



**KOROZYONA UĞRAYAN TANKLARIN  
BURKULMA KAPASİTESİNİN  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Harun TİZİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**2024  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KOROZYONA UĞRAYAN TANKLARIN BURKULMA KAPASİTESİNİN**  
**DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Harun TİZİ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**Ana Bilim Dalı: İnşaat Mühendisliği**

**Erzurum**

**2024**

**Her hakkı saklıdır**

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

15 / 02 / 2024

Harun TİZİ

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KOROZYONA UĞRAYAN TANKLARIN BURKULMA KAPASİTESİNİN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Harun TİZİ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI

Çelik elemanların çeşitli güçlendirme yöntemleri ile yapısal bütünlüklerini koruma esasları üzerinde yapılan araştırmalar son zamanlarda da devam etmektedir. Günümüzde çelik elemanlarının güçlendirilmesinde CFRP (Karbon fiber takviyeli polimer) kullanımı hızla yaygınlaşmakta olup birçok deneysel çalışmanın da konusu olmaya devam etmektedir. Bu deneysel çalışmada farklı oranlı hidroklorik asit çözeltileriyle doldurulan ve korozyona uğraması sebebiyle burkulma dayanımında azalma olan ince cidarlı silindirik çelik tanklarda, CFRP ile yapılan güçlendirmenin burkulma dayanımına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 6 adet ince cidarlı silindirik çelik tank numunesi deneye tabi tutulmuştur. Silindir numuneleri 400 mm boyunda ve 400 mm çapında olup, 0,45 mm kalınlık değerine sahiptirler. Bu deney numunelerinden korozyonsuz olarak burkulma deneyi gerçekleştirilen iki numuneden birisinde CFRP kullanılmamış olup, diğer numune CFRP kumaş ile kaplanmıştır. Geri kalan dört numune ise korozyona tabi tutulmuştur. Korozyonlu bu dört numuneden iki adet numune %2,5 oranında, diğer 2 adet numune ise %5 oranında hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. %2,5 oranında korozyona maruz kalan numunelerden birisine ve %5 oranında korozyona maruz kalan numunelerden birisine CFRP uygulaması yapılmıştır. 6 deney numunesi üzerinde gerçekleştirilen burkulma deneyleri sonucu elde edilen deney verileri literatürde teorik olarak hesaplanan Ross, Jawad ve Ventsel ve Krauthammer teorileriyle karşılaştırılmıştır. Burkulma deneyleri sonucunda, hidroklorik aside maruz kalmasından dolayı korozyona uğrayan ve burkulma dayanımlarında düşüş olan silindir numunelerde CFRP takviyesi yapıldığında burkulma dayanımlarında ciddi bir oranda iyileşme gözlemlenmiştir.

**2024, 59 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** İnce cidarlı çelik tank, Burkulma kapasitesi, Korozyon, CFRP, Hidroklorik asit, Deneysel inceleme

## **ABSTRACT**

MS. Thesis

# **INVESTIGATION OF BUCKLING CAPACITY BEHAVIORS OF CORRODED TANKS**

Harun TİZİ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahyar MAALI

Research on the principles of preserving the structural integrity of steel elements through various strengthening methods continues to be a topic of interest. The use of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) in strengthening steel elements has rapidly become widespread, with many experimental studies focusing on this topic. In this experimental study, the effect of strengthening with CFRP on the buckling strength of thin-walled cylindrical steel tanks subjected to corrosion-induced reduction in buckling strength, filled with different ratio hydrochloric acid solutions, was investigated. Six samples of thin-walled cylindrical steel tanks were tested. The cylindrical specimens are 400 mm in height and diameter, with a thickness of 0,45 mm. Among these test specimens, one was subjected to buckling test without CFRP, while the other was covered with CFRP fabric. The remaining four specimens were subjected to corrosion. Two of the corroded specimens were exposed to a 2,5% hydrochloric acid solution, while the other two were exposed to a 5% solution. CFRP application was applied to one specimen exposed to 2,5% corrosion and one exposed to 5% corrosion. The experimental data obtained from the buckling tests conducted on the six test specimens were compared with the Ross, Jawad, and Ventsel and Krauthammer theories calculated theoretically in the literature. As a result of the buckling tests, a significant improvement in the buckling strength was observed when CFRP reinforcement was applied to the cylindrical specimens subjected to corrosion-induced reduction in buckling strength due to exposure to hydrochloric acid.

**2024, 59 Page**

**Keywords:** Thin-walled steel tanks, Buckling capacity, Corrosion, CFRP, Hydrochloric acid, Experimental investigation

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışması yapmama imkân sağlayan, tez çalışmam süresince hiçbir yardımını esirgemeyen ve her daim arkamda duran değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALİ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarında desteğini ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Araştırma Görevlisi Mahmut Buğra BİLEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bütün çalışma süresince gece gündüz hiçbir yardımını esirgemeyen değerli kardeşim ve meslektaşım Yasin TİZİ'ye teşekkürlerimi, sevgilerimi ve övgülerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışması yapmam konusunda her daim yanımda olan eşim Seda TİZİ'ye destek ve sabrından dolayı teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen anneme ve babama teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

**Harun TİZİ**  
**Şubat 2024**

## İÇİNDEKİLER

|                                                            | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>ÖZET</b> .....                                          | i            |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                      | ii           |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                      | iii          |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                   | iv           |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....                       | vi           |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                               | vii          |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                             | viii         |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                      | 1            |
| 1.1. Çelik Tanklarda Burkulma .....                        | 1            |
| 1.1.1. Burkulmanın çelik tanklar üzerindeki etkileri ..... | 1            |
| 1.2. Çelik Tanklarda Korozyon .....                        | 2            |
| 1.2.1. Korozyon çeşitleri .....                            | 2            |
| 1.2.2. Korozyonun çelik tanklar üzerindeki etkileri .....  | 3            |
| 1.3. Çelik Tankların CFRP ile Güçlendirilmesi .....        | 4            |
| 1.4. Yapılacak Çalışmanın Amacı .....                      | 4            |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....                            | 5            |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                         | 21           |
| 3.1. Deneysel Çalışmalar .....                             | 21           |
| 3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler .....                   | 23           |
| 3.2.1. Hidroklorik asit .....                              | 23           |
| 3.2.2. Foamboard levha .....                               | 23           |
| 3.2.3. LVDT cihazı .....                                   | 23           |
| 3.2.4. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kumaş .....   | 24           |
| 3.2.5. Veri toplama cihazı (Data logger) .....             | 25           |
| 3.2.6. Lazerli ölçüm cihazı .....                          | 26           |
| 3.3. Deneylerin Yapılışı .....                             | 26           |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....            | 32           |
| 4.1. Korozyon Sonrası Tank Değerleri .....                 | 32           |
| 4.2. Burkulma Deneyi Sonucu Tank Burkulma Değerleri .....  | 33           |
| 4.3. Korozyonsuz Grup Numune Değerleri .....               | 34           |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.1. Korozyonsuz ve CFRP'siz deney numunesi (Exp1-P) .....            | 34        |
| 4.3.2. Korozyonsuz ve CFRP'li deney numunesi (Exp2-CFRP).....           | 36        |
| 4.4. Korozyonlu Grup Numune Değerleri.....                              | 37        |
| 4.4.1. %2,5 Korozyonlu ve CFRP'siz deney numunesi (Exp3-%2,5-P).....    | 38        |
| 4.4.2. %2,5 Korozyonlu ve CFRP'li deney numunesi (Exp4-%2,5-CFRP) ..... | 39        |
| 4.4.3. %5 Korozyonlu ve CFRP'siz deney numunesi (Exp5-%5-P).....        | 41        |
| 4.4.4. %5 Korozyonlu ve CFRP'li deney numunesi Exp6-%5-CFRP).....       | 43        |
| 4.5. Deney Verilerinin Teorik Formülasyonlarla Karşılaştırılması .....  | 45        |
| 4.5.1. Korozyonsuz grup numunelerinin karşılaştırılması .....           | 48        |
| 4.5.2. Korozyonlu grup numunelerinin karşılaştırılması .....            | 49        |
| <b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>                                        | <b>52</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                  | <b>54</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler</u></b> | <b><u>Açıklama</u></b> |
|------------------------|------------------------|
| %                      | Yüzde                  |
| FeSO <sub>4</sub>      | Demir(II) sülfat       |
| <i>g</i>               | Gram                   |
| HCl                    | Hidroklorik asit       |
| kPa                    | Kilopaskal             |
| mm                     | Milimetre              |

### **Kisaltmalar**

|      |                                             |
|------|---------------------------------------------|
| ASCE | Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği        |
| CFRP | Karbonfiber takviyeli polimer               |
| FRP  | Lifli polimer                               |
| LVDT | Doğrusal değişken deplasmanlı transformatör |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Deney düzeneği.....                                                       | 22 |
| Şekil 3.2. Silindir deney numunesi .....                                             | 22 |
| Şekil 3.3. LVDT ölçüm cihazı .....                                                   | 24 |
| Şekil 3.4. CFRP kumaş .....                                                          | 25 |
| Şekil 3.5. Veri toplama cihazı (Data logger) .....                                   | 25 |
| Şekil 3.6. Lazerli ölçüm cihazı .....                                                | 26 |
| Şekil 3.7. Geometrik düzensizlik ölçüm işleminde kullanılan düzenek .....            | 26 |
| Şekil 3.8. Deney numunesi yüzeyinden geometrik düzensizlik ölçüm işlemi.....         | 27 |
| Şekil 3.9. Belli H yüksekliklerinde ölçülen geometrik düzensizlik değerleri.....     | 28 |
| Şekil 3.10. (a) Numunenin silikonla yerleştirilmesi (b) asidin numuneye doldurulması | 29 |
| Şekil 3.11. Numunelere CFRP kaplama işlemi .....                                     | 30 |
| Şekil 3.12. Deney düzeneğinin kurulması.....                                         | 31 |
| Şekil 4.1. Numunenin düzeneğe bağlanması .....                                       | 33 |
| Şekil 4.2. Exp1-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....                         | 35 |
| Şekil 4.3. Burkulma deneyi sonrası Exp1-P numunesi.....                              | 35 |
| Şekil 4.4. Exp2-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği .....                     | 36 |
| Şekil 4.5. Burkulma deneyi sonrası Exp2-CFRP numunesi .....                          | 37 |
| Şekil 4.6. Exp3-%2,5-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği .....                   | 38 |
| Şekil 4.7. Burkulma deneyi sonrası Exp3-%2,5-P numunesi .....                        | 39 |
| Şekil 4.8. Exp4-%2,5-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği .....                | 40 |
| Şekil 4.9. Burkulma deneyi sonrası Exp4-%2,5-CFRP numunesi.....                      | 41 |
| Şekil 4.10. Exp5-%5-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği .....                    | 42 |
| Şekil 4.11. Burkulma deneyi sonrası Exp5-%5-P numunesi .....                         | 43 |
| Şekil 4.12. Exp6-%5-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği .....                 | 44 |
| Şekil 4.13. Burkulma deneyi sonrası Exp6-%5-CFRP numunesi.....                       | 45 |
| Şekil 4.14. Teorik formülasyonlara göre kritik burkulma değerleri .....              | 47 |
| Şekil 4.15. Korozyonsuz grup burkulma değerleri .....                                | 49 |
| Şekil 4.16. Korozyonsuz grup burkulma değerlerinin karşılaştırılması.....            | 49 |
| Şekil 4.17. Korozyonlu grup burkulma değerleri.....                                  | 50 |
| Şekil 4.18. Korozyonlu grup burkulma değerlerinin karşılaştırılması.....             | 51 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Kullanılan hidroklorik asidin özellikleri.....             | 23 |
| Çizelge 4.1. Deney numuneleri.....                                      | 32 |
| Çizelge 4.2. Korozyonlu deney numuneleri ağırlık değişim oranları ..... | 33 |
| Çizelge 4.3. LVDT aletlerinin konumları .....                           | 34 |
| Çizelge 4.4. Korozyonsuz deney numunelerinin isimleri .....             | 34 |
| Çizelge 4.5. Exp1-P burkulma değerleri.....                             | 35 |
| Çizelge 4.6. Exp2-CFRP burkulma değerleri .....                         | 36 |
| Çizelge 4.7. Korozyonlu deney numunelerinin isimleri .....              | 38 |
| Çizelge 4.8. Exp3-%2,5-P burkulma değerleri .....                       | 39 |
| Çizelge 4.9. Exp4-%2,5-CFRP burkulma değerleri.....                     | 40 |
| Çizelge 4.10. Exp5-%5-P burkulma değerleri .....                        | 42 |
| Çizelge 4.11. Exp6-%6-CFRP burkulma değerleri.....                      | 44 |
| Çizelge 4.12. Numunelerde hesaplanan kritik burkulma değerleri.....     | 46 |
| Çizelge 4.13. Numunelerde hesaplanan dalga sayıları.....                | 48 |

### 1. GİRİŞ

Endüstriyel alanda çelik yaygın olarak kullanılmaktadır. Depolama, taşıma ve üretim süreçlerinde birçok alanda önemli rol oynamaktadırlar. Günümüzde, bir elemanın kesitini oluşturan çelik plakalar, çeliğin mekanik özelliklerinden tam olarak yararlanabilmek amacıyla genellikle geniş ve ince malzeme olarak kullanılmaktadırlar, ancak; genişlik/kalınlık oranı ne kadar büyük olursa, yerel burkulmanın kritik burkulma gerilmesi o kadar düşük olmakta ve bu da burkulma sonrasında elemanın yük taşıma kapasitesinde azalmasına sebebiyet vermektedir (Zhang et al. 2020). Dairesel silindir çelik kabukların hafif olmasının yanında mukavemet değerinin yüksek olması, bu malzemelerin inşaat sektöründe birçok alanda kullanılmasına neden olmuştur. İnce cidarlı silindirik elemanlar tanklarda, silolarda ve uzay rampaları gibi çok sayıda uygulamada yaygın olarak kullanılmakta; dolayısıyla doğru bir tasarımla, belirli yükleme koşulları altında meydana gelebilecek ve yapının deformasyonuna neden olabilecek burkulma olaylarına dikkat edilmesi gerekmektedir (Mathon and Limam 2005).

#### 1.1. Çelik Tanklarda Burkulma

İnce cidarlı elemanlarda sık görülen durumlardan birisi burkulmadır ve burkulma mukavemeti tankın geometrik özelliklerine, kullanılan malzemenin özelliklerine (izotropik, kompozit, vs.), uygulanan yükün türüne (eksenel basınç, burulma, vs.), sınır koşullarına ve başlangıç kusurları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Taraghi et al. 2019). Bu olayın etkileri, maddi hasara, çevresel kirliliğe ve hatta insan sağlığına zarar verme potansiyeli taşımaktadır.

