortasında 100 mm yüksekliğinde CFRP kumaş yapıştırıldı. Farklı boyutta bir CFRP kumaş yapıştırılmasının silindirin burkulma kapasitesine etkisinin araştırılması için böyle bir uygulama yapıldı. Korozyon deneyi sonrasında numune temizlenip CFRP kumaş yapıştırıldıktan sonra burkulma deneyi için deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm cihazları ve kamera hazır hale getirildikten sonra deney başlatıldı. Hava sızıntısı olana kadar deney devam ettirildi. Bu numunede toplamda dört adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 60'ta verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 61'de verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 62 ve Şekil 63'te verilmiştir.



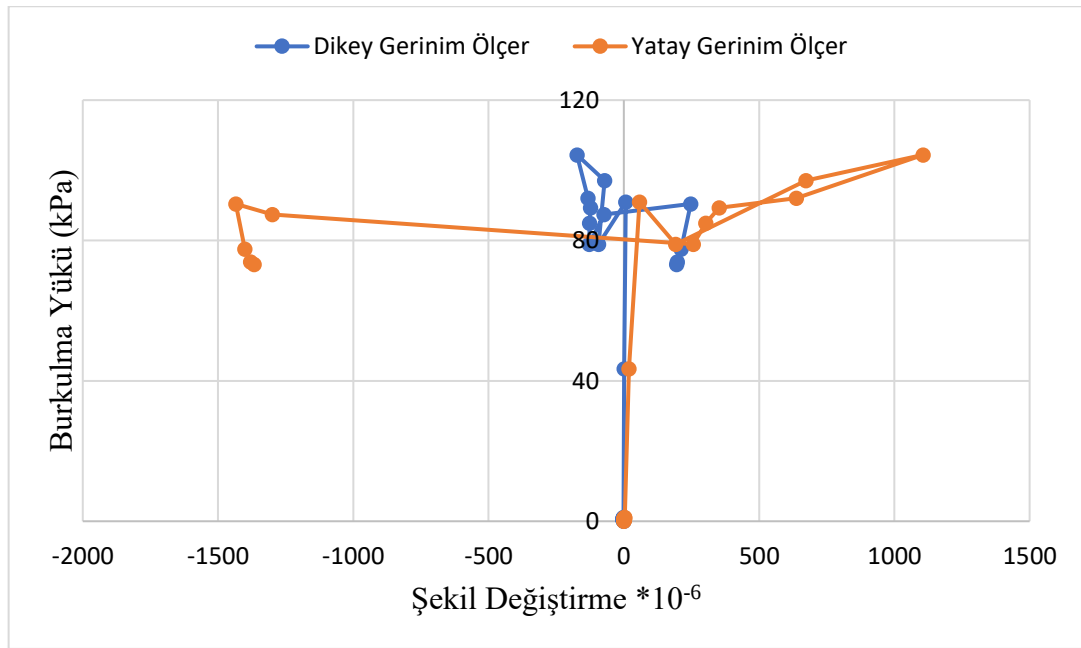
Şekil 60. S7-Y-A10-C100'de oluşan dalgalar



Şekil 61. S7-Y-A10-C100'ün burkulma sonrası durumu



Şekil 62. S7-Y-A10-C100'ün burkulma yükü- deplasman grafiği



Şekil 63. S7-Y-A10-C100'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Silindirin genel burkulma yükü ilk burkulma yükünün 2,4 katıdır. Çökme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 2,01 katı bulunmuştur. Bu silindirde ilk burkulmaya göre genel burkulma %58,41 çökme burkulması ise %50,3 artmıştır. 100 mm CFRP kaplamasıyla ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %5,92 artarken, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %63,87 azalmıştır.

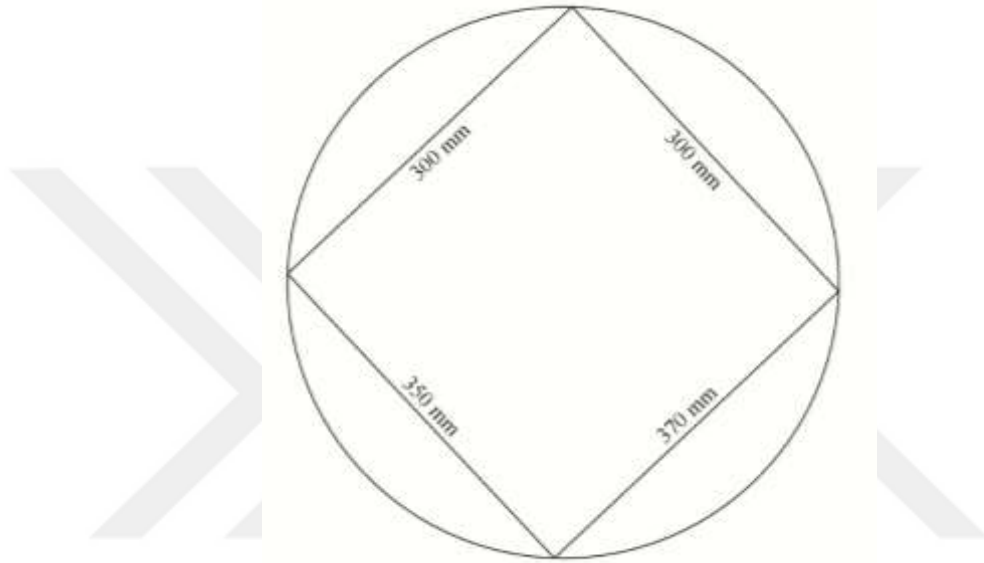
Bu gruptaki üç silindir kendi arasında kıyaslandığında tam CFRP'li S6'nın ilk burkulma kapasitesinin yarı CFRP'li S5'in 1,48 katı, 100 mm CFRP'li S7'nin ise 1,63 katı olduğu görülmektedir. Yarıya kadar CFRP ile kaplanan S5'in ilk burkulma kapasitesi, tam CFRP ile kaplanan S6'nın ilk burkulma kapasitesine göre %32,57 azalmıştır. 100 mm CFRP uygulanan S7'nin ilk burkulma kapasitesi tam CFRP'li S6'ya göre %38,71, yarı CFRP'li S5'e göre %9,1 azalmıştır. İlk burkulmadan sonra gerçekleşen burkulma kapasitesindeki artışın en fazla tam CFRP'li S6'da en az 100 mm CFRP'li S7'de olduğu görülmüştür. CFRP kaplaması silindirlerin burkulma kapasitesini önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca tam CFRP kaplaması silindirde oluşan dalga sayısını azaltmıştır. Üç silindir incelendiğinde en az dalganın tam CFRP'li S6'da olduğu görülmektedir. CFRP silindiri güçlendirerek daha az dalga oluşmasını sağlamıştır.