##### 1.1.1. Burkulmanın çelik tanklar üzerindeki etkileri

Burkulmanın çelik tanklar üzerindeki etkileri ele alındığında bunları maddi hasar, çevresel kirlilik, insan sağlığına etkileri, iş güvenliği riskleri ve yasal sorumluluk etmenleri gibi durumlar üzerinden incelenebilir. Burkulma sonucu tankların deformasyona uğraması veya çatlaması, maddi hasara neden olmakla birlikte depolanan sıvıların sızmasına neden olacağı kaçınılmazdır. Bu durum, çevreye veya işletme sahasına ciddi zarar verir ve maliyetli onarımlar gerektirebilmektedir. Sızan kimyasal maddelerin

çevreye yayılması toprak kirliliği, su kirliliği ve hava kirliliği gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Tanklardaki deformasyon sonucu dışarı sızan kimyasallar veya gazlar, solunum yoluyla veya temas yoluyla insanlara zarar verebilmektedir. Ayrıca koruma yasalarına ve güvenlik düzenlemelerine uymayan işletmeler, ciddi para cezalarıyla karşı karşıya kalabilmektedirler.

Sonuç olarak çelik tanklarda burkulma olayları, ciddi sonuçlara yol açabilecek önemli bir endüstriyel sorun olarak görülmektedir. Bu nedenle, bu tür olayların önlenmesi endüstriyel işletmeler için hayati bir gerekliliktir.

### 1.2. Çelik Tanklarda Korozyon

Korozyon, çelik yapıların ömrü üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Çelik malzemeler, büyük ve küçük ölçekli endüstriyel işlemlerde ve geniş çapta uygulama alanları olması sebebiyle, asitler ve bazlar gibi birçok agresif çözeltilerle sıklıkla temas etme eğiliminde olmalarından dolayı büyüklükleri çözeltilerin veya ortamın konsantrasyonuna, maruz kalma süresine ve sıcaklık koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlı olan korozyona uğramaya yatkındırlar. (Usman et al. 2016).

Çelik bir yapının korozyon nedeniyle tahrip olması, yapının sertliğini ve davranışını değiştirebilmekle beraber, elemanların akmasına veya burkulmasına da neden olabilmektedir (Sharifi and Rahgozar 2010).

#### 1.2.1. Korozyon çeşitleri

Farklı malzeme ve ortamlarda meydana gelebilecek çeşitli korozyon türleri vardır. Bazı yaygın korozyon türleri arasında yer alan korozyonlar aşağıda belirtilmiştir;

- Genel (uniform) korozyon
- Galvanik korozyon
- Çukur korozyon
- Çatlak korozyonu
- Erozyonlu korozyon

## 1. GİRİŞ

---

Genel korozyon, yüzeyin genelinde benzer bir hızda gerçekleşen ve metali homojen bir şekilde aşındıran korozyon çeşididir.

Galvanik korozyon, ortak bir elektrolit içinde iki farklı metalin bulunması veya birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan korozyon çeşididir. Kimyasal tepkime sonucunda bir metal diğerine göre daha hızlı bir şekilde aşınır.

Çukur korozyon, malzemenin yüzeyinde çukurların oluşmasına yol açan lokal korozyon oluşma durumudur. Çukur korozyonunun ileri seviyesinde malzemede aşınma sonucu delinmeler gözlemlenebilmektedir.

Çatlak korozyonu, çelik yüzeyinin belirli bölgelerinde oksijen ve nemin sınırlı hareketi sonucu korozyona uğramasıdır. Özellikle metal parçaların birbirine temas ettiği veya kapatıldığı bölgelerde oluşabilmektedir.

Erozyonlu korozyon, korozyon ve mekanik aşınmanın birleşik etkisidir; bu korozyon sürecinde malzemede korozyon ve mekanik faktörlerin sinerjik etkisi nedeniyle bozulma gözlemlenir.

### 1.2.2. Korozyonun çelik tanklar üzerindeki etkileri

Çelik tankların kullanımına göre çoğu kez korozyona maruz kalması sonucu ömürlerini önemli ölçüde azaldığı bilinmektedir. Çelik tanklar üzerinde korozyonun etkileri ele alındığında ise bunlar malzemenin zayıflaması, üründe kalite kaybı, bakım maliyetlerinde artış, güvenlik riskleri ve çevresel tehlikeler olarak incelenebilmektedir. Korozyona maruz kalan çelik, zaman içinde delinmelere veya çatlamalara neden olarak sızıntılara yol açabilmektedir. Ayrıca çelik tanklarda saklanan sıvı veya gaz ürünler, tanklarda oluşan korozyon ile reaksiyona girerek kimyasal değişikliklerle yol açabilmekte ve bu da ürünlerin kontaminasyonuna ve kalite kaybına neden olabilmektedir. Korozyona karşı tankları korumak için periyodik bakım ve onarımlar gereklidir. Bu bakım işlemleri ek maliyetler doğurmakta ve işletme maliyetlerini artırmaktadır. Korozyonun çelik eleman üzerinde zamanla yayılması, tankların yapısal bütünlüğünü tehdit etmekte ve işçi güvenliği açısından büyük risk oluşturabilmektedir. Korozyon sonucu meydana

gelebilecek sızıntılar, toprak ve su kirliliğine yol açabilmektedir. Bu çevresel tehlikeler, doğal kaynaklara zarar verir ve çevre düzenlemelere uymayan işletmelere ciddi cezalar getirebilir.

### 1.3. Çelik Tankların CFRP ile Güçlendirilmesi

Günümüzde çelik yapı elemanlarının güçlendirilmesinde CFRP (Karbon fiber takviyeli polimer) kullanımı yaygınlaşmaya devam etmekte olup, birçok deneysel çalışmanın da konusu olmuştur. Konik silindir ince cidarlı çelik tanklarda CFRP uygulanması burkulma mukavemetini artırır ve kritik bölgedeki deformasyonlarını sınırlandırmaktadır (Taraghi et al. 2020). Yangın sonrası hasar görmüş silindirik tanklarda CFRP kullanılmasıyla, burkulma ve burkulma sonrası davranışını iyileştirebilmektedir (Maali and Kilic 2020). Ayrıca dent çizgilerine sahip ince cidarlı çelik tanklarda da CFRP uygulanmasının tankın burkulma dayanımını olumlu şekilde artırmaktadır (Aydin et al. 2019). Bu sebeple CFRP malzemesinin ince cidarlı çelik elemanlar üzerindeki olumlu etkileri doğrultusunda, ince cidarlı çelik elemanlarda CFRP kullanılması burkulma dayanımını iyileştirmesi beklenmektedir.

### 1.4. Yapılacak Çalışmanın Amacı

Bu deneysel çalışmada %2,5 ve %5 olmak üzere iki farklı oranda hidroklorik asit çözeltileri kullanılarak farklı korozyon miktarlarına uğramış olan ince cidarlı silindirik çelik tanklarda, CFRP ile yapılan güçlendirmenin burkulma dayanımına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Ayrıca deney sonucu elde edilen veriler, literatürde bulunan formülasyonlar ile kıyaslanarak yeterliliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Aghajari et al. (2006) çalışmalarında değişken kalınlığa sahip ince cidarlı çelik silindirik kabukların düşey dış basınca maruz kalma durumundaki burkulma ve sonrasındaki davranışını incelemişlerdir. Deneysel çalışma için, değişken kalınlığa sahip dört farklı silindirik çelik kabuk numunesini çökme testine tabi tutmuşlardır. Ayrıca, değişken kalınlığa sahip ince cidarlı çelik kabukların davranışının sonlu elemanlar modellemesini detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Çalışma sonucunda, ince cidarlı çelik silindirik kabukların burkulma ve sonrasındaki davranışını incelemek için doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinin güvenilir olduğunu saptamışlardır. Ayrıca, kalınlık varyasyonunun genel burkulma aşamasındaki nihai dalgalanmanın bölgesine doğrudan etkisi olduğunu bulmuşlardır. Daha az kalınlık varyasyonuna sahip kabukların kullanılmasını önermişlerdir.

Aydin et al. (2019) çalışmalarında farklı dent derinlikleri ve dent çizgilerine sahip ince cidarlı çelik silindirik kabukların burkulma davranışı incelemişler ve CFRP kullanımının burkulma yükleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dent derinliği ve dent çizgisinin kabukların burkulma kapasitesini etkilediğini ve CFRP kullanımının burkulma dayanımını artırıcı bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Deneysel ve teorik analizler arasındaki karşılaştırmada, teorik olarak tahmin edilen burkulma dalgalarının deneysel olarak gözlemlediklerinden daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, verilen katsayıların kullanılmasıyla pratik bir tasarım aracı oluşturmuşlar ve burkulma yüklerinin tahmin edilmesi için bu katsayıların kullanılmasını önermişlerdir.

Aydin et al. (2021) çalışmalarında 800x400x0,45 mm boyutlarına sahip dört ince cidarlı çelik tankı, farklı oranlarda HCl (hidroklorik asit) içeren asit çözeltisiyle doldurmuşlar ve 24 saat boyunca korozyona maruz bırakmışlardır. Korozyon nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybını belirlemişler ve bu ağırlık kaybının tankların burkulma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tankların doldurma oranının ve çözeltideki asit yüzdesinin artmasıyla, korozyon hasarı ve dolayısıyla burkulma hasarının arttığını tespit etmişlerdir. Daha fazla korozyon hasarına sahip tanklarda burkulma dalgalarının sayısının arttığını gözlemlemişlerdir.



Aydin et al. (2021) yaygın olarak kullanılan ince cidarlı silindirik kabukların, düşük pH'lı sıvılarla doldurulduğunda maruz kaldığı korozyonun, kabukların burkulma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, korozyonun ince cidarlı silindirik kabukların burkulma kapasitesini önemli ölçüde azaltabileceğini gözlemlemişlerdir. Asit oranı, dolum oranı ve CFRP malzeme ile kapladıkları yüzey alanının, silindirlerin burkulma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği belirtmişler, silindirleri bir katman CFRP ile kaplamanın burkulma kapasitesi kaybını hafiflettiğini belirtmişlerdir.

Aydin et al. (2023) CFRP ile güçlendirilmiş çelik silindirik kabukların hidrostatik basınç altında başarısızlığını incelemişlerdir. 12 farklı silindirik kabuk için deneysel testler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonlar yapmışlardır. Çalışma sonucunda çukur sayısı ve derinliğinin burkulma dayanımını olumsuz etkilediğini, ancak CFRP'lerin kritik burkulma dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir. Böylece CFRP'lerin onarımda etkili bir güçlendirme olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bambach et al. (2009) yapmış oldukları çalışmada G450 çeliğinden soğuk şekillendirilmiş kısa ve eksenel olarak sıkıştırılmış olan SHS kesitler üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. CFRP uygulanmasının ince kesitlerde yerel burkulmayı geciktirdiğini ve sonuç olarak basınç elemanlarının elastik burkulma gerilimini, eksenel kapasiteyi ve ağırlık mukavemet oranını artırdığını göstermişlerdir.

Batikha et al. (2009) fil ayağı burkulmasına (elephant's foot buckling) karşı silindirik kabukları güçlendirmek için bir yöntem sunmuşlardır. Bahsettikleri yöntemde, kritik bir noktada kullanmış oldukları bir miktar FRP kompozit malzemenin burkulma dayanımını artırabileceğini belirtmişlerdir. Bu ön çalışmalarında güçlendirilmiş kabuğu doğrusal elastik eğilme teorisini kullanarak analiz etmişler, bu araştırma kapsamında güçlendirme etkisinin FRP levhanın kalınlığına, yüksekliğine ve konumuna bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Beaulieu et al. (2010) korozyona uğramış çelik köşebent elemanlarının basınç yükü altındaki yapısal davranışı hakkında veri sağlamak amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hızlandırmış oldukları bir prosedürle korozyona maruz bıraktıkları

16 adet ve korozyona uğramamış 8 adet köşebent elemanını basınç yükü altında test etmişlerdir. Deneysel programın sonucunda elemanın ortalama kalan kalınlığına ve ASCE 10-97 standardına dayanan bir tahmin yöntemini kullanılmasıyla, korozyona uğramış bir köşebent çelik elemanın kapasitesini tahmin etmenin mümkün olabileceğini açıklamışlardır.

Bhetwal and Yamada (2012) ince cidarlı çelik silindirik kabuklarda eksenel basınç altında burkulmayı engellemek için her iki tarafından kaplamış oldukları bir miktar FRP kompozit malzeme kullanarak burkulma dayanımının artırılması amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kusurlara bağlı olarak burkulma modlarının ve burkulma yük taşıma kapasitesinin farklılık gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Burkulma yükü taşıma kapasitesinin küçük genlikler için yüksek olduğunu ancak bu miktarın benimsemiş oldukları donatının kalınlığına göre değişeceğini açıklamışlardır. Ayrıca bu değişimlerin yakın zamanda geliştirilen azaltılmış sertlik yönteminden elde edilen sonuçlarla ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bunlara ek olarak, ince silindirik kabukların burkulma yükü taşıma kapasitesinin, doğrusal ve azaltılmış sertlik analizleri ile incelendiklerinde CFRP takviyesi ile arttığını, CFRP donatı kalınlığının 2 mm olması durumunda burkulma taşıma kapasitesinin %60 değerinden %70 değerine çıktığını gözlemlemişlerdir.

Bisagni (2000) yaptığı çalışmada karbon fiber takviyeli plastik silindirik kabukların eksenel basınç altında burkulma ve burkulma sonrası davranışını ele almıştır. Sonlu eleman analizi kullanmış; özdeğer analizi, doğrusal olmayan Riks yöntemi ve dinamik analiz olmak üzere üç farklı analiz türünü karşılaştırmıştır. Deney sonucunda silindir şeklinin burkulma anından burkulma sonrası anına kadar olan değişimini takip etme ve deneysel burkulma sonrası davranışını başarılı bir şekilde yeniden üretme yeteneğinin güvenilirliğini göstermiştir.