%5'lik Asit Çözeltisiyle Yarı Dolu Silindirler

%5'lik asit çözeltisi ile yarı dolu 100 mm CFRP'li silindir

Bu numune %5 oranında asit içeren çözeltiyle yarıya kadar doldurularak test edildi. S7'de olduğu gibi silindir yüksekliğinin tam ortasın 100 mm yüksekliğinde bir CFRP kumaş şerit yapıştırıldı. Bu numunede asit oranının etkisinin belirlenmesi amaçlandı. Silindir korozyon

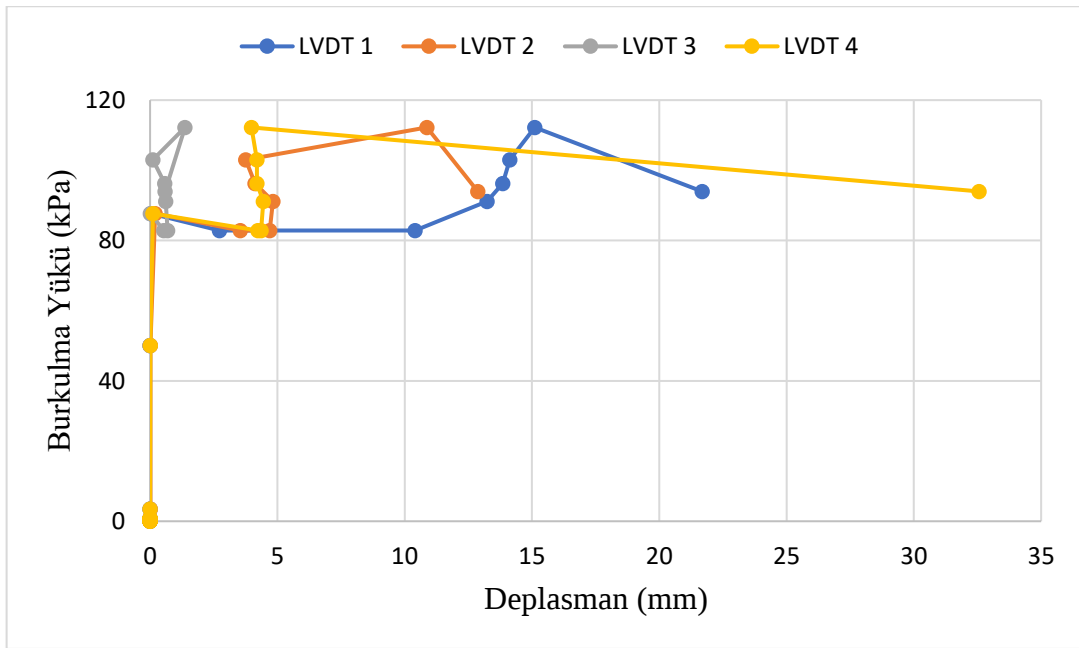
deneyi sonrası temizlenip CFRP kumaş yapıştırıldıktan sonra burkulma deneyi için deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm aletleri ve kamera hazırlandı. Deney başlatılıp hava sızıntısı oluncaya kadar devam ettirildi. Deney sonlandırıldıktan sonra ölçüm cihazlarından elde edilen veriler yardımıyla silindirin burkulma değerleri belirlendi. Bu numunede toplamda dört adet burkulma dalgası oluştu. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 64'te verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 65'te verilmiştir. Burkulma yükü-deplasman ve burkulma yükü-şekil değişimi grafikleri Şekil 66 ve Şekil 67'de verilmiştir.



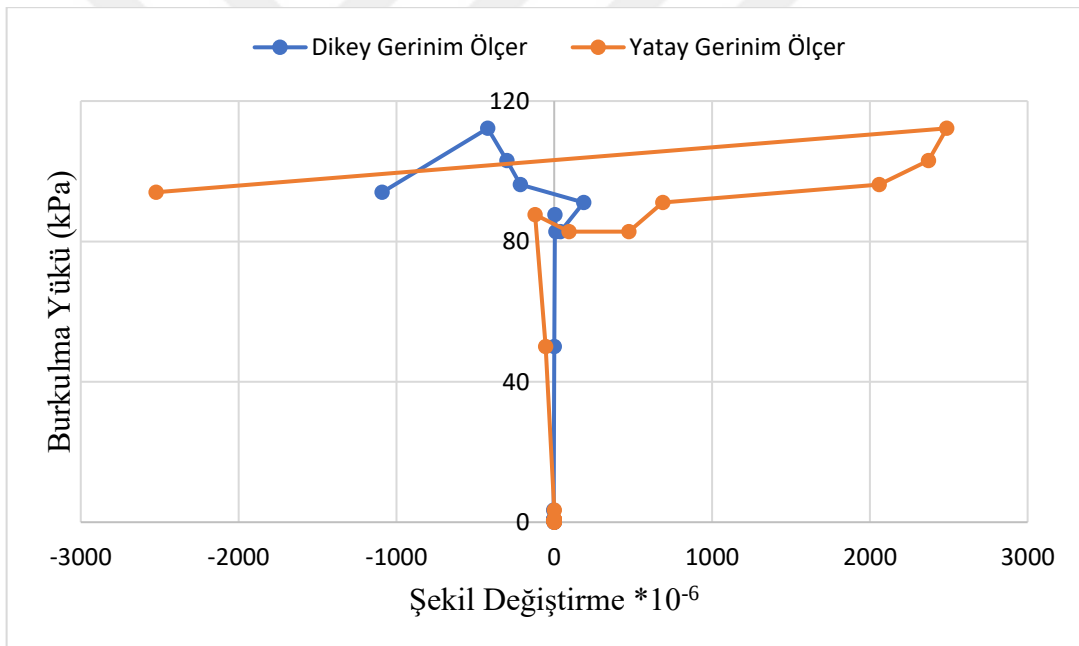
Şekil 64. S8-Y-A5-C100'de oluşan dalgalar



Şekil 65. S8-Y-A5-C100'ün burkulma sonrası durumu



Şekil 66. S8-Y-A5-C100'ün burkulma yükü- deplasman grafiği

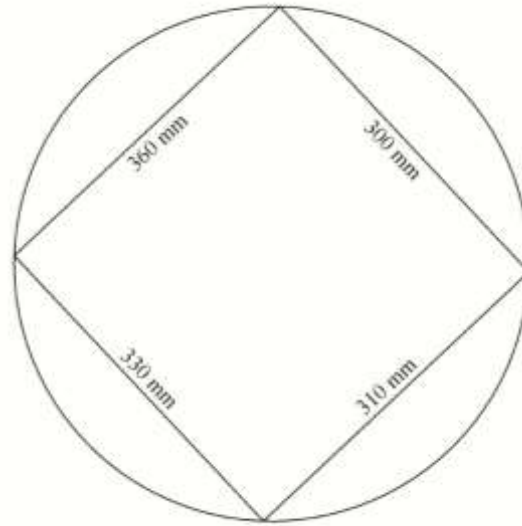


Şekil 67. S8-Y-A5-C100'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

100 mm CFRP güçlendirmesi yapılan S8'de genel burkulma ilk burkulmanın 2,24 katı, çökme burkulması ise ilk burkulmanın 1,88 katı bulunmuştur. Bu silindirde genel burkulma ilk burkulmanın %55,4'ü kadar artarken, çökme burkulması ilk burkulmanın %46,75'i kadar artmıştır. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %18,4 artarken, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %58,35 azalmıştır.

%5'lik asit çözeltisi ile yarı dolu 400 mm CFRP'li silindir

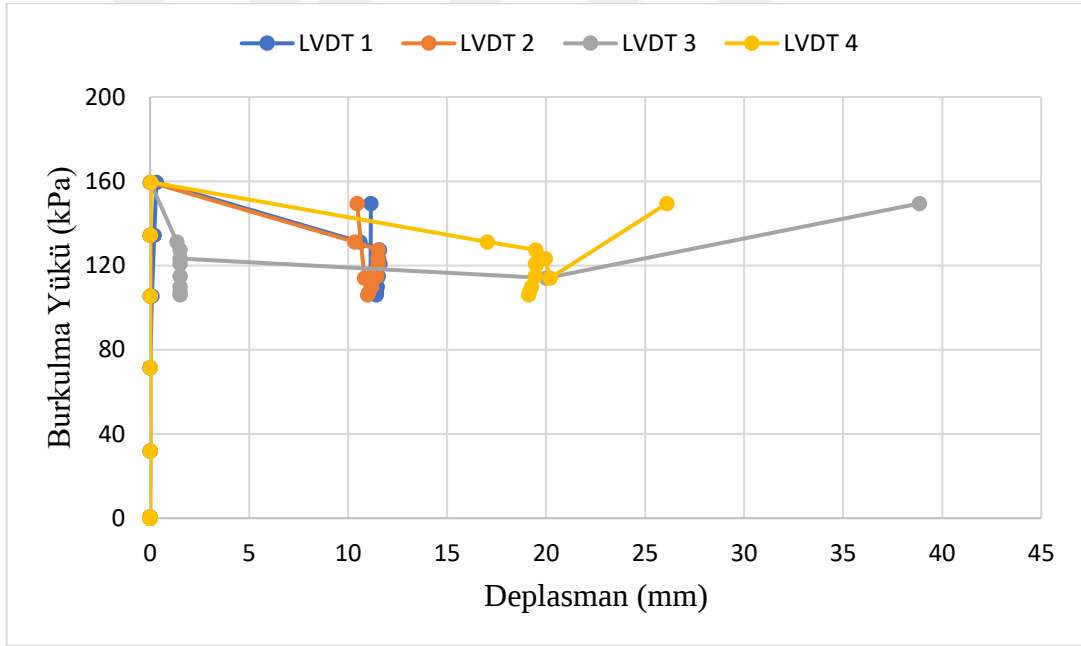
Bu numune %5 oranında HCl asit içeren çözeltiyle yarıya kadar doldurularak test edildi, fakat S8'den farklı olarak CFRP kumaş silindir yüksekliğinin yarısına boyunca yapıştırıldı. Sadece korozyonlu bölgenin CFRP kumaş ile kaplanmasının burkulma kapasitesine etkisinin incelenmesi amaçlandı. Numune korozyon testinin tamamlanmasından sonra burkulma için deney sistemine yerleştirildi. Ölçüm cihazları yerleştirilip veri toplama cihazına bağlandı. Deney başlatılıp sistem hava alıncaya kadar devam ettirildi. Bu numune incelendiğinde toplamda dört adet burkulma dalgası olduğu gözlemlendi. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 68'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 69'da verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 70 ve Şekil 71'de verilmiştir.



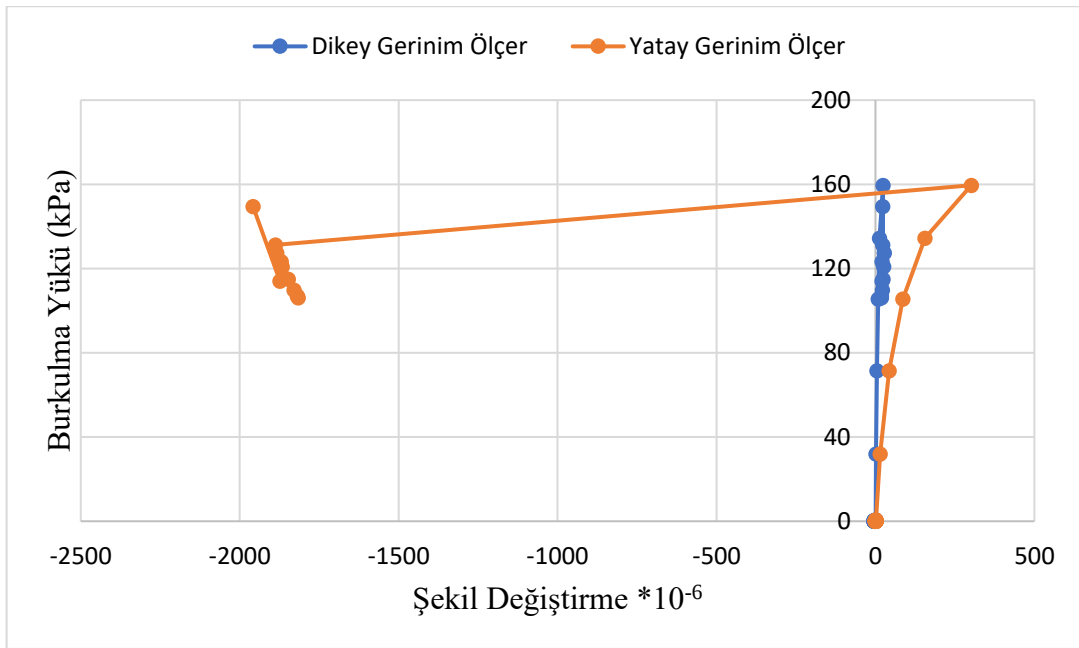
Şekil 68. S9-Y-A5-C400'de oluşan dalgalar



Şekil 69. S9-Y-A5-C400'ün burkulma sonrası durumu



Şekil 70. S9-Y-A5-C400'ün burkulma yükü- deplasman grafiği

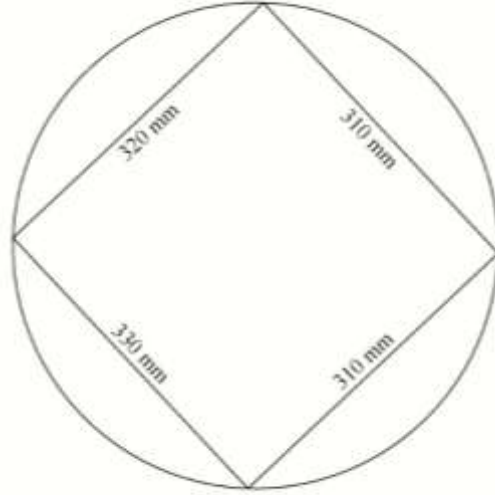


Şekil 71. S9-Y-A5-C400'ün burkulma yükü- şekil değiştirme grafiği

Yüksekliğin yarısına kadar CFRP güçlendirmesi yapılan bu silindirde genel burkulma ilk burkulmanın 2,23 katı, çökme burkulması ise ilk burkulmanın 1,84 katı bulunmuştur. Silindirin genel burkulma yükünün ilk burkulma yüküne göre artış miktarı %55,18, çökme burkulması yükünün ilk burkulma yüküne göre artış miktarı %45,5'tir. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %42,88 artarken, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %40,49 azalmıştır.