Bisagni and Cordisco (2003) dört adet rijit olmayan ince cidarlı CFRP silindirik kabuğun burkulma ve burkulma sonrası davranışı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda, burkulma yüklerinin yükleme sırasından bağımsız olduğunu ve kabukların hasar olmadan burkulma sonrası alanda yük taşıyabilme yeteneği olduğunu izah etmişlerdir. Ölçmüş oldukları verilerin, analitik ve sayısal modellerin geliştirilmesi ve doğrulanması için temel oluşturduğunu; daha büyük bir yapı ağırlığından tasarruf amacı

ile burkulma sonrası alanda kompozit silindirik kabukların uygulanabilir mukavemet tasarım kriterlerinin tanımlanmasına katkıda bulunduğunu açıklamışlardır.

Chegeni et al. (2019) deneysel ve sayısal yöntemleri kullanarak, korozyon derinliği ve korozyon şeklinin, birleşik iç basınç ve 4 noktalı bükülme yüküne maruz kaldığında korozyonlu ince cidarlı çelik boruların performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Korozyon derinliğinin arttırılmasının, korozyona uğramış numunelerin eğilme kapasitesini büyük ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca dairesel ve kare korozyon şekillerine sahip numunelerin aynı eğilme davranışını sergilediğini; korozyonun boru cidarının çevresel yönü boyunca uzatılmasının numunenin eğilme davranışı üzerinde olumsuz etkiye neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Cinitha et al. (2014) korozyonun türlerini, formlarını ve korozyon derinliğini tanımlamak için kullanılan çeşitli korozyon modellerini incelemişlerdir. Korozyon hızının deniz, endüstriyel, kentsel ve kırsal çevrelerle değişen alana özgü bir özellik olduğunu vurgulamışlardır. Ek olarak, korozyonun metal kalınlığının azalmasına ve ardından ağırlık kaybına neden olduğunu ve mekanik mukavemetin azalmasına yol açtığını izah etmişlerdir. Şiddetli korozyona uğramış örneklerde mukavemet özelliklerinde ciddi düşüşler gerçekleştiğini, açılı ve tübüler örnekler üzerinde yapılan basınç testlerinde korozyonun konumunun ve metal kaybının yapısal davranış üzerinde önemli bir etkisi olduğunu açıklamışlardır.

De Paor et al. (2012) çalışmalarında düzgün dış basınca maruz kalan ince silindirik kabukların burulma kapasitesi üzerindeki geometrik kusurların etkisini incelenmektedirler. Kabuk yüzeyinin geometrik kusurlarını ölçmek için küçük ölçekli ince cidarlı silindir numuneler üzerinde geometrik incelemeler yapmışlardır. Bu kusurları daha sonra sonlu elemanlar analizinde modellemeye dahil etmişlerdir ve geometrik olarak doğrusal olmayan bir statik analiz gerçekleştirmişlerdir. Silindirleri laboratuvarında çökme testine tabi tutmuşlardır ve sonuçları sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar analizinin, çökme basıncını ve çökme sonrası mod şeklini doğru bir şekilde tahmin ettiğini tespit etmişlerdir.

Dizaji et al. (2020) çalışmalarında vakum yüklemesine maruz kalan ince cidarlı silindirik tanklarda CFRP sarmallarının, çökme derinliği ve çökme uzunluğu gibi faktörler üzerindeki etkilerini incelemiştir. CFRP kullanımının başlangıç burkulma yükünü artırdığını ve genel burkulma yükünü etkilediğini gözlemlemiştir. Teorik hesapların deneysel sonuçların altında kaldığını tespit etmiştir. Tüm numunelerin çökmesinin V şeklinde olduğunu, ancak CFRP kullanılan modellerde dalgaların dentsiz bölgelerde oluştuğunu gözlemlemiştir. İnce cidarlı tankların tasarımında CFRP kullanımının önemini vurgulamışlardır ve daha hassas tahminler için teorik hesaplamalara ihtiyaç olduğunu tespit etmiştir.

Draidi et al. (2018) çalışmalarında metal silindirik kabuklarda CFRP kompozit tabakanın burkulma davranışına etkisini değerlendirmiştir. Kompozit tabakanın kullanımıyla taşıma kapasitesinde artış gözlemlemiştir ve bu sonuçları sayısal modelle doğrulamıştır. Sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kabuklarda deneysel ve sayısal sonuçlar arasında uyum tespit etmiştir. Elde ettikleri bulgularda, tasarım için sonlu eleman simülasyonunun kullanılabileceğini gözlemlemiştir.

Elchalakani (2016) çalışmasında karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) kullanılarak rehabilite edilen paslanmış çelik dairesel boş kesitlerin (CHS) deneysel sonuçlarını sunmuştur. Çalışmada paslanmanın seviyesini, CFRP levhalarının türünü ve sayısını incelemiştir. Mukavemetteki yüzde artışının en çok korozyon seviyesinden etkilenmiş olduğu, duvar kalınlığındaki en şiddetli %80 korozyon için elde ettikleri maksimum kazancın %282 olduğunu gözlemlemiştir. Yük taşıma kapasitesindeki ortalama artışı ise %97 olarak bulmuştur. Çıplak ve onarılmış CHS'nin mukavemetini tahmin etmek için çıplak ve kompozit bölüm özelliklerine dayalı iki yeni tasarım denklemi geliştirmiştir.

Fakhim et al. (2009) çalışmalarında silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışı üzerinde kalınlık değişimleri ve geometrik kusurların etkisini deneysel olarak incelemiştir. Silindirik test numunelerinin üstüne konik bir çatı eklemişler ve alt kısımlarını basit mesnetli olarak dizayn etmiştir. Ölçmüş oldukları verileri ve elde ettikleri sonuçları, hidrostatik dış basınç etkisi altındaki numuneler için raporlamıştır. Her numunenin uzunluğu boyunca farklı kalınlık değişimine sahip olduğunu

açıklamışlardır. Test ettikleri kabukların narinlik parametrelerini uzunluğun çapa oranı 2, 1 ve 0.5; çapın kalınlığa oranı 500 ve 600 olarak ifade etmişlerdir. Ayrıca çevresel ve dikey kaynak hattının burkulma mukavemeti ve mod şekilleri üzerinde etkisi olduğunu doğrulamışlardır.

Fatemi et al. (2007) çalışmalarında ince cidarlı silindirik kabuklarda kaynak sebebiyle oluşan geometrik kusurların burkulma davranışını incelemişlerdir. Kusurların derinliğinin artmasıyla kabukların burkulma kapasitesinin azaldığını, özellikle uzunlamasına kusurlarda bu etkinin daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, büyük H/R oranına sahip numunelerde kusurların etkisinin daha belirgin olduğunu ve 8t kusurlu numunelerin 4t kusurlu numunelere göre daha fazla dalga oluşturduğu gözlemlemişlerdir (H: Yükseklik, R: Yarıçap, t: Kalınlık). Kusurun konumu ve derinliği yapı davranışını etkilerken, başlangıç burkulma yükünün tasarım açısından büyük öneme sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Fazlalipour et al. (2022) araştırmalarında, ince çelik silindirik kabukların eksenel ve düzenli periferik basınç altındaki etkileşimli tepkisini incelemişlerdir. Deneysel bir yöntem kullanarak diğer çalışmaların teorik analizleri ve tasarım standartları ile karşılaştırmışlardır. Örnekleri tasararlarken geometrik değişken olarak kalınlık değişimini uygulamışlardır. Tüm örneklerde sabit bir ön yük uygulamışlar ve ardından basıncı artırarak burkulma ve çökme gözlemlemişlerdir. Değişken kalınlıklara sahip kabukların kapasitesinde narinlik faktörünün önemini gözlemlemişlerdir. Daha düşük narinlik değerlerine sahip kabukların, daha kararlı bir burkulma sonrası tepki gösterdiğini, bazı örneklerde kütle artışının önemli bir kapasite artışına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

El- Mahdy et al. (2019) çalışmalarında çelik yapıların güçlendirilmesi için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhaların kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Özellikle, paslanmış çelik yapıların güçlendirilmesi gereken agresif çevrelerdeki durumları ele almaktadırlar. CFRP levhaların çelik yüzeyle olan bağının güçlendirilmesi gerektiği ve levha kalınlığının önemli bir parametre olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. CFRP kullanımının çelik yapıların dayanıklılığını artırma potansiyelini araştırarak, çelik yapıların güçlendirilmesinde yeni bir yaklaşımın etkinliğini değerlendirmişlerdir.

Ghazijahani and Showkati (2013) çalışmalarında uzun silindirik çelik kabukların bükme ve düşey basınç birleşimindeki burkulma davranışını incelemişlerdir. İlgili sonlu eleman simülasyonlarını gerçekleştirmişler ve sonuçları deneylerle karşılaştırmışlardır. Teorik sonuçların, burkulma yükü ve deformasyon modları açısından deneysel sonuçlarla kabul edilebilir şekilde uyuştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, burkulma ile başlangıç kesitinin dairesel olmayan durumunun (özellikle daha yüksek değerlerde) bu tür kabukların düşey dış basınç altındaki burkulma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarının kapsamı içindeki test sonuçlarının etkileşim davranışını genelleştirmek için bir etkileşim formülü önermişlerdir.

Ghazijahani et al. (2014) çalışmalarında düzensiz dış basınç altındaki lokal çentik kusurlarıyla ince silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası tepkisini inceleyen deneysel bir programı raporlamışlardır. Bu çalışmanın sonuçlarının çap/kalınlık oranı gibi benzer geometrik özelliklere sahip pratik yapılar için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Golzan and Showkati (2008) çalışmalarında sıvı boşaltma veya rüzgâr yükleri altında dış uniform basınca maruz kalan kesik konik kabuklar ve sıg konik kapakları yakından ele almışlardır. Bu kabukların burkulma yeteneğinin eğim uzunluğu ile yarıçap ( $L/R$ ) ve yarıçap ile kalınlık ( $R/t$ ) olmak üzere iki temel geometrik orana bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Aritmetik ve sayısal verilerle karşılaştırmalar yoluyla hesapladıkları burkulma elastik ve plastik tepkilerini ve asimetrik kusur hassasiyetini numaralandırmak için laboratuvar çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Guo et al. (2019) çalışmalarında silindirik kabukların burkulma basıncını geçici olarak artırmak için klipsli frenleyiciler kullanarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Silindirik kabuklarda kullanılan kelepçeli tutucuların dış basınç altında verimliliğinin artırılmasını incelemek için bir deney düzeneği tasarlamışlardır. Klipsli frenleyicinin kritik burkulma basıncını etkili bir şekilde artırabildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, farklı sayılarda klipsli frenleyici içeren kısa silindirik kabukların dış basınç altındaki kritik burkulma basıncını tahmin etmek için bir denklem kullanmışlardır.

Haedir and Zhao (2011) çalışmalarında çelik borulu kısa kolonların güçlendirilmesi için dışarıdan yapıştırılan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) levhaların tasarımını ve deneysel değerlendirmesini araştırmışlardır. CFRP levhaların

kullanımının ince çelik duvarın burkulmasını geciktirerek eksenel kesit kapasitesini artırabildiğini tespit etmişlerdir. On adet kısa çelik dairesel kesitli kolonu, dışarıdan yapıştırılan CFRP levhalarla test etmişlerdir. Lif takviyesi ile kesit kapasitesinin artırılabilceğı sonucuna ulaşmışlardır.

Hisazumi and Kanno (2019) çalışmalarında paslanmış çelik profillerin eksenel basınç dayanımını deneysel olarak incelemişler ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile değerlendirmişlerdir. Paslanmış elemanların davranışının paslanma derecesine bağılı olarak değıştığını ve genel fleksiyonel burkulma, yerel burkulma ve birleşik başarısızlık modlarını gösterdiğini tespit etmişlerdir. Genel ve yerel burkulma arasındaki etkileşimi dikkate alan bir dayanım formülü önermişler ve bu formülün paslanmış çelik profillerin dayanımını tahmin etmek için makul bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Kilic and Cinar (2021) çalışmalarında sülfürik asit korozyonuna maruz kalan ince cidarlı silindirik tankların burkulma davranışını incelemişler ve kaybedilen dayanımın %20 ila %60'ını CFRP ile yeniden kazanıldığını tespit etmişlerdir. Deneyleri kontrol numuneleri, tam CFRP modelleri ve değışken CFRP uygulama grubu olmak üzere üç grup üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Silindirlerin asit korozyonuna uğradıktan sonra CFRP ile güçlendirilmesi ile dayanım kaybının büyük ölçüde giderilebileceğı gözlemlemişlerdir.

Kilic (2021) çalışmasında petrol ve türevlerini depolamak için kullanılan silindirik tankların burkulma davranışını incelemektedir. Yaptığı deneyler, uluslararası kodlar ve teorilerle uyumlu sonuçları vermiş olup tankların inşaatı sırasında yapılan hatalar ve yatay kaynak nedeniyle oluşan geometrik hataları ele almıştır.

Kidane et al. (2003) çalışmalarında çapraz ve yatay ızgaralı kompozit bir silindirin elemanın global burkulma yükünü belirlemek için bir analitik model geliştirerek eş değı rijitlik parametrelerini hesaplamayı amaçlamışlardır. Ayrıca geliştirdikleri analitik modele dayalı olarak parametrik bir çalışma yapmış olup, bu parametrik çalışmadan elde ettikleri sonuçların makul ve beklenen eğilimleri gösterdiğini belirmişler ve bunun geliştirilen analitik modelin geçerliliğini doğruladığını açıklamışlardır. Hesapladıkları

sonuçların ızgaranın yönlendirmesinin burkulma yükü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu da izah etmişlerdir.

Khatuni and Showkati (2019) çalışmalarında tankların burkulma dayanımını artırmak için Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) halkalarının kullanımı incelemişlerdir. Bu çalışma için, gerçek tanklara yakın boyutlarda bir tank inşa etmişler ve burkulmaya karşı bir CFRP halka ile güçlendirmişlerdir. CFRP takviye halkasının tankın burkulma ve burkulma sonrası kapasitesini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, deneysel ve sayısal analizden elde edilen sonuçları ve teorik ilişkilerden çıkarılan değerleri karşılaştırdıklarında sonuçların uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Korucuk et al. (2019) çalışmalarında kabukların burkulma kapasitesi üzerinde uzunlamasına çentik sayısının azaltıcı etkilerini göstermişlerdir. Karbon fiber takviyeli polimer şeritlerin kullanılmasının, modellerde yumuşama veya sertleşme davranışına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca teorik formüllere göre başlangıç ve genel burkulmayı elde etmek amacıyla, teorilerin kapsamı dışında kalan modeller için deney yapmadan başlangıç, genel ve çökme burkulmasını elde edecek katsayılar öngörmüşlerdir.

Kuppusamy et al. (2016) X46 çelik boruların yerel burulma dayanıklılığı üzerinde eşit derinlikteki korozyon kusurlarının etkisi üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonlu eleman analizi kullanarak elde ettikleri sonuçlarda, korozyon kusur etkileşimlerinin boru elemanının genel burkulma dayanıklılığını azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, çevresel olarak hizalanan korozyon kusurlarının, eksenel olarak hizalanan korozyon kusurlarına göre daha kritik olduğunu; bunun sebebinin ise boru elemanının çevresindeki malzeme kaybı daha fazla olmasından dolayı gerçekleştiğini izah etmişlerdir. Bunlara ek olarak, korozyon kusurlarının etkileşimlerinin burkulma dayanıklılığı üzerindeki etkisinin iç basınç arttıkça azaldığını; kusurların derinliği arttıkça etkileşimleri daha ciddi hale geldiğini ve bu da çelik borun genel burkulma dayanıklılığını önemli ölçüde azaltılabildiğini belirtmişlerdir.



Maali et al. (2012) çalışmalarında iki grup halinde gerçekleştirdikleri 14 laboratuvar numunesini incelemişlerdir. Bu grupları sıg konik kapaklar ve derin konik kapaklılar olarak adlandırılmışlardır ve bunları düzgün hidrostatik basınç altında yüklemişlerdir. Numuneleri derinliği 1t, 2t ve 3t (t: konik kabuk kalınlığı) olan genliklere sahip bir veya iki çizgi kusurunu içerecek şekilde değiştirmişlerdir. Buldukları sonuçlarda uluslararası kanunların yanı sıra başlangıç ve genel burkulma ve çökmeye ilişkin teorilerle genel olarak uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.

Maali et al. (2018) çalışmalarında kaynak yapımıyla oluşturulmuş genel uzunlamasına kusurların ve bunların dış basınç yük taşıma kapasitesine etkilerinin kullanıldığı sonlu eleman modelleri ile kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Modelleri altı farklı büyüklükte bir veya iki hatada kusur içerecek şekilde değiştirmişlerdir. Çalışmalarında mevcut bazı teorileri doğrulamışlar ve ince cidarlı konik kabukların burkulması konusunda yeni bilgiler sunmuşlardır. Konik yüksekliğinin kusurların zayıflatıcı etkisini artırdığını gözlemlemişlerdir. Nonlineer analizlerde bir kusurun varlığı burkulma yük kapasitesini artırırken, birden fazla kusurun varlığı tek bir kusurun bulunduğu modele göre daha az burkulma yük kapasitesine neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Maali et al. (2019) çalışmalarında farklı çentik yönlendirmeleri ve derinliklerine sahip dış basınca maruz kalan iki grup ince cidarlı silindirik kabuk modelini (toplamda 14 model) test etmişlerdir. Farklı teoriler ve kodlar altında yapılan test sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve bu deneysel araştırmada elde ettikleri sonuçları tanımlamış ve incelenmişlerdir.

Maali and Kilic (2020) çalışmalarında yangın sonrası hasar görmüş silindirik tankların burulma ve burulma sonrası davranışını incelemişlerdir. CFRP kullanmanın bu tankların taşıma kapasitesini nasıl geri kazandırabileceğini araştırmışlardır. Buldukları sonuçları, farklı teoriler ve kodlar altında yapılan testlerle karşılaştırmışlardır. Yangın sonrası hasar görmüş modeller üzerinde CFRP kullanmanın burulma ve burulma sonrası davranışını iyileştirebileceğini tespit etmişlerdir.

Maali et al. (2021) çalışmalarında erimiş atık polimer, polipropilen, silikon ve çelik yapıştırıcı ile doldurulmuş hafif çelikten yapılmış silindirik kabuğun burkulma ve

burkulma sonrası davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Farklı kompozit kaplamalara sahip yedi ince cidarlı silindirik kabuk örneğini hidrostatik basınca tabi tutmuşlardır. Test sonuçlarını, farklı teoriler ve kodlar altında karşılaştırmışlardır. Çift katmanlı CFRP sarmasının başlangıç burkulma değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Eritilmiş polipropilenin diğer malzemelere göre başlangıç burkulma değerini daha etkili bir şekilde artırdığını keşfetmişlerdir.

Maali et al. (2023) çalışmalarında çelik silindirik kabukların burkulma tepkisini, güçlendirilmemiş veya sızdırmazlık sağlanmamış, CFRP ile güçlendirilmiş ve sızdırmazlık sağlanmış silindirik kabuklar arasında deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Silindirik kabukları yarıçap/kalınlık oranı 445 hazırlamalarına rağmen yükseklik/yarıçap oranlarını 2, 4 ve 6 olarak hazırlamışlardır. Kabukların yüksekliği arttıkça burkulma kapasitesinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Sızdırmazlık sağlanan kabuklar için burkulma sonrası bir tepki oluşturulurken, CFRP ile güçlendirilmiş kabuklarda burkulma sonrası bir tepki bulunmadığını tespit etmişlerdir. CFRP güçlendirmesinin kabukların başlangıç ve genel burkulma yükünü önemli ölçüde artırdığını, ancak sızdırmazlığın sadece başlangıç burkulma yükünde etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Meyer-Piening et al. (2001) çalışmalarında DLR Yapısal Mekanik Enstitüsü (Braunschweig), ETH Zürih (Eski Hafif Yapılar ve Halat Yolları Enstitüsü) ve EMPA Dübendorf (Polimerler/Kompozitler Bölümü) tarafından yürütülen deneysel ve analitik çalışmaları ele almışlardır. Bu çalışmada, farklı laminasyon düzenlerine sahip dairesel silindirik kabukların burkulma yüklerini belirlemeyi amaçlamışlardır. 9 adet kabuk numunesini DLR Braunschweig’de eksen boyunca basınca ve EMPA Dübendorf’da eksen boyunca yüklemeye ve üzerine eklenmiş torkla birlikte yüklemeye tabi tutmuşlardır. ETH, yüklenmeden önce fotogrametri ve lazer tarama kullanırken EMPA; yüklenmemiş kabuklar için koordinat ölçümleri ve yüklenme sırasında ve burkulmadan sonra silindirik duvarın yan deplasmanını izlemek için Moiré projeksiyonunu uygulamıştır. Araştırmada, eksenel yükleme altında kusura duyarlı olan silindirlerin burkulma yüklerinin, birleşik yüklere karşı o kadar duyarlı olmayabileceğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, laminatın sertlik eksantrikliğinin eksenel burkulma yükünün büyüklüğü üzerinde önemli bir rol oynadığını, birleşik yükler için bu etkinin bir miktar azaldığını bulmuşlardır.

Nabati and Ghanbari-Ghazijahani (2020) çalışmalarında dairesel çelik borulardaki kesiklerin varlığının neden olduğu kayıp kapasiteyi telafi etmek için CFRP kullanımının etkisini incelemiştir. Deneyler ve sayısal analizler ile belirli yerleşimlerde ve boyutlarda CFRP kullanmanın, kesiklerin neden olduğu stres konsantrasyonunu azaltarak kayıp kapasiteyi gidermeye yardımcı olduğunu gözlemlemiştir.

Niloufari et al. (2014) çalışmalarında çelik depolama tanklarının silindirik ve konik gövdelerinin eğimli kenarları arasındaki birleşim bölgelerindeki sürekli kaynaklamanın neden olduğu çevresel kusurların, hidrostatik basınç altındaki kabukların çökme direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmayı, 12 laboratuvar örneğini içeren üç grupta gerçekleştirmişler, farklı t/R oranları altında yaptıkları test sonuçlarına göre çevresel kusurların kabukların çökme direncini azaltabileceğini veya artırabileceğini göstermiştir.

Noor and Al-Moubaraki (2008) çalışmalarında hafif çeliğin farklı HCl konsantrasyonlarındaki çözeltilerdeki korozyon davranışını incelemiş olup korozyon hızının asit konsantrasyonu ile arttığını ve korozyonun mikroyapısal değişikliklere yol açtığını gözlemlemiştir. Elektrokimyasal yöntemlerle yaptıkları analizler ile hafif çeliğin çözünmesinin anodik kontrol altında gerçekleştiğini ve çok adımlı bir mekanizma aracılığıyla meydana geldiğini ortaya koymuşlardır.

Panossian et al. (2012) çalışmalarında yoğun sülfürik asidin karbon çelik depolama tankları ve boruları üzerindeki korozyonunu ele almışlardır. Çalışmada, yoğun sülfürik asitte karbon çeliğin korozyon mekanizması, hızlandırıcı faktörler, karbon çelik korozyonunun çeşitleri ve bu korozyona karşı alınabilecek önleme yöntemlerini incelemiştir. Karbon çeliğin yoğun sülfürik asit ile etkileşiminin, hemen asit saldırısı oluşturduğunu ve metal yüzeyinde hidrojen gazı ve demir iyonları oluşturduğunu izah etmiştir. Bu iyonların daha sonra metal yüzeyinde koruyucu bir  $\text{FeSO}_4$  tabakası oluşturduğunu, fakat  $\text{FeSO}_4$  tabakasının yumuşak ve zayıf yapışkanlı olmasından dolayı kolayca zarar görebileceğini açıklamışlardır. Bu nedenle, karbon çelik tank ve boruların iyi performansını garanti etmek için nem girişini önlemenin, metal yüzeyinin doğrudan güneş ışığına maruz kalmasını engellemenin, sülfürik asidin yüksek akış hızını ve yüksek türbülansını önlemenin gerekli olduğunu vurgulamışlardır.

Pircher and Bridge (2001) siloların ve tankların burkulmasını etkileyen çeşitli faktörler üzerine sonlu elemanlar yöntemi kullanarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Komşu çevresel kaynak kusurları arasındaki etkileşimi araştırmışlar ve burkulma davranışı üzerindeki etkinin, lineer meridyen bükülme yarı dalga boyu ve kusurun derinliği ile ilişkili olarak kaplama yüksekliğine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca lokal çevresel kaynak kusur şekillerinin silo ve tankların burkulma davranışını etkilediğini saptamışlardır. Kaynağın neden olduğu artık gerilim alanlarının güçlendirme etkisini incelemişler ve geniş bir silindir geometri aralığı için burkulma mukavemetindeki artışın boyutunu elde etmişlerdir.

Rahgozar et al. (2010) korozyona maruz kalma süresinin bir fonksiyonu olarak korozyon kaybını tahmin eden bir model geliştirerek korozyonun etkilerini dikkate almak amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Modeli, büyük ölçüde aşınmış üç I kirişten toplamış oldukları ortalama ölçtükleri kalınlık verilerine dayanarak formüle etmişlerdir. Çelik kirişin yanal burkulma kapasitesini maruz kalma süresi açısından hesaplamak için analizler yapmışlar; sıradan I kirişlerin kalan yanal burkulma kapasitesinin, maruz kalma süresi açısından kalınlık kaybına göre değerlendirilmesi için minimum eğriler geliştirmişlerdir.

Rahman et al. (2021) yerel imalatlı çeşitli düşük karbonlu çelikten yapılmış ince cidarlı, kapalı uçlu silindirik kabuklar için vakumdan kaynaklanan burkulmayı ve bunun önlenmesini araştırmak amacıyla çalışma gerçekleştirmişlerdir. Takviyesiz silindirler için uzunluk/çap oranı 2,4 ila 3,43 arasında değiştiğini ve çap/kalınlık oranına karşılık gelen değer 390,8 ila 558,24 arasında değiştiğini izah etmişlerdir. Çeşitli takviye düzeneklerine sahip silindirler için ise uzunluk/çap oranı 2,67 ila 3,43 arasında değişirken, karşılık gelen çap/kalınlık oranları 390,8 ila 502,42 arasında değiştiğini açıklamışlardır. Vakum pompasından oluşan bir düzenek kullanarak bu silindirlerin içinde vakum oluşturmuşlar ve bu şekilde burkulmaya yol açmışlardır.

Sagiroglu et al. (2023) çalışmalarında yüksek sıcaklığa maruz kalan CFRP ile güçlendirilmiş soğuk şekillendirilmiş çelik kiriş-kolon vida bağlantılarının deneysel davranışını incelemişlerdir. Farklı parametreler altında yaptıkları testler sonucunda, guse kalınlığının artmasının bağlantı performansını azaltırken kirişin dövülebilirliğini artırdığını tespit etmişlerdir. Takviye parçası kullanımının enerji emme kapasitesini

artırdığını ancak dövülebilirliği azalttığını ortaya koymuşlardır. Yüksek sıcaklıktaki CFRP güçlendirmesinin bağlantıların burkulma riskini azaltırken, kiriş duvarı kalınlığı guse kalınlığını aştığında vida kırılmasıyla sonuçlanan çökme modları ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir.

Sharifi and Rahgozar (2010) çalışmalarında korozyonun neden olduğu kalınlık kaybını inceleyerek, bu kaybın çelik kirişlerin burulmalı burkulma kapasitesini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Bir petrokimya tesisinden çıkarmış oldukları, korozyondan zarar görmüş 4 adet I kiriş örneğinden kalınlık kaybı verileri derlemişlerdir. Verileri, yanal olarak sınırlandırılmamış uzun ve kısa açıklıklı kirişlerin kalan yanal burulma burkulması kapasitesinin yüzdesini hesaplamak amacıyla bir korozyon bozulma modeli geliştirmek için kullanmışlardır. Aşınmış hasarlı I kirişlerde kalan yanal burulma burkulma kapasitesinin yüzdesini tahmin etmek için, kalınlık kaybıyla ilgili bilgilerle birlikte farklı tipte evrensel kirişler için hazırda bulunan minimum eğriler kullanmışlardır. Sonuçlarda, bozulan çelik yapıların servis ömrünün daha iyi tahmin edilmesi için mühendisler tarafından kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Shokrzadeh and Sohrabi (2016) çalışmalarında petrol depolama tanklarındaki korozyonun çelik silindirik tankların çökme davranışına etkisini incelemişlerdir. İç ve dış korozyonun, üç farklı çelik tankın çökme direncine etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çatının üst kısmının incelenmesi ve tam korozyon durumlarında çökme direncinin belirgin bir şekilde azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, korozyon sürecinde tankların çökme bölgelerinin yukarıya doğru kaydığını tespit etmişlerdir.

Showkati and Shahandeh (2010) çalışmalarında boru hatlarının burkulma mukavemeti üzerinde halka rijitlerinin etkisini incelemişlerdir. Temel yükleme olarak yalnızca hidrostatik basınç etkisini dikkate almışlar ve hafif halka rijitlerinin eklenmesiyle burkulma eşiğinin arttığını saptamışlardır. Halka aralığı azaldıkça burkulma ve çökme yükleri arasındaki farkın azaldığını tespit etmişlerdir.