%5'lik asit çözeltisi ile yarı dolu tam boy CFRP'li silindir

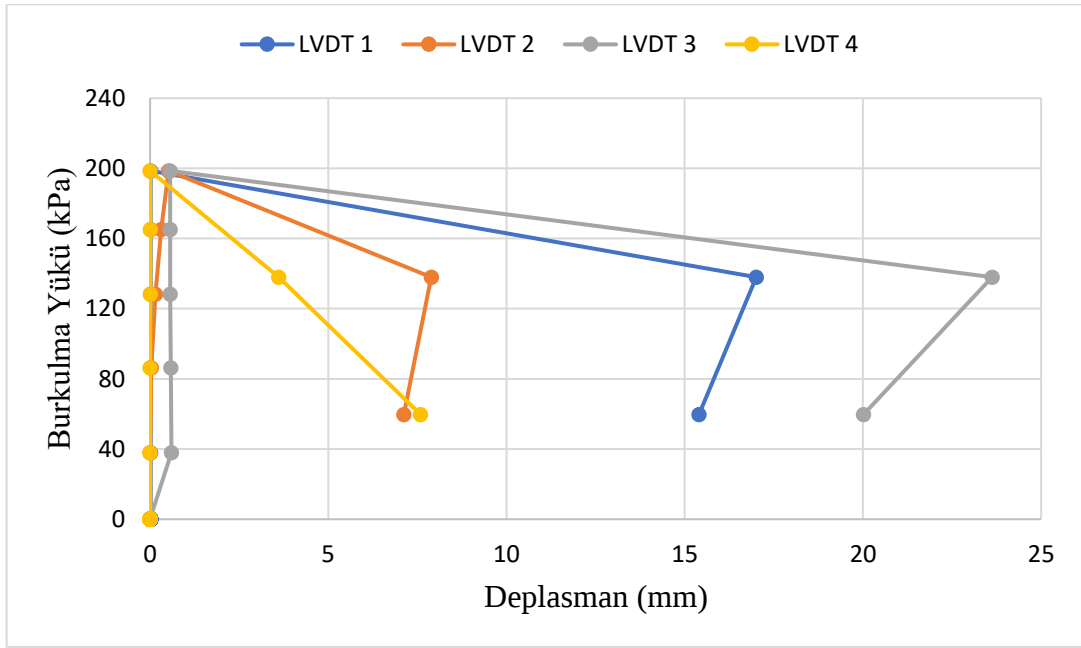
Bu numune %5 oranında HCl asit içeren çözelti ile yarıya kadar doldurularak test edildi. S8 ve S9 'dan farklı olarak bu numunede CFRP kumaş uygulaması silindir yüksekliğinin tamamı boyunca yapıldı. Silindirin tamamen CFRP kumaş ile kaplanmasının yarı dolu silindirlerin burkulma davranışı üzerine etkisinin incelenmesi amaçlandı. Korozyon ve burkulma deneyleri gerçekleştirildikten sonra ölçüm cihazlarının bilgisayara aktardığı veriler yardımıyla burkulma değerleri belirlendi. Bu numune incelendiğinde burkulma dolayısıyla numunede dört adet dalga oluştuğu gözlemlendi. Oluşan dalgaların boyutları Şekil 72'de verilmiştir. Ölçüm aletleri yardımıyla elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Silindirin deney sonrası fotoğrafları Şekil 73'te verilmiştir. Burkulma yükü- deplasman ve burkulma yükü- şekil değişimi grafikleri Şekil 74 ve Şekil 75'te verilmiştir.



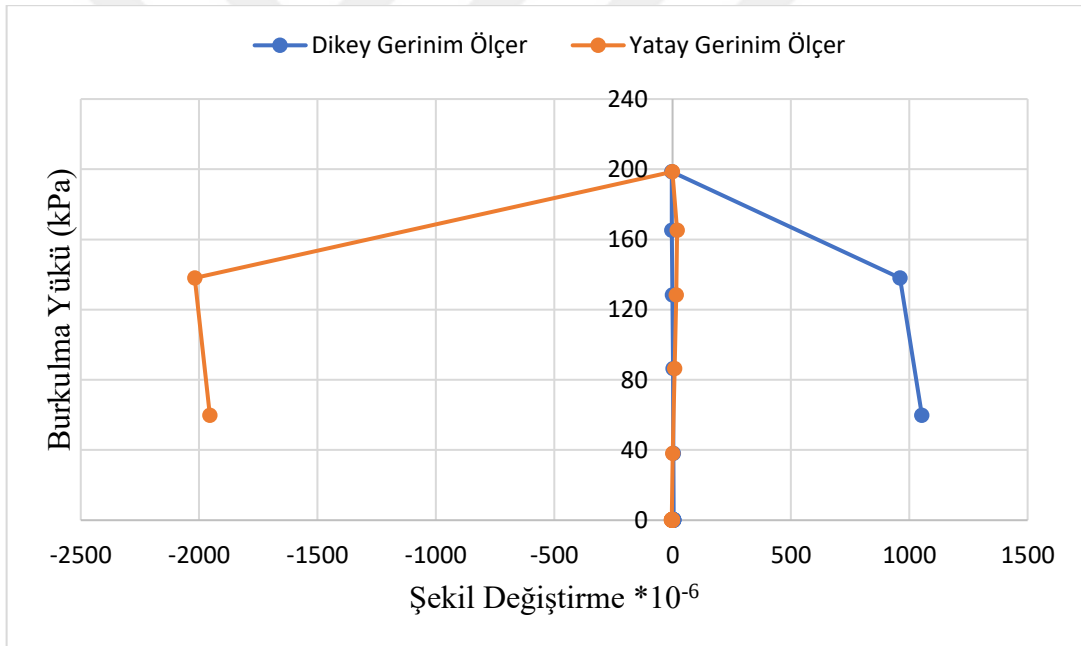
Şekil 72. S10-Y-A5-CF’de oluşan dalgalar



Şekil 73. S10-Y-A5-CF’nin burkulma sonrası durumu



Şekil 74. S10-Y-A5-CF'nin burkulma yükü-deplasman grafiği



Şekil 75. S10-Y-A5-CF'nin burkulma yükü-şekil değiştirme grafiği

Silindirin genel burkulma yükü ilk burkulma yükünün 2,3 katı, çökme burkulması yükü ise ilk burkulma yükünün 1,6 katı bulunmuştur. İlk burkulmaya göre burkulma kapasitesindeki artış genel burkulma yükünde %56,48, çökme burkulması yükünde ise %37,36'dır. Silindirin ilk burkulma kapasitesi CFRP'siz korozyonsuz silindire göre %52,72 artmış, CFRP'li korozyonsuz silindire göre %28,1 azalmıştır.

Bu gruptaki üç silindir kendi arasında karşılaştırıldığında tam CFRP'li S10'un ilk burkulma kapasitesinin, yarı CFRP'li S9'un ilk burkulma kapasitesinin 1,21 katı, 100 mm CFRP'li S8'in ilk burkulma kapasitesinin 1,73 katı olduğu görülmüştür. Tam CFRP'li S10'un

ilk burkulma kapasitesi 100 mm CFRP'li S8'e göre %42,06, yarı CFRP'li S9'a göre %17,23 artmıştır. Yarım CFRP'li silindirin ilk burkulma kapasitesi 100 mm CFRP'li silindirin ilk burkulma kapasitesine göre %30 daha fazladır. İlk burkulma gerçekleşikten sonraki kısımda burkulma kapasitesindeki artışlara bakıldığında en fazla artışın tam CFRP'li silindirde, en az artışın ise yarıya kadar CFRP ile kaplanan silindirde olduğu görülmektedir.

Aynı oranda asit çözeltisiyle farklı miktarda doldurulan silindirler

%10 oranında asit içeren modellerden S2-F-A10-CF, ilk burkulmadan sonra burkulma kapasitesindeki artışın en yüksek olduğu modeldir. S2-F-A10-CF'nin ilk burkulma kapasitesi S6-H-A10-CF'nin ilk burkulma kapasitesine göre %38,81 azalmıştır.

%5 oranında asit içeren modeller arasında ilk burkulma sonrasında burkulma kapasitesinde en yüksek artış S4-F-A5-CF'de görülmüştür. En düşük artış ise S9-H-A5-CH'de görülmüştür. S4-F-A5-CF'nin İlk burkulma kapasitesi S10-Y-A5-CF'ye göre %33,36 azalmıştır.

Daha dolu olan silindirlerin burkulma kapasitesi daha azdır. Silindirlerin asit içeren çözeltiyle doluluk oranı arttıkça burkulma kapasitesinin azaldığı görülmektedir.

Aynı boyutta CFRP ile kaplanan silindirler

CFRP kumaş yapıştırılmadan test edilen numunelerde %10 oranında asit içeren çözeltiyle tamamen doldurulan S1-F-A10-CY'nin ilk burkulma kapasitesi %5 oranında asit içeren çözeltiyle tamamen doldurulan S3'ün ilk burkulma kapasitesine göre %7,06 azalmıştır. Silindir yüksekliği boyunca CFRP kumaş yapıştırılan tam dolu numunelerde %10 oranında asit içeren çözeltiyle doldurulan S2'nin ilk burkulma kapasitesi %5 oranında asit içeren çözeltiyle doldurulan S4'ün ilk burkulma kapasitesine göre %24,71 azalmıştır. 100 mm CFRP kumaş yapıştırılarak test edilen numunelerde %10 asit içeren çözeltiyle doldurulan S7'nin ilk burkulma kapasitesi %5 oranında asit içeren çözeltiyle doldurulan S8'in ilk burkulma kapasitesine göre %13,26 azalmıştır. Yarıya kadar CFRP kumaş yapıştırılarak test edilen yarı dolu modellerde %10 oranında asit içeren çözeltiyle doldurulan S5'in ilk burkulma kapasitesi %5 oranında asit içeren çözeltiyle doldurulan S9'un ilk burkulma kapasitesine göre %33,21 azalmıştır. Tam CFRP'li yarı dolu numunelerde %10 asitli S6'nın ilk burkulma kapasitesi %5 asitli S10'un ilk burkulma kapasitesine göre %18 azalmıştır.

Yüksek oranda HCl asit içeren çözeltilerle dolu olan silindirlerin burkulma kapasitesinin daha az olduğu görülmüştür. Asit oranının artması korozyon hasarını artırarak burkulma kapasitesinin düşmesine sebep olmuştur.

Silindirlerde oluşan hasarlar

Silindirlere uygulanan yük sonucunda oluşan dalga sayıları ve Formül (4)'ten elde edilen oluşabilecek yaklaşık dalga sayıları Tablo 7'de verilmiştir. Deney sonucu oluşan dalga sayılarının formül sonucu elde edilen yaklaşık değerden daha az olduğu görülmektedir. Burkulma deneyi sonrasında silindirlerin alt ve üst bölgesinde burkulma hasarı oluşmuştur. Genel olarak oluşan hasar çizgileri V şeklindedir. CFRP kaplaması yapılan silindirlerin burkulmaya karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür. CFRP kaplaması silindirlerin burkulma direncini önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca CFRP ile güçlendirilen silindirlerde oluşan dalga sayısı daha azdır. Burkulma deneyi sonucunda silindirlerde oluşan hasarlar Şekil 29-33-37-41-45-49-53-57-61-65-69-73'te görülmektedir. Silindirlere yapılan kısmi CFRP uygulaması silindirin altında ve üstünde oluşan dalgaların sayısını ve boyutunu değiştirmemiştir.

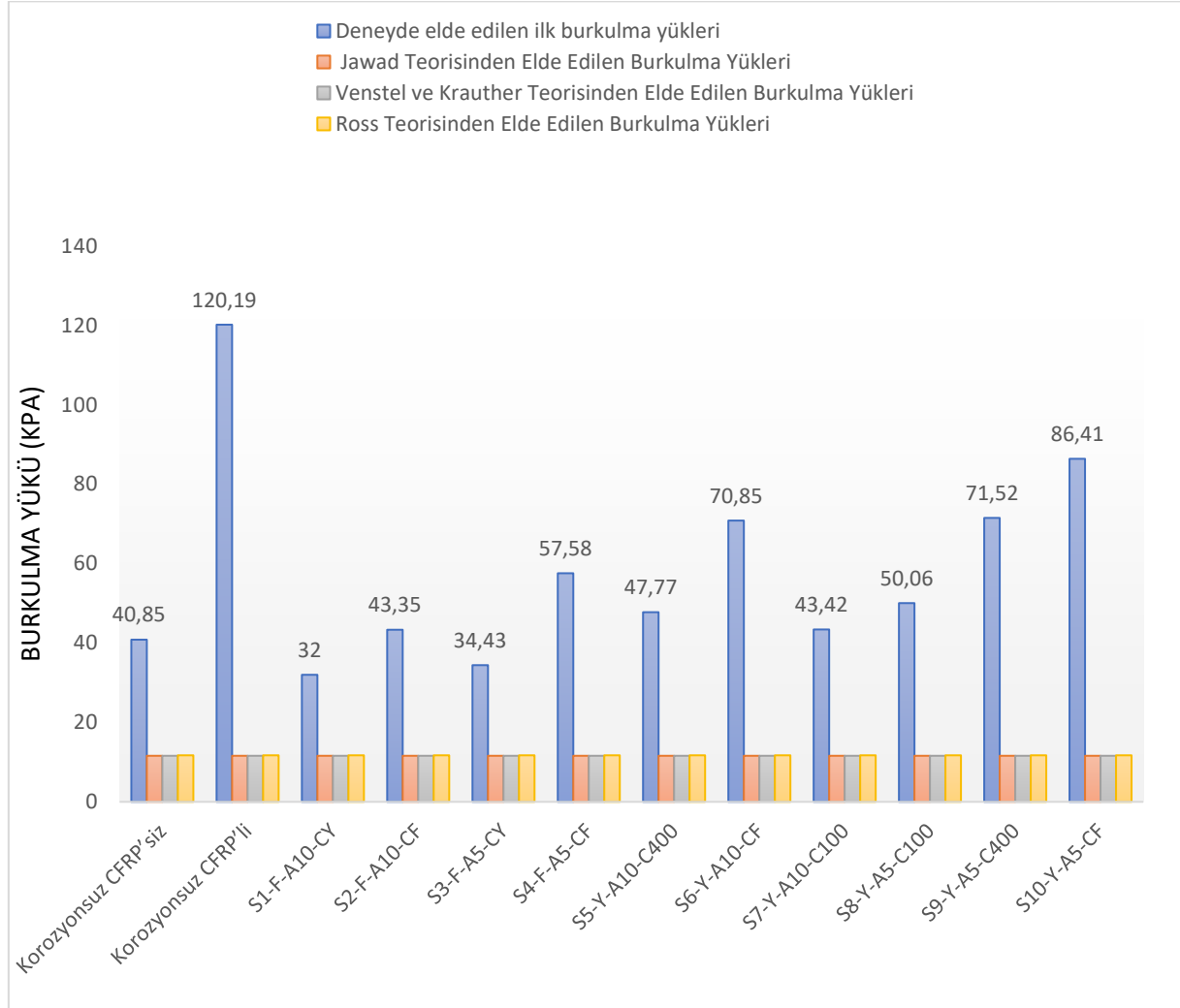
Tablo 7. Silindirlerde Oluşan Dalga Sayıları