Shuai et al. (2020) çalışmalarında aksiyel sıkıştırırmalı yük altında korozyon hasarı içeren bir X80 çelik borunun çökme direncini incelemişlerdir. Korozyon hasarının boyutu, boru geometrisi, iç basınç ve çelik mekanik özellikleri gibi parametrelerin çökme davranışına etkisini değerlendirmişlerdir. Kritik çökme yükünün korozyon hasarının

derinliği ve genişliği tarafından en çok etkilendiğini; hasar uzunluğu etkisinin ise en düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Boru dış çapı ve duvar kalınlığının artması göçme direncini artırdığını, iç basıncın göçme direncini azalttığını saptamışlardır.

Song et al. (2022) çalışmalarında korozyonun, dairesel kesitli çelik boru bağlantılarının eksenel basınç altında burkulma davranışı ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Klorür korozyonuna maruz kalan bağlantılar üzerinde deneyler yapmışlar ve sonrasında sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Korozyonun çökme modu, taşıma kapasitesi ve deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini analiz etmişler, ayrıca korozyona uğramış sütunların yüzey morfolojisini 3D tarayıcı ile elde etmişlerdir. Yaptıkları analizlerin sonucunda, korozyonun mekanik davranışı üzerindeki etkilerini ve tasarım formüllerinin geçerliliğini değerlendirmişlerdir.

Taraghi et al. (2020) çalışmalarında CFRP ile güçlendirilmiş konik kabukların düzgün dış basınç altındaki burkulma performansını incelemişlerdir. CFRP şeritlerin kullanımının, konik kabukların rijitliğini ve burkulma dayanımını artırma konusunda etkili olduğunu saptamışlardır. Özellikle alt üçte bir bölgesinin takviyeli CFRP şeritlerle dairesel olarak güçlendirilmesinin konik kabukların burkulma stabilitesini artırmak için en iyi yaklaşım olduğunu belirlemişlerdir.

Usman et al. (2015) çalışmalarında çeşitli asit çözeltilerinde farklı metallerin korozyon davranışını ağırlık kaybı yöntemiyle incelemişlerdir. Metallerin korozyon hızını ve sıralamasını incelemişler, ayrıca çözelti konsantrasyonunun korozyon hızına etkisini araştırmışlardır.

Zhang et al. (2020) çalışmalarında korozyonun ince cidarlı çelik malzemelerin soğuk şekillenme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Korozyonun etkisiyle farklı kırılma modları ve özellikler gözlemlemişlerdir. Korozyonlu köşe bölgelerinin dayanımının düz bölgelere göre daha fazla azaldığını ve korozyon derecesinin arttıkça bu etkinin daha da belirginleştiğini saptamışlardır. Bu çalışma ile korozyonun soğuk şekillenmiş malzemelerin dayanımı ve sünekliği üzerinde olumsuz etkisi olduğunu ve korozyon yüzeyinin stres dağılımını ve kırılma yerlerini çeşitlendirebileceğini göstermişlerdir. Korozyon yüzeyinin malzemenin kalınlığı ile ilişkili olduğunu ve kalınlık azaldıkça etkisinin arttığını belirtmişlerdir.

Zhang et al. (2020) çalışmalarında korozyonun çelik sütunların yerel burkulma ve burkulma sonrası davranışına etkisini incelemişlerdir. Korozyon derecesinin arttıkça çelik sütunların taşıma kapasitesinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Korozyonun göçme modunu değiştirdiğini ve plastik deformasyon yeteneğini zayıflattığını saptamışlardır. Çukurların etkisinin kalınlık kaybından daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Korozyonlu çelik sütunların burkulma sonrası davranışını ve nihai yükünü doğru bir şekilde tahmin edebilecek bir formül önermişlerdir.

Zhao et al. (2024) çalışmalarında açıklıklı çelik plakaların mukavemetini artırmak için fiber kumaşla takviye edilmiş çelik plakaları incelemişlerdir. Farklı açıklık pozisyonları ve şekilleri olan numunelerde fiber kumaşın çelik plakaların kesme kapasitesini nasıl etkilediğini ve çökme modlarını araştırmışlardır. Karbon fiberin, bazalt fiberine kıyasla kesme kapasitesini daha fazla artırdığını bulmuşlardır. Fiber kumaş ve epoksi reçine kullanımının ince çelik plakaların kesme kapasitesini sınırlı derecede artırabildiğini gözlemlemişlerdir.

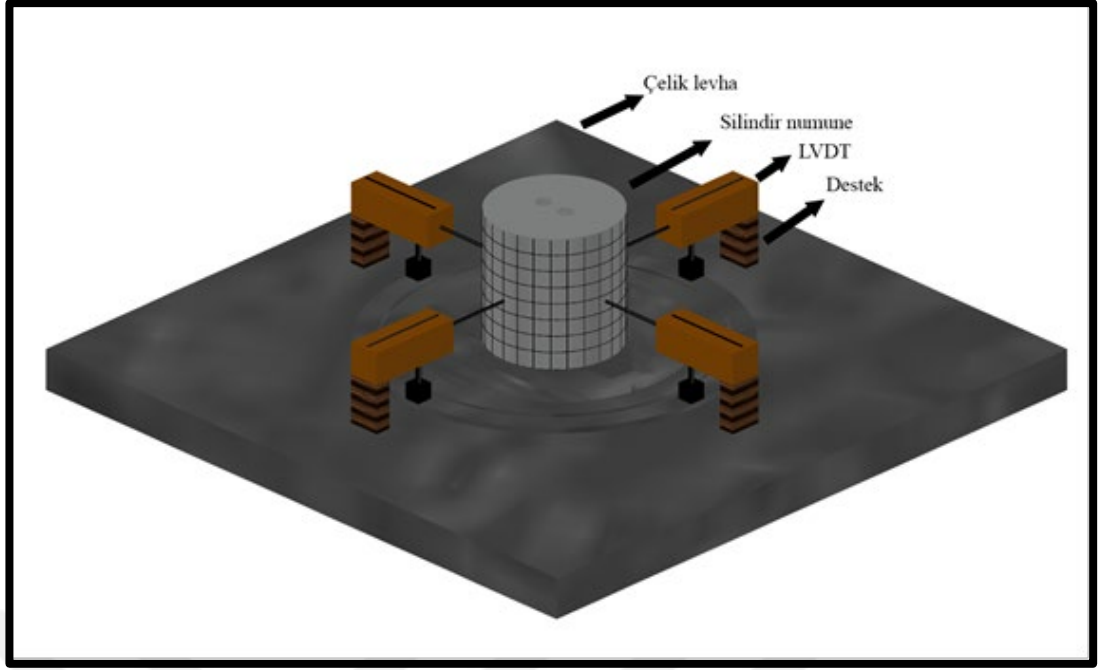
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneyisel Çalışmalar

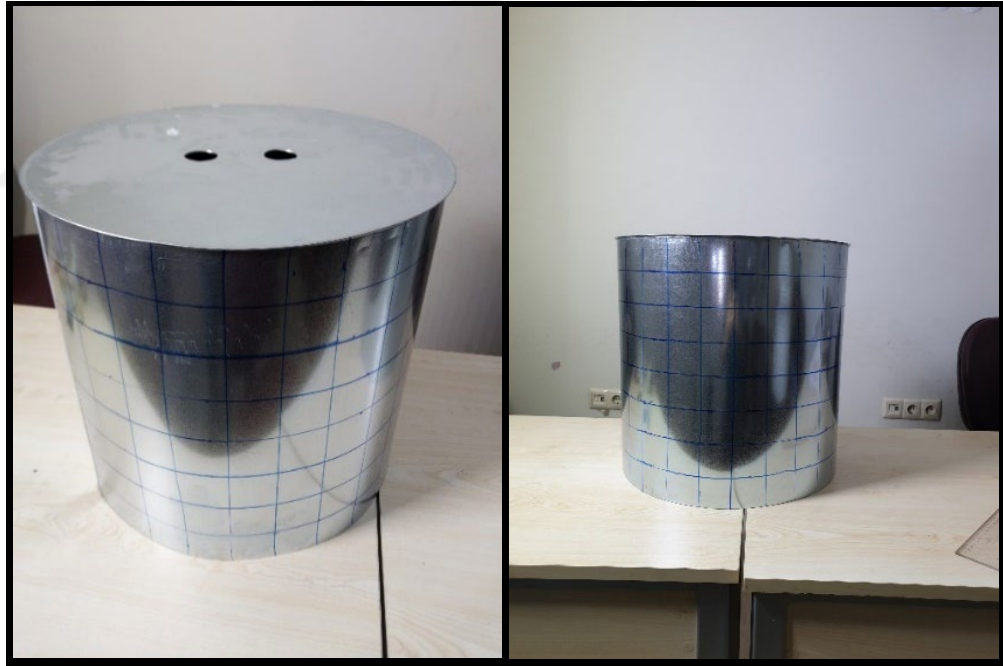
Bu yüksek lisans tezi kapsamındaki deneyler Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Yapı Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Deneyde çelik tanklarda korozyon etkisi için hidroklorik asit kullanılmıştır. Hidroklorik asit doldurulacak olan çelik tanklarda sızdırma olmaması için foamboard levhalar tanklara soğuk silikon ile monte edilmiştir. Sızdırma olmadığı emin olunduktan sonra çelik tanklar belirlenen oranda hidroklorik asit ile doldurulmuştur. Asitler numunelerin üst kısmında bulunan deliklerden doldurulduğundan dolayı silindir numunelerin kapak kısmında korozyon olmamış, sadece yan yüzeylerde korozyon gerçekleşmiştir. Tanklar 24 saat asit ile etkileşimde kaldıktan sonra boşaltılıp ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Daha sonra CFRP uygulamaları yapılmıştır. CFRP uygulanan numunelerin yan yüzeyleri tamamen CFRP ile kaplanmıştır. Daha sonra gerekli deney ortamı sağlanarak burkulma deneylerine geçiş yapılmıştır. Burkulma deneylerinde tanklardaki şekil değiştirmeleri ölçmek için 4 adet LVDT kullanılmıştır. Her bir LVDT deney yapılan tank etrafına eşit aralıklarla konumlandırılmıştır. Deney sürecinde uygulanan basınç ve yer değiştirme verilerinin alınabilmesi için 120 kanallı veri toplama cihazı (data logger) kullanılmıştır. Veri toplama cihazı üzerinden deney verilerini bilgisayar ortamına aktarmak için DasyLab programı kullanılmıştır. Deney numunesindeki havanın emme işlemine tabi tutulabilmesi için numune üzerine delikler eklenmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.1'de, silindir deney numunesi ise Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Burkulma deneyinden elde edilen sonuçlar araştırma bulguları bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.





Şekil 3.1. Deney düzeneği



Şekil 3.2. Silindir deney numunesi

#### 3.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

##### 3.2.1. Hidroklorik asit

Deneyisel çalışmada TS-EN ISO 9001:2008 standardına uygun hidroklorik asit kullanılmıştır. Kullanılan hidroklorik asidin yoğunluğu 1,15-1,16 g/cm<sup>3</sup> olup, saflığı %30-32 değerindedir. Kullanılan hidroklorik asit için Spesifikasyon- Yaklaşık değerler için bilgilendirmeler Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan hidroklorik asidin özellikleri

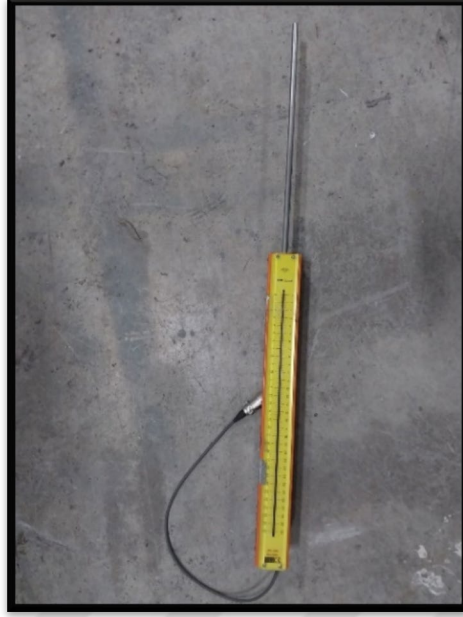
| Spesifikasyon | Yaklaşık Değerler           |
|---------------|-----------------------------|
| Safiyet       | %30-32                      |
| Yoğunluk      | 1,15-1,16 g/cm <sup>3</sup> |
| Demir (Fe)    | %0,0005                     |
| Arsenik (As)  | %0,0001                     |
| Ağır Metaller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

##### 3.2.2. Foamboard levha

Deney numunesi asit çözeltisiyle dolu olacağı sırada asit ile temas ettiği zaman etkilenmemesi sebebiyle foamboard levhalar kullanılmıştır. Bu levhalar çelik tanklara soğuk silikon çekilerek monte edilmiştir.

##### 3.2.3. LVDT cihazı

Burkulma deneyi esnasında yatay deformasyonu ölçmek amacıyla 300 mm’ye kadar deplasman ölçebilen dört adet LVDT cihazı kullanılmıştır. Kullanılan LVDT cihazı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** LVDT ölçüm cihazı

#### **3.2.4. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kumaş**

Burkulma dayanımını güçlendirmek amacıyla belirlenen deney numunelerinde CFRP kumaşlar kullanılmıştır. CFRP malzemeleri genellikle düşük yoğunluğa sahiptir, bu da diğer güçlendirme yöntemlerine kıyasla yapı elemanlarına ağırlık olarak daha az etki etmesine olanak sağlar. CFRP, kullanıldığı malzemelere yüksek mukavemet kazandırarak ince ve hafif yapı elemanlarının kullanım alanının genişlemesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, metal malzemelere kıyasla korozyona karşı daha dirençli bir yapıya sahiptir. Bu, özellikle dış mekân uygulamalarında ve sert çevresel koşullarına maruz kalan yapı elemanlarında avantaj sağlamaktadır. CFRP, kullanıldığı malzemenin elastik deformasyonunu sınırlayarak yapı elemanlarının şeklini korumasına yardımcı olur. Bununla beraber CFRP malzemeleri, özel uygulamalar için çeşitli şekil ve boyutlarda üretilir, böylece kullanılma amacına göre çeşitlilik sağlar. Kullanılmış olan CFRP kumaş Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.4.** CFRP kumaş

#### **3.2.5. Veri toplama cihazı (Data logger)**

Deney sırasında LVDT cihazlarında ölçülecek verilerin bilgisayar ortamına Dasiylab programı aracılığıyla aktarması amacıyla veri toplama cihazı (data logger) kullanılmıştır. Data logger, çeşitli ortamlarda ve koşullarda çeşitli veri türlerini toplamak, kaydetmek ve depolamak için kullanılmaktadır. Bu cihazlar sıcaklık, nem, basınç, hız, titreşim, akım, gerilim gibi birçok farklı veri türünü ölçebilmektedir. Kullanılan cihaz 120 kanallı ve 13 portlu olup, Şekil 3.3’ de gösterilmiştir.



**Şekil 3.5.** Veri toplama cihazı (Data logger)

#### 3.2.6. Lazerli ölçüm cihazı

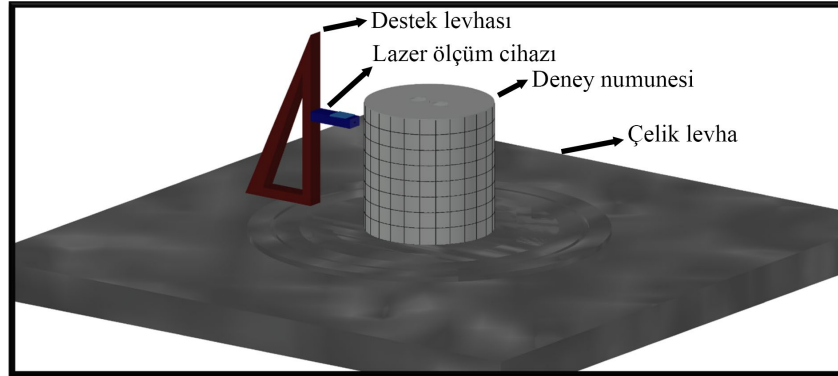
Burkulma deneyine tabi tutulacak deney numuneleri yüzeylerindeki düzensizlikleri ölçmek amacıyla lazerli ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihazın marka ve modeli Leico Disto D2'dir. Kullanılan lazerli ölçüm cihazı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Lazerli ölçüm cihazı

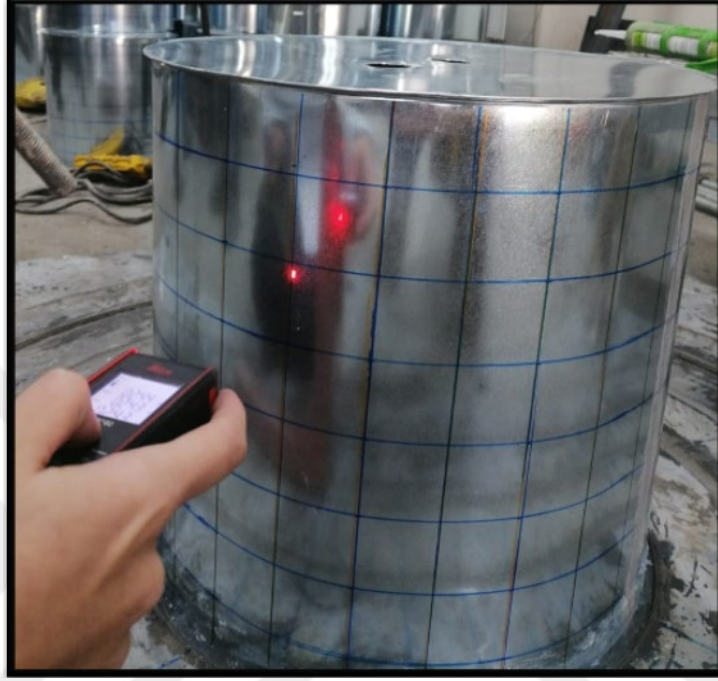
#### 3.3. Deneylerin Yapılışı

Burkulma deneyi gerçekleştirilecek numune yüzeylerindeki düzensizlikler lazerli ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçme işlemindeki düzenek Şekil 3.6'te gösterilmiştir.



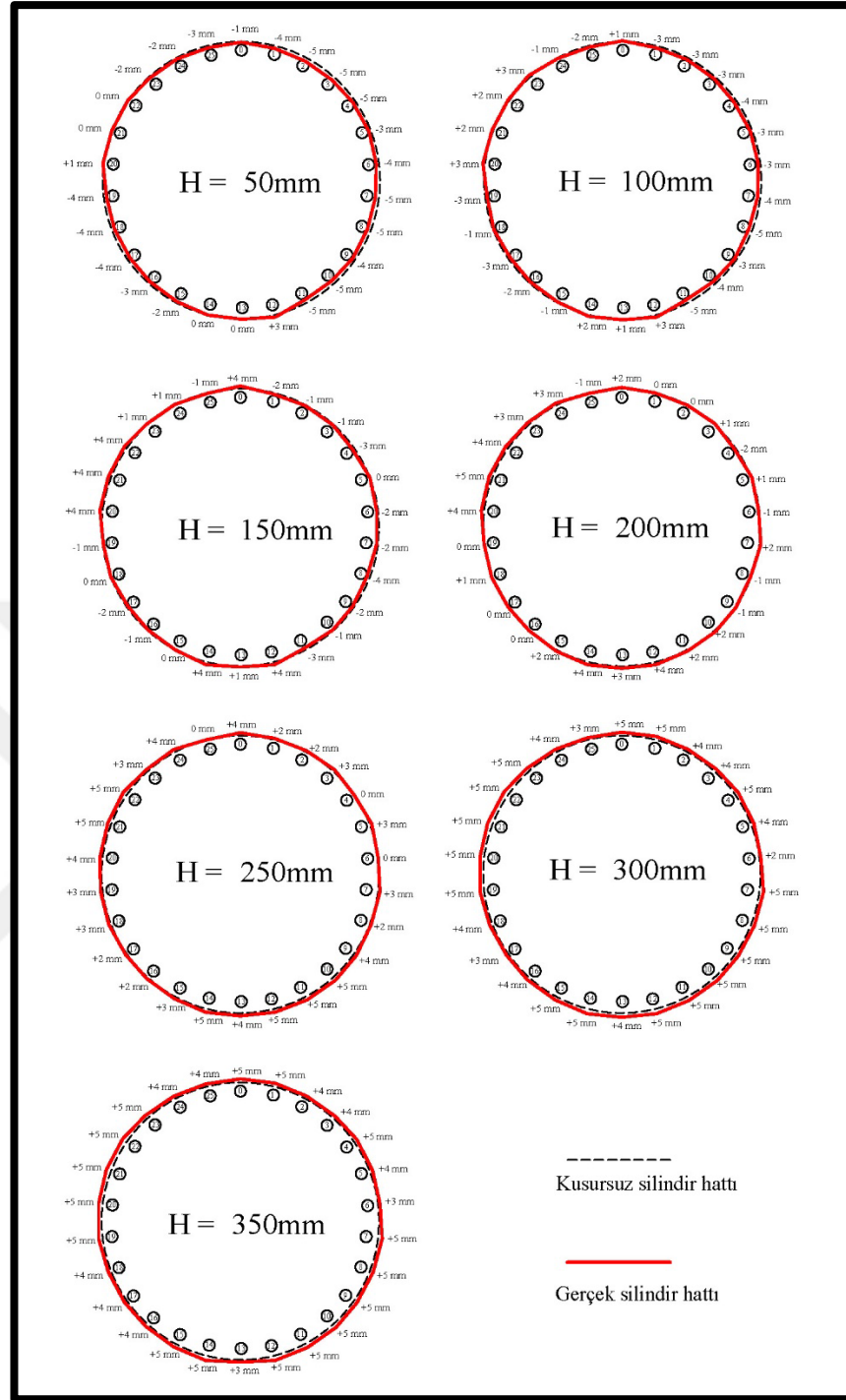
Şekil 3.7. Geometrik düzensizlik ölçüm işleminde kullanılan düzenek

Ölçme işlemi her bir deney numunesi için gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda düzensizliklerin oranı yaklaşık %2-3 aralığında değiştiği gözlemlenmiş olup; bu değişim oranının küçük olmasından dolayı deneyler bu oran ihmal edilerek gerçekleştirilmiştir. Ölçüm cihazının kullanılması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8.** Deney numunesi yüzeyinden geometrik düzensizlik ölçüm işlemi

Silindir numunesinde 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 mm yüksekliklerinden (H), numune üzerinde lazerli ölçüm cihazı kullanılarak düzensizlikler ölçülmüştür. Ölçülen değerler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



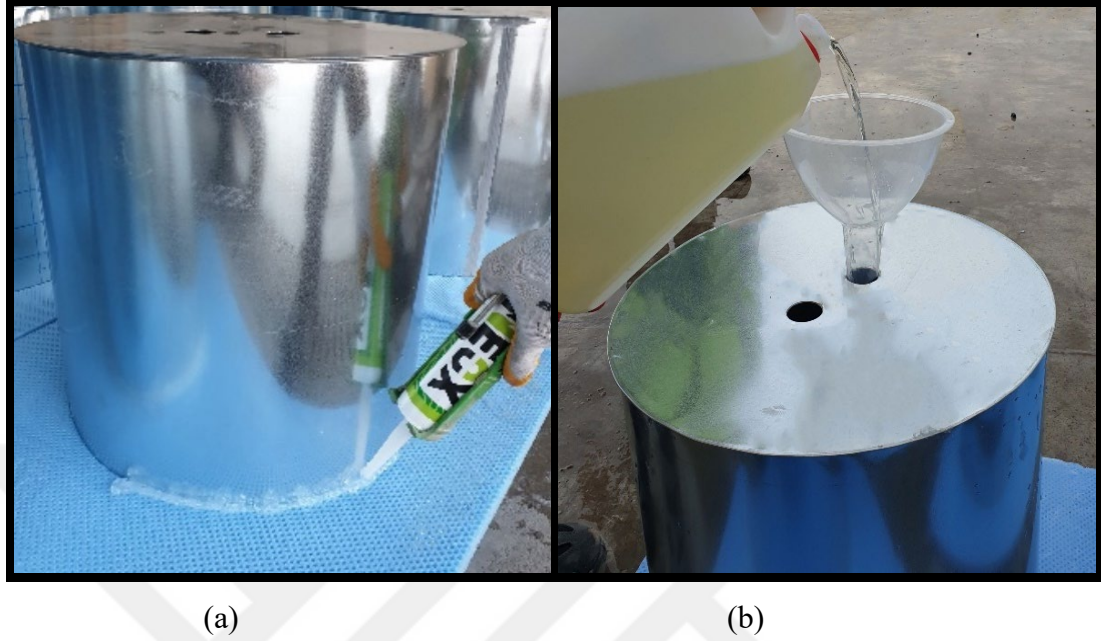
Şekil 3.9. Belli H yüksekliklerinde ölçülen geometrik düzensizlik değerleri

Deneye tabi tutulan 6 adet numuneden 4 tanesi korozyona maruz bırakılmıştır. Bu tanklar foamboard levhalara soğuk silikon kullanılarak, içlerine doldurulacak asit-su çözeltisini sızdırmayacak şekilde monte edilmiştir. Tanklarda kullanılan silikonun kuruma işlemi tamamlandıktan sonra asit doldurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinde asitler 24 saat bekletilerek korozyona uğratma işlemi gerçekleştirilmiştir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Asitleri boşaltılan numunelerin ağırlıkları tartılarak korozyon sonucu oluşan ağırlık kaybı not edilmiştir. Numuneleri korozyona uğratma süreci Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.10.** (a) Numunenin silikonla yerleştirilmesi (b) asidin numuneye doldurulması

6 adet deney numunesinin 3 tanesi CFRP ile kaplanmıştır. CFRP kumaşlar deney numunelerinin yan yüzeylerini tamamen kapatacak şekilde özel epoksi karışımı kullanılarak yapıştırılmıştır. Daha sonra kuruması için 24 saat bekletilmiştir. CFRP yapıştırma işlemi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.





**Şekil 3.11.** Numunelere CFRP kaplama işlemi

Yapıştırma işleminde önce özel epoksi karışımı önce numunenin yüzeyine sürülmüştür. Daha sonra uygun ölçüde CFRP kumaş kesilerek tankın yüzeyine yapıştırılmıştır. CFRP kumaş tank yüzeyine oturduktan sonra CFRP'nin üstüne özel epoksi karışımı bir kat daha sürülmüş ve kurumaya bırakılmıştır.

Numuneler burkulma deneyi için Şekil 3.11'de gösterildiği gibi deney düzeneğine soğuk silikon ile monte edilmiştir. Silikonun kuruması tamamlandıktan sonra burkulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Deney düzeneğinin kurulması

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Korozyona uğrayan çelik tankların burkulma kapasitesinin incelendiği deneysel çalışmada 6 adet ince cidarlı çelik tank numunesi deneye tabi tutulmuştur. Kullanılan deney numunelerinin özellikleri Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Deney numuneleri

| Grup        | Numune İsimleri | CFRP | Asit oranı (%) | Numune Boyutları (mm) |           |          |
|-------------|-----------------|------|----------------|-----------------------|-----------|----------|
|             |                 |      |                | Çap                   | Yükseklik | Kalınlık |
| Korozyonsuz | Exp1-P          | -    | -              | 400                   | 400       | 0,45     |
|             | Exp2-CFRP       | Var  |                |                       |           |          |
| Korozyonlu  | Exp3-%2,5-P     | -    | 2,5            |                       |           |          |
|             | Exp4-%2,5- CFRP | Var  |                |                       |           |          |
|             | Exp5-%5-P       | -    | 5              |                       |           |          |
|             | Exp6-%5- CFRP   | Var  |                |                       |           |          |

2 adet numune korozyona tabi tutulmazken; 2 adet numune %2,5 oranında hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılmış olup, geri kalan 2 adet numune ise %5 oranında hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. %2,5 oranında korozyona maruz kalan numunelerden birisine ve %5 oranında korozyona maruz kalan numunelerden birisine CFRP uygulaması yapılmıştır. Silindir numuneleri 400 mm boyunda ve 400 mm çapında olup, 0,45 mm kalınlık değerine sahiptirler.