Gruplar	Silindirler	Dalga Sayısı	
		Deneyde Oluşan	Formül (4)'ten Elde Edilen Yaklaşık Değer
Korozyonsuz	Korozyonsuz CFRP'siz	5	6-7
		4	6-7
	Korozyonsuz CFRP'li		
Korozyonlu	S1-F-A10-CY	5	6-7
	S2-F-A10-CF	4	6-7
	S3-F-A5-CY	4	6-7
	S4-F-A5-CF	3	6-7
	S5-Y-A10-C400	4	6-7
	S6-Y-A10-CF	3	6-7
	S7-Y-A10-C100	4	6-7
	S8-Y-A5-C100	4	6-7
	S9-Y-A5-C400	4	6-7
	S10-Y-A5-CF	4	6-7

Deneyssel ve teorik burkulma kapasitelerinin kıyaslanması

Formül (1), (2) ve (3) kullanılarak silindirlere ait teorik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Jawad teorisine göre burkulma yükü 11,6 kPa, Ventsel ve Krauthammer teorisine göre burkulma yükü 11,6 kPa ve Ross teorisine göre burkulma yükü 11,72 kPa

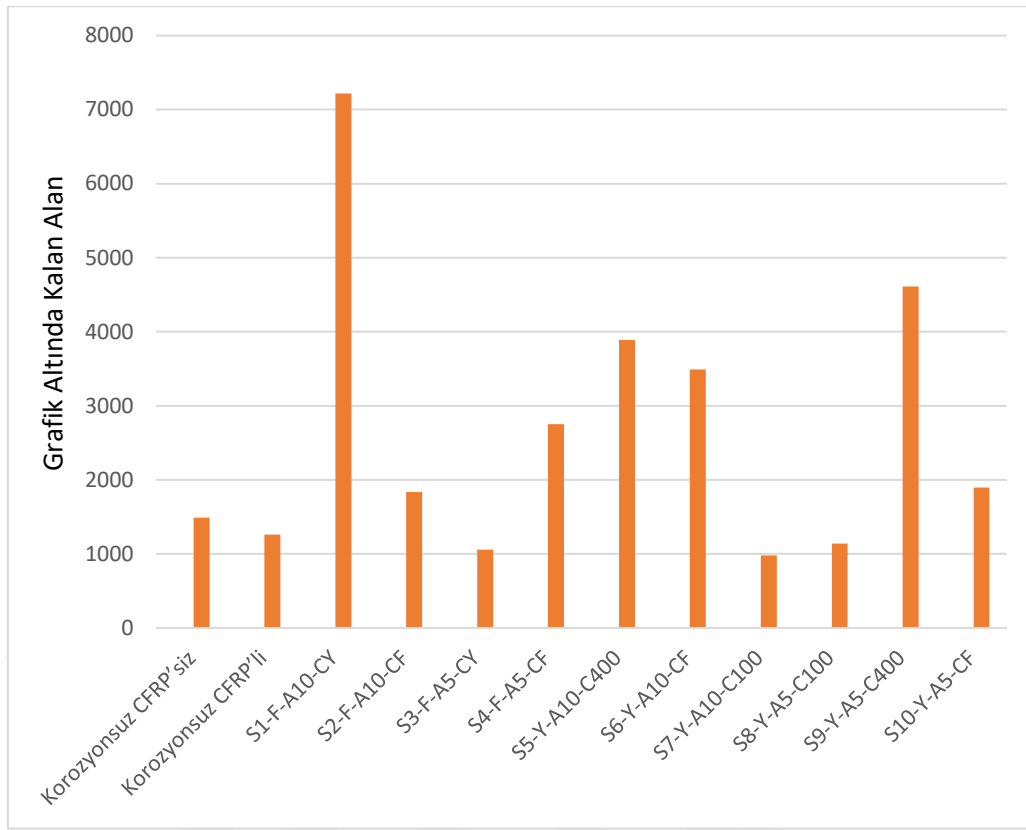
bulunmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen burkulma değerleri ise Tablo 6’da verilmiştir. Şekil 76’da deneysel ve teorik burkulma değerlerinin birlikte verildiği bir grafik görülmektedir. Teorik formüllerden elde edilen burkulma değerleri, deneylerde elde edilen burkulma değerlerinde düşük çıkmıştır. Bu formüller korozyon etkisini içermediklerinden, çeşitli katsayılarla güncellenmeleri gerekmektedir.



Şekil 76. Deneysel ve teorik ilk burkulma değerleri

Silindirlerin enerji absorbe kapasitesi

Silindirlerin uygulanan yük altında absorbe edebildikleri enerjinin bulunması amacıyla burkulma yükü- deplasman grafiklerinin altında kalan alan hesaplandı. Şekil 77’de silindirlerin alanları grafik halinde verilmiştir. Bu alan silindirlerin sünekliğini ifade etmektedir. Sünekliği yüksek silindirler daha yüksek enerji absorbe edebilmektedir. Genel olarak CFRP ile kaplanan silindirlerin daha yüksek enerji absorbe edebildiği görülmektedir. CFRP kaplaması silindirlerin burkulma kapasitesini arttırdığı gibi, silindirlerin daha sünek davranabilmesini sağlamıştır.



Şekil 77. Silindirlerin enerji absorbe kapasitesi

SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında hidroklorik asit etkisindeki silindirik çelik tankların burkulma kapasitesine CFRP kaplamasının etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla deneyler iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada silindirler 24 saat korozyona maruz bırakılmıştır. Korozyon için kullanılan hidroklorik asit literatürde genelde %5 ve %10 arasında değişen oranlarda kullanıldığı için bu çalışmada da bu oranlar tercih edilmiştir. Korozyon dolayısıyla silindirlerde oluşan ağırlık kaybı belirlenmiştir. İkinci aşamada ise burkulma deneyi yapılmıştır. Silindirlerin deneylerle elde edilen ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması yükleri, teorik formüllerden elde edilen burkulma değerleriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler yorumlanacak olursa;

- Korozyonsuz silindirler incelendiğinde, silindirin tamamının CFRP ile kaplanması sonucunda ilk burkulma kapasitesinin üç kata kadar artabildiği görülmüştür.
- Silindirlerin korozyon öncesi ve sonrası ağırlıkları incelendiğinde, %10'luk çözeltiyle tam dolu olan silindirlerdeki ağırlık kaybı %4 civarındayken, yarı dolu silindirlerde bu kaybın %1 civarında olduğu görülmüştür. %5'lik çözeltiyle tam doldurulan silindirlerde ise ağırlık kaybı %3 civarındadır. Bu oran yarı dolu silindirlerde %1'e kadar düşmüştür. Çözeltideki asit oranının artması malzemede daha fazla deformasyona sebep olmuştur ve bunun sonucunda ağırlık kaybı artmıştır.
- Silindirlerin deney süresince davranışları incelendiğinde, ilk burkulma gerçekleşikten sonra dayanımlarında azalma olmadan bir miktar daha yük taşımaya devam ettikleri gözlemlenmiştir.
- Korozyonlu ve korozyonsuz silindirler kıyaslandığında, korozyonun malzeme inceltici etkisi dolayısıyla korozyonlu silindirlerin burkulma kapasitelerinin daha düşük olduğu görülmüştür.
- Korozyona maruz kalan silindirler incelendiğinde, burkulma dolayısıyla oluşan dalga sayısının daha fazla olduğu görülmüştür.
- Silindirlerin yük- deplasman ve yük- şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde bu grafiklerin bağlantılı olduğu görülmüştür. Silindirlerin davranışı incelendiğinde ise, göçme noktasına kadar elastik davranış gösterdikleri, göçme noktasında malzeme davranışının elastikten plastiğe geçtiği görülmüştür.

- Korozyonlu silindirler incelendiğinde çözeltideki asit oranı arttıkça burkulma yükünün azaldığı görülmüştür. %10 HCl (hidroklorik asit) çözeltisiyle doldurulan silindirlerin burkulma yükleri, %5'lik çözeltiyle doldurulan silindirlerin burkulma yüklerinden daha düşük çıkmıştır.
- Deneysel ve teorik burkulma yükleri kıyaslandığında, teorik formüllerle bulunan burkulma yüklerinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu formüllerin korozyon etkisini de içerecek katsayılarla güncellenmesi gerekmektedir.
- Silindirlerde deneyler sonucunda oluşan dalga sayıları, teorik formüllerle elde edilen oluşabilecek yaklaşık dalga sayılarından daha düşük çıkmıştır.
- CFRP kaplaması yapılan silindirlerin burkulma yükünün önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Ayrıca silindirlerin CFRP ile güçlendirilen yüzey alanı büyüdükçe burkulma kapasitelerinin arttığı belirlenmiştir. 800-400-100 mm CFRP güçlendirmesi yapılan silindirler karşılaştırıldığında en yüksek burkulma kapasitesine sahip olan silindirin 800 mm CFRP ile kaplanan silindir olduğu görülmüştür. CFRP kaplaması silindirde oluşan şekil değişimlerini ve göçme hasarlarını azaltmıştır.
- Kısmi olarak CFRP uygulanan silindirler incelendiğinde, oldukça az kullanılsa bile CFRP uygulamasının dayanımı artırıcı etki yapabildiği görülmüştür.
- CFRP kaplaması yapılan silindirler burkulmaya karşı daha dirençli hale gelmiştir ve bunun sonucunda silindirlerde daha az dalga oluşmuştur. Korozyonsuz numuneler incelendiğinde CFRP kaplaması yapılan silindirde, CFRP'siz duruma göre daha az dalga oluştuğu gözlemlenmiştir.
- Silindirlerin burkulma deneyinde absorbe ettiği enerjiler incelendiğinde genel olarak CFRP ile kaplanan silindirlerin daha yüksek kapasitede enerji absorbe ettiği görülmüştür.

Diğer araştırmacılar için;

- Tanklarda oluşan korozyon hasarını azaltacak yöntemlerin araştırılması,
- Tankların burkulma kapasitesini geri kazanmak için daha farklı ve daha ekonomik güçlendirme yöntemlerinin uygulanması,
- Enerji absorbe kapasiteleleri açısından farklı güçlendirme yöntemlerinin incelenerek en uygun olanının araştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2021. <http://www.karadenizkorozyon.com/korozyon-cesitleri-nelerdir> (13.09.2021)
- Anoymous, 2020. <https://www.nitty-gritty.it/korozyon-sureci/?lang=tr> (13.03.2020).
- Aydın, A. C., Bayrak, B., Maali, M., Mete, E., Çebi, K. and Kılıç, M., 2021b. The shear and flexural behavior of cold-formed steel composite I and U beams. *Scientia Iranica*, 28 (4), 2119-2132.
- Aydın, A. C., Kılıç, M., Maali, M., Bayrak, B. and Tunç, E., 2021a. The Torsional and Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced RC Members. *Architecture Civil Engineering Environment*, 14 (2), 47-65.
- Aydın, A. C., Maali, M., Kılıç, M. and Sağıroğlu, M., 2015. Experimental investigation of sinus beams with end-plate connections. *Thin-Walled Structures* 97, 35–43.
- Aydın, A. C., Yaman, Z., Ağcakoca, E., Kılıç, M., Maali, M. and Dizaji, A. A., 2019. CFRP Effect on the Buckling Behavior of Dented Cylindrical Shells. *International Journal of Steel Structures*, 20 (2), 425-435.
- Becerra, H. Q., Retamoso, C. and Macdonald, D. D., 2000. The corrosion of carbon steel in oil-in-water emulsions under controlled hydrodynamic conditions. *Corrosion Science*, 42, 561-575.
- Chegeni, B., Jayasuriya, S. and Das, S., 2019. Effect of corrosion on thin-walled pipes under combined internal pressure and bending. *Thin-Walled Structures*, 143.
- Cinitha, A., Umesha, P. K. and Iyer, N. R., 2014. An overview of corrosion and experimental studies on corroded mild steel compression members. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (6), 1735-1744.
- Çakır, A. F., 2016. Korozyon: İnsanlık İçin Stratejik Öneme Sahip Tabii Bir Olay. *Metallurji*, 179, 35-40.
- Çelik, Ö., 2010. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Düşük Sıcaklık Nitritleme İşleminin Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çınar, M., 2020. Sülfürik asit korozyonuna uğramış ince cidarlı çelik tankların burkulma davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Deng, J., Li, J., Wang, Y. and Xie, W., 2018. Numerical study on notched steel beams strengthened by CFRP plates. *Construction and Building Materials*, 163, 622–633.
- Fatemi, S. M., Showkati, H. and Maali, M., 2013. Experiments on imperfect cylindrical shells under uniform external pressure. *Thin Walled Structures*, 65, 14-25.
- Ghazijahani, T. G., Jiao, H. and Holloway, D., 2015. Timber filled CFRP jacketed circular steel tubes under axial compression. *Construction and Building Materials*, 94, 791–799.
- Golzan, B.S. and Showkati, H., 2008. Buckling of thin-walled conical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 46, 516–529.
- Gutman, E. M., Bergman, R. M. and Levitsky, S. P., 2016. Influence of internal uniform corrosion on stability loss of a thin-walled spherical shell subjected to external pressure. *Corrosion Science*, 111, 212-215.