## 4.1. Korozyon Sonrası Tank Değerleri

Çelik tanklarda korozyon etkisini gözlemlemek amacıyla, 2 adet numunede %2,5 ve 2 adet numunede %5 oranında asit olması şartıyla 4 adet tankın içi tam dolu olacak şekilde hidroklorik asit ile doldurulmuştur. 24 saat sonunda tankların içi boşaltılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Korozyona uğramadan önceki ağırlıkları ile karşılaştırılarak ağırlık kaybı oranları hesaplanmıştır. 4 adet numunenin ağırlık kaybı oranlarına bakıldığında, %2,5 oranında asit doldurulmuş olan tanklarda sırasıyla %6,3 ve %6,9 oranında ağırlık kaybı gözlemlenirken; %5 oranında asit doldurulmuş olan çelik tanklarda sırasıyla %10,1 ve %9,6 oranında ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. Korozyonlu grupta bulunan çelik tanklara ait ağırlık ve ağırlık kaybı oranları Çizelge 4.2’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Korozyonlu deney numuneleri ağırlık değişim oranları

| Numune İsimleri | Korozyon Öncesi Ağırlık (g) | Korozyon Sonrası Ağırlık (g) | Ağırlık Kaybı (%) |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------|
| Exp3-%2,5-P     | 1550                        | 1453                         | 6,3               |
| Exp4-%2,5- CFRP | 1550                        | 1443                         | 6,9               |
| Exp5-%5-P       | 1545                        | 1389                         | 10,1              |
| Exp6-%5- CFRP   | 1550                        | 1402                         | 9,6               |

#### 4.2. Burkulma Deneyi Sonucu Tank Burkulma Değerleri

Çelik tanklar üzerinde yapılan korozyona uğratma işlemi ve CFRP kaplama işlemleri tamamlanarak burkulma deneylerine geçilmiştir. Burkulma deneyi için öncelikle çelik tank numuneleri Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi deney düzeneğine soğuk silikon kullanılarak yerleştirilmiştir. Kontroller yapılarak burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir.

**Şekil 4.1.** Numunenin düzeneğe bağlanması

Burkulma deneyinde kullanılan LVDT aletlerinin yerden yükseklikleri Çizelge 4.3’ de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.3.** LVDT aletlerinin konumları

| Grup        | Numune İsimleri | LVDT Yerden Yükseklik (mm) |
|-------------|-----------------|----------------------------|
| Korozyonsuz | Exp1-P          | 205                        |
|             | Exp2-CFRP       | 205                        |
| Korozyonlu  | Exp3-%2,5-P     | 200                        |
|             | Exp4-%2,5- CFRP | 195                        |
|             | Exp5-%5-P       | 200                        |
|             | Exp6-%5- CFRP   | 200                        |

#### 4.3. Korozyonsuz Grup Numune Değerleri

Korozyonsuz grupta Korozyonsuz-CFRP'siz ve Korozyonsuz-CFRP'li olmak iki adet numune vardır. Bu deney numunelerinin adlandırılması Çizelge 4.4' de gösterilmiştir.

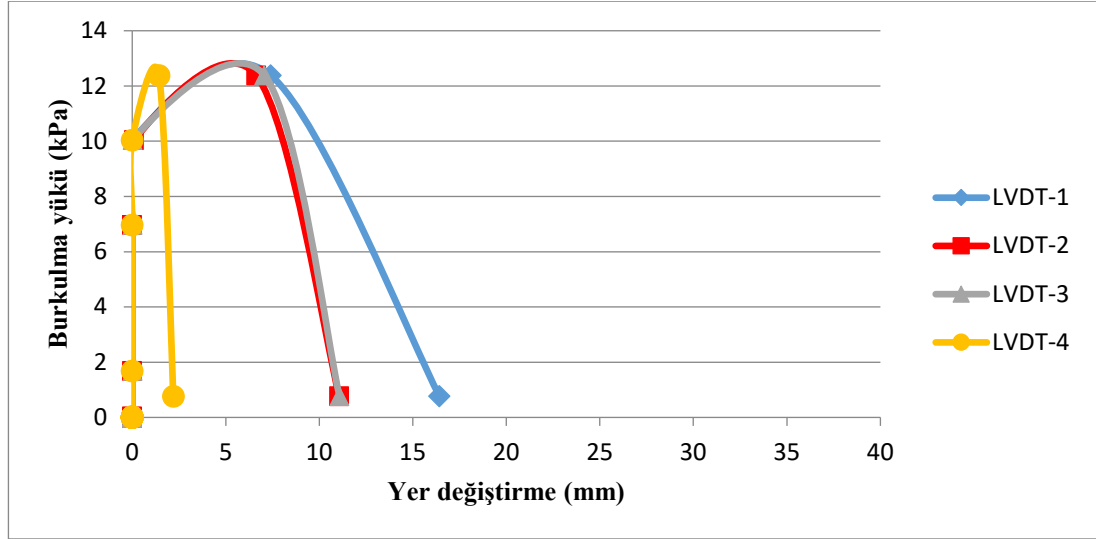
**Çizelge 4.4.** Korozyonsuz deney numunelerinin isimleri

| Numune Özelliği      | Numune İsimleri |
|----------------------|-----------------|
| Korozyonsuz-CFRP'siz | Exp1-P          |
| Korozyonsuz-CFRP'li  | Exp2-CFRP       |

##### 4.3.1. Korozyonsuz ve CFRP'siz deney numunesi (Exp1-P)

Korozyona uğramış çelik tanklarda burkulma kapasitesinin nasıl değiştiğini ve CFRP kullanımının burkulma dayanımına nasıl katkı sağlayacağını incelemek için ilk olarak korozyonsuz ve CFRP'siz olan Exp1-P deney numunesi burkulma deneyinde incelenmiştir. LVDT aletleri yerden 205 mm yüksekliğe konulmuş olup, burkulma deneyi sonuna kadar numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonucunda Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri incelenmiştir. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde, numunede gerçekleşen ilk burkulma ile genel burkulma aynı basınç değerinde gerçekleşmiştir. Deney sırasında ilk burkulma ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme görülse de numunede çatlak, hava kaçması vs. gibi bir olay gözlemlenmemiştir. Numunede göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaçırması gözlemlenmiş olup, deney numunesinin üst ve yan yüzeylerinde göçme gözlemlenmiştir.

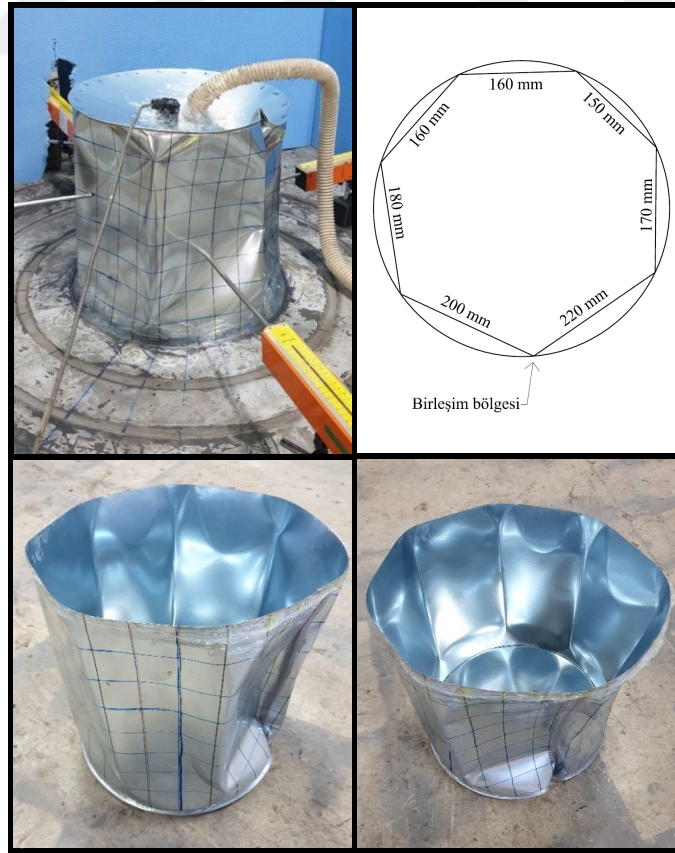




Şekil 4.2. Exp1-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.5. Exp1-P burkulma değerleri

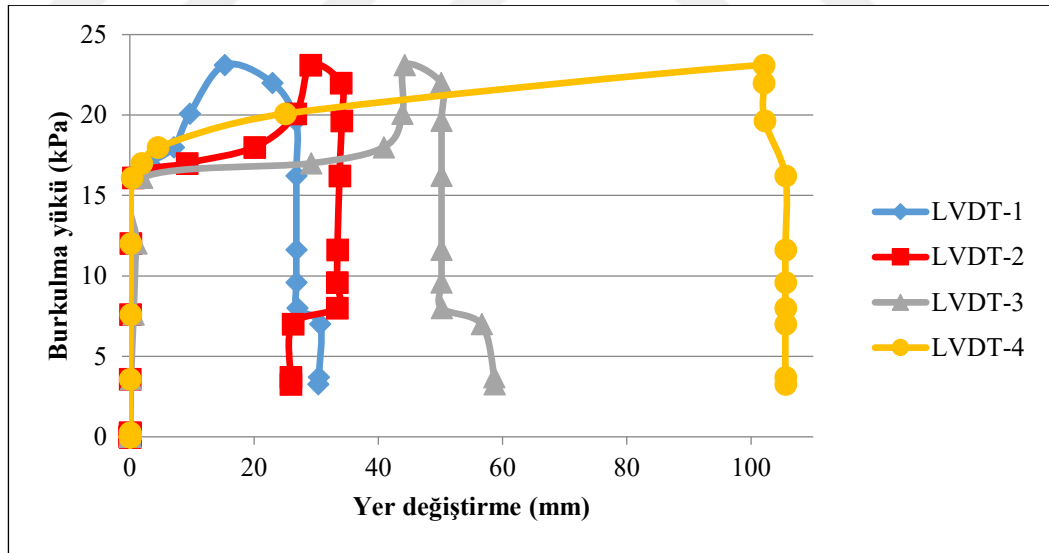
| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 10,04                    | 10,04          | 12,38            |



Şekil 4.3. Burkulma deneyi sonrası Exp1-P numunesi

## 4.3.2. Korozyonsuz ve CFRP'li deney numunesi (Exp2-CFRP)

CFRP kullanımının çelik tankta burkulma dayanımına nasıl katkı sağlayacağını incelemek için korozyonsuz ve CFRP'li olan Exp2-CFRP deney numunesi burkulma deneyinde incelenmiştir. LVDT aletleri yerden 205 mm yükseklikte kurulmuştur. Burkulma deneyi boyunca numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri incelenmiştir. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde, ilk burkulma değeri Exp1-P numunesine göre erken ve genel burkulma değeri Exp1-P numunesi ile aynı değerde gözlemlense de göçme burkulması Exp1-P numunesine göre daha geç gözlemlenmiştir. İlk ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme görülse de numunede çatlak, hava kaçası gözlemlenmemiş; göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaçası gözlemlenmiş olup, deney numunesinde burkulma sonucu göçme gözlemlenmiştir. Çelik tankta gözlemlenen burkulma durumu, tankın birleşim bölgesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.4. Exp2-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.6. Exp2-CFRP burkulma değerleri

| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 16,1                     | 16,1           | 23,11            |



Şekil 4.5. Burkulma deneyi sonrası Exp2-CFRP numunesi

#### 4.4. Korozyonlu Grup Numune Değerleri

Korozyonlu grupta %2,5 HCl-CFRP'siz, %2,5 HCl-CFRP'li, %5 HCl-CFRP'siz ve %5 HCl-CFRP'li olmak dört adet numune vardır. Bu deney numunelerinin adlandırılması Çizelge 4.7' de gösterilmiştir.

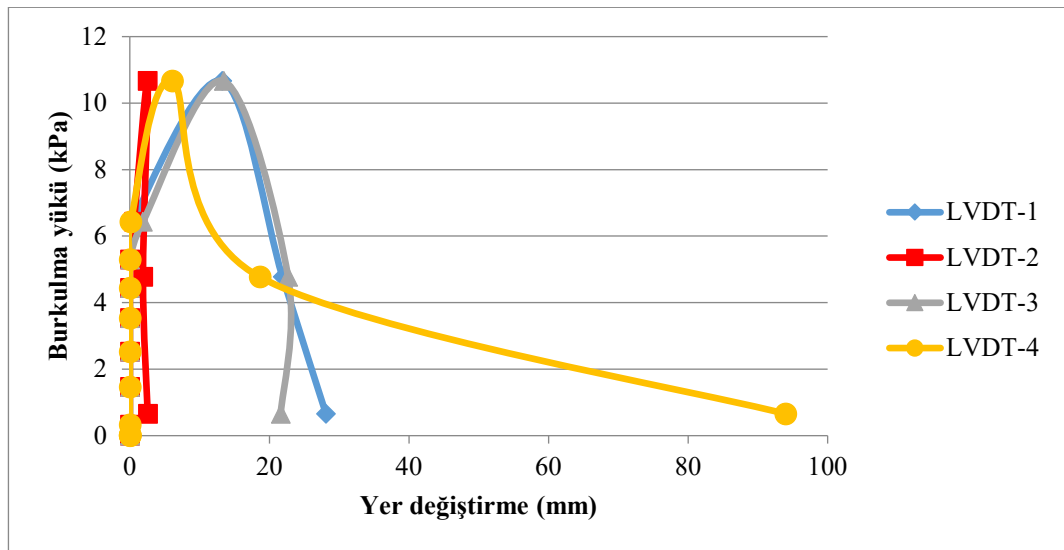


Çizelge 4.7. Korozyonlu deney numunelerinin isimleri

| Numune Özelliği   | Numune İsimleri |
|-------------------|-----------------|
| %2,5 HCl-CFRP'siz | Exp3-%2,5-P     |
| %2,5 HCl-CFRP'li  | Exp4-%2,5-CFRP  |
| %5 HCl-CFRP'siz   | Exp5-%5-P       |
| %5 HCl-CFRP'li    | Exp6-%5-CFRP    |