- Jawad, M. H., 1994. Theory and Design of Plate and Shell Structures. Chapman & Hall, 438p, UK.
- Kılıç, M., Maali, M., Bayrak, B., Çebi, K., Mete, E. and Aydın, A. C., 2020a. Behavior of Polypropylene Filled Cold Formed Steel Profiles – Part B: Torsion. *Civil Engineering Beyond Limits*, 1 (2), 7-11.
- Kılıç, M. and Çinar, M., 2020b. Buckling Behavior of Sulfate-Corroded Thin-Walled Cylindrical Steel Shells Reinforced with CFRP. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 10.1007/s40996-020-00494-7.
- Kong, X., Lv, J., Gao, N., Peng, X. and Zhang, J., 2018. An experimental study of galvanic corrosion on an underwater weld joint. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 84,63–68.
- Korucuk, F. M. A., Maali, M., Kılıç, M. and Aydın, A. C., 2019. Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 143, 106259.
- Landolfo, R., Cascini, L. and Portioli, F., 2010. Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report. *Sustainability*, 2 (7), 2163-2175.
- Li, A., Xu, S., Wang, H., Zhang, H. and Wang, Y., 2019. Bond behaviour between CFRP plates and corroded steel plates. *Composite Structures* 220, 221–235.
- Lugauskas, A., Bikulčius, G., Bučinskienė, D., Selskienė, A., Pakštas, V. and Binkauskienė, E., 2016. Long-time corrosion of metals (steel and aluminium) and profiles of fungi on their surface in outdoor environments in Lithuania. *CHEMIJA*, 27 (3), 135-142.
- Maali, M., Aydın, A. C. and Sağiroğlu, M., 2015. Investigation of innovative steel runway beam in industrial building. *Sādhana*, 40(7), 2239–2251.
- Maali, M., Aydın, A. C., Showkati, H., Fatemi, S. M. and Sağiroğlu, M., 2018b. Longitudinal Imperfections on Thin Walled Cylindrical Shells. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8, 1-10.
- Maali, M., Aydın, A. C., Showkati, H., Sağiroğlu, M. and Kılıç, M., 2018a. The effect of longitudinal imperfections on thin-walled conical shells. *Journal of Building Engineering*, 20, 424–441.
- Maali, M., Bayrak, B., Kılıç, M., Sağiroğlu, M. and Aydın, A. C., 2021. Buckling behavior of double-layered composite cylindrical shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191.
- Maali, M., Kılıç, M. and Aydın, A. C., 2016b. Experimental Model of the Behaviour of Bolted Angles Connections with Stiffeners. *International Journal of Steel Structures*, 16 (3), 719-733.
- Maali, M., Kılıç, M., Bayrak, B., Mete, E., Çebi, K. And Aydın, A. C., 2020. Behavior of Polypropylene Filled Cold Formed Steel Profiles – Part A: Bending Shear. *Civil Engineering Beyond Limits*, 1 (2), 1-6.
- Maali, M., Kılıç, M., Sağiroğlu, M. and Aydın, A. C., 2016a. Experimental model for predicting the semi-rigid connections' behaviour with angles and stiffeners. *Advances in Structural Engineering*, 20 (6), 884-895.
- Maali, M., Kılıç, M., Yaman, Z., Ağcakoca, E. and Aydın, A. C., 2019. Buckling and post-buckling behavior of various dented cylindrical shells using CFRP strips subjected to uniform external pressure: Comparison of theoretical and experimental data. *Thin-Walled Structures*, 137, 29–39.

- Manliza, C. W. M., 2003. A Critical Study on Corrosion and Corrosion Control Methods for Piping Systems in Hong Kong. Doctoral Dissertation, Department of Building Services Engineering The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
- Marcus, P., 2011. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. CRC Press, 941p, USA.
- Niloufari, A., Showkati, H., Maali, M. and Fatemi, S. M., 2014. Experimental investigation on the effect of geometric imperfections on the buckling and post-buckling behavior of steel tanks under hydrostatic pressure. *Thin Walled Structures*, 74, 59–69.
- Noor, E. A. and Al-Moubaraki, A., 2008. Corrosion behavior of mild steel in Hydrochloric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 3, 806-818.
- Patané, G., Proverbio, E. and Risitano, A., 2002. Corrosion induced failure of an air cylinder. *Engineering Failure Analysis*, 9, 481-487.
- Qiao, W., 2011. Water Pipeline Failures: Field Verification and Risk-Based Corrosion-Fracture Models. Doctoral Dissertation, Faculty of the Department of Civil and Environmental Engineering, Houston.
- Roberge, P. R., 2000. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill, 1128 p, USA.
- Ross, C.T.F., 2007. A proposed design chart to predict the inelastic buckling pressures for conical shells under uniform external pressure. *Marine Technology*, 44 (2), 77–81.
- Sağiroğlu, M., Maali, M., Aydın, A. C. and Kılıç, M., 2020. Moment-rotation behavior of semi-rigid web cleat connections. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 6 (3), 110-119.
- Schweitzer, P. A., 2010. Fundamentals of Corrosion. CRC Press, 430p, USA.
- Sharifi, Y. and Rahgozar, R., 2010a. Evaluation of the remaining shear capacity in corroded steel I-beams. *Advanced Steel Construction*, 6 (2), 803-816.
- Sharifi, Y. and Rahgozar, R., 2010b. Remaining moment capacity of corroded steel beams. *International Journal of Steel Structures*, 10 (2), 165-176.
- Singh R., P. R., 2014. Corrosion Control for Offshore Structures. Gulf Professional Publishing, 224 p, USA.
- Taraghi, P., Zirakian T. and Karampour, H., 2021. Parametric study on buckling stability of CFRP-strengthened cylindrical shells subjected to uniform external pressure. *Thin-Walled Structures* 161, 107411.
- Teng, J.G., and Hu, Y.M., 2007. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression. *Construction and Building Materials*, 21, 827–838.
- Teng, J.G., Yu, T. and Fernando, D., 2012. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 131–143.
- Teng, J.G., Zhao, Y. and Lam, L., 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions, *Thin-Walled Structures* 39, 685–707.
- Ventsel, E. and Krauthammer, T., 2001. Thin Plates and Shells: Theory: Analysis, and Applications. Marcel Dekker Inc., 688p, USA.
- Wang, Y., Xu, S., Wang, H. and Li, A., 2017. Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology. *Construction and Building Materials*, 152, 777-793.
- Zhao, Z., Liang, B., Liu, H. and Wu, X., 2018. Influence of Pitting Corrosion on the Bending Capacity of Thin-Walled Circular Tubes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40:548.

Zhao, Z., Zheng, C., Zhang, J., Liang, B. and Zhang, H., 2021. Influence of random pitting corrosion on moment capacity of thin-walled circular tubes subjected to compression force. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189, 104260.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Mahmut Buğra BİLEN
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Tevfik İleri Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2015-2018)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı (2021)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	