#### 4.4.1. %2,5 Korozyonlu ve CFRP'siz deney numunesi (Exp3-%2,5-P)

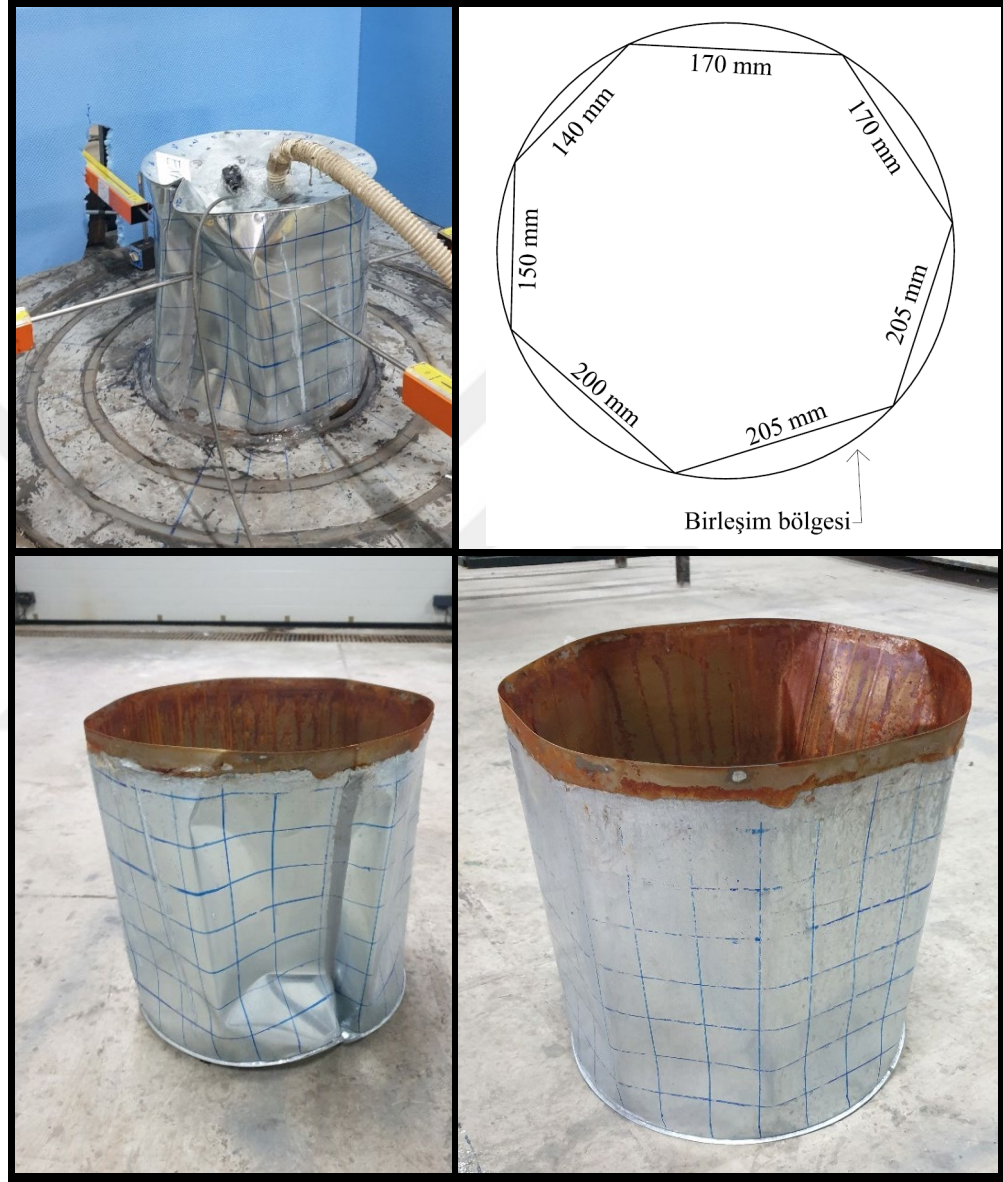
Korozyon olayının çelik tanklarda burkulma kapasitesini nasıl etkilediğini incelemek için %2,5 oranında hidroklorik aside maruz kalarak korozyona uğramış ve CFRP'siz olan Exp3-%2,5-P deney numunesi burkulma deneyine tabi tutulmuştur. LVDT aletleri yerden 195 mm yükseklikte kurulmuştur. Burkulma deneyi sırasında numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonucunda Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri incelenmiştir. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde, ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri korozyonsuz numunelere göre (Exp1-P ve Exp-2-CFRP) daha erken gözlemlenmiştir. İlk ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme gözlemlenmiş ve göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaçırmaları gözlemlenmiştir. Çelik tankta gözlemlenen burkulma durumu, tankın birleşim bölgesinde daha yoğun gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. Exp3-%2,5-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

**Çizelge 4.8.** Exp3-%2,5-P burkulma değerleri

| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 5,29                     | 6,43           | 10,66            |

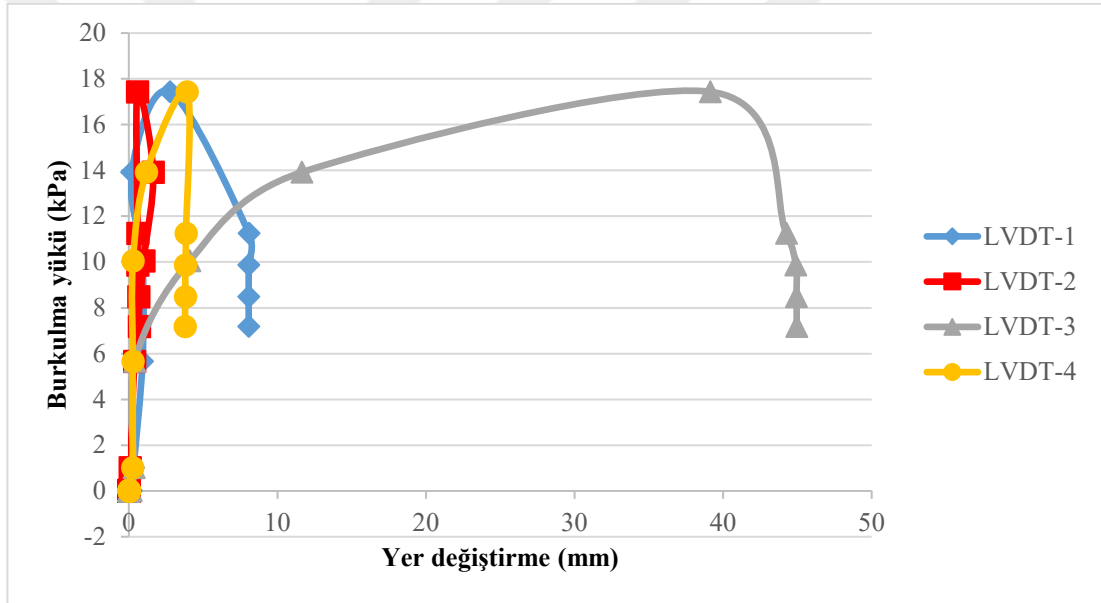


**Şekil 4.7.** Burkulma deneyi sonrası Exp3-%2,5-P numunesi

#### 4.4.2. %2,5 Korozyonlu ve CFRP'li deney numunesi (Exp4-%2,5-CFRP)

CFRP kullanımının korozyonlu çelik tanklarda burkulma kapasitesini nasıl etkilediğini incelemek için %2,5 oranında hidroklorik aside maruz kalarak korozyona uğramış ve CFRP'li olan Exp4-%2,5-CFRP deney numunesi burkulma deneyinde

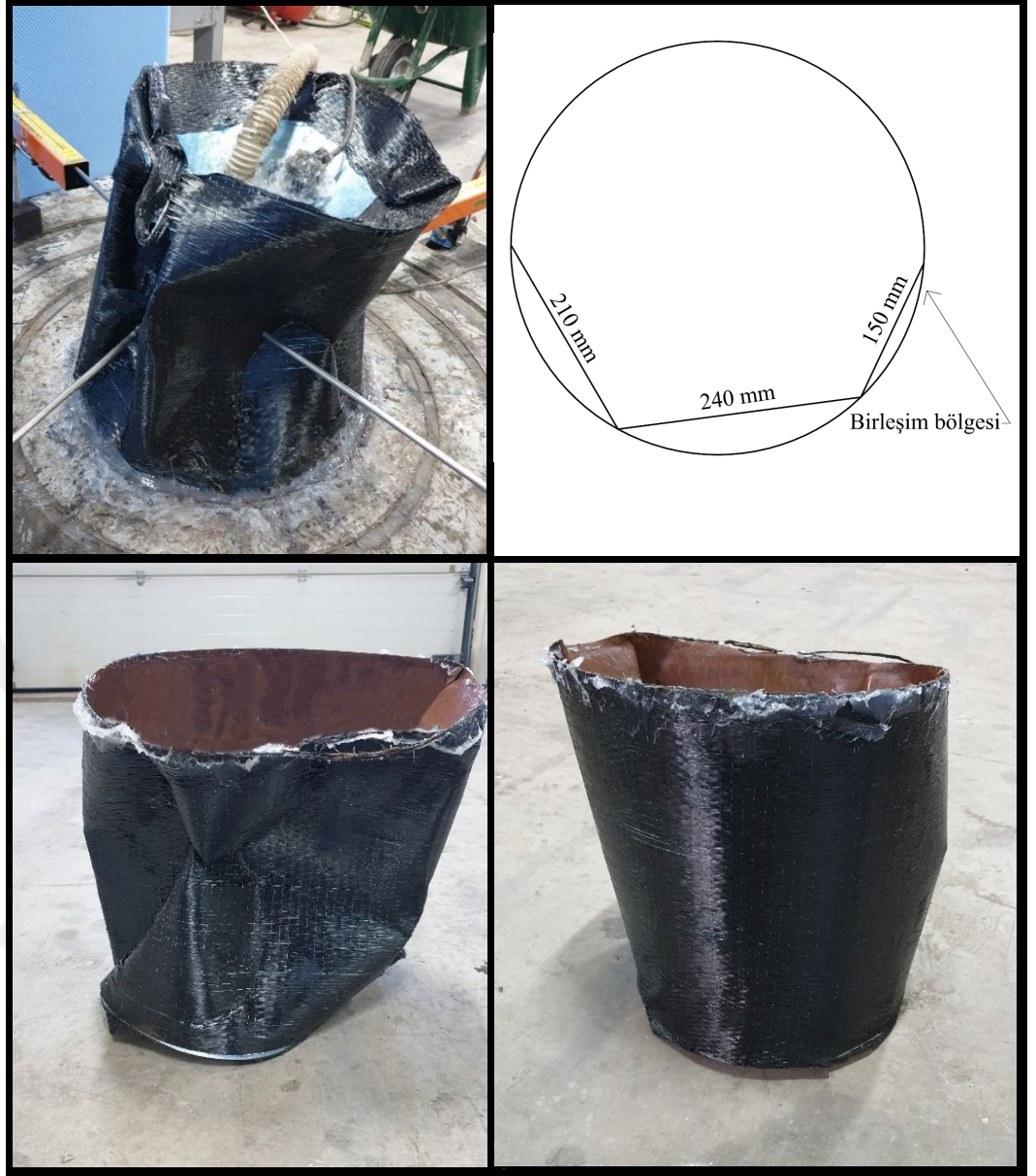
incelenmiştir. LVDT aletleri yerden 200 mm yükseklikte kurulmuştur. Burkulma deneyi esnasında numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonucunda Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri çıkarılmıştır. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde ilk, genel ve göçme burkulması olayları Exp2-P-CFRP numunesine göre daha erken gözlemlenmiştir. İlk ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme görülmüş olup; çatlak veya hava kaçağı gözlemlenmemiş, göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaçağı oluşmuş ve deney numunesi burkulma sonucu dayanımını kaybederek göçmüştür. Çelik tankta gözlemlenen burkulma başlangıcı, tankın birleşim bölgesinden gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. Exp4-%2,5-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.9. Exp4-%2,5-CFRP burkulma değerleri

| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 5,66                     | 10,04          | 17,43            |



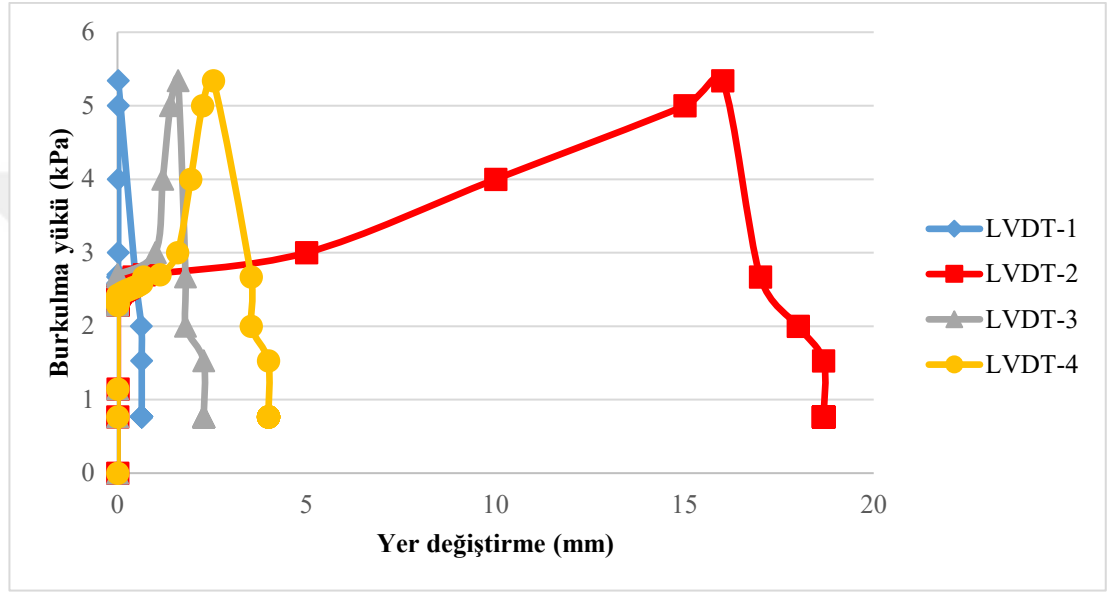
**Şekil 4.9.** Burkulma deneyi sonrası Exp4-%2,5-CFRP numunesi

#### 4.4.3. %5 Korozyonlu ve CFRP'siz deney numunesi (Exp5-%5-P)

Daha yüksek asit yüzdesinden dolayı gerçekleşen korozyon olayının çelik tanklarda burkulma kapasitesini nasıl etkilediğini incelemek için %5 oranında hidroklorik aside maruz kalarak korozyona uğramış ve CFRP'siz olan Exp5-%5-P deney numunesi burkulma deneyine tabi tutulmuştur. LVDT aletleri yerden 200 mm yükseklikte kurulmuştur. Burkulma deneyi sırasında numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılarak incelenmiştir. Deney sonucunda Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

burkulması değerleri çıkarılmıştır. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde, ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri Exp3-%2,5-P numunesiyle kıyaslandığında daha erken gözlemlenmiştir. İlk ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme gözlemlenmiş ve göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaırması gözlemlenmiştir. Çelik tankta gözlemlenen burkulma dalgaları incelendiğinde, birleşim noktasında da burkulma gerçekleştiği tespit edilmiştir.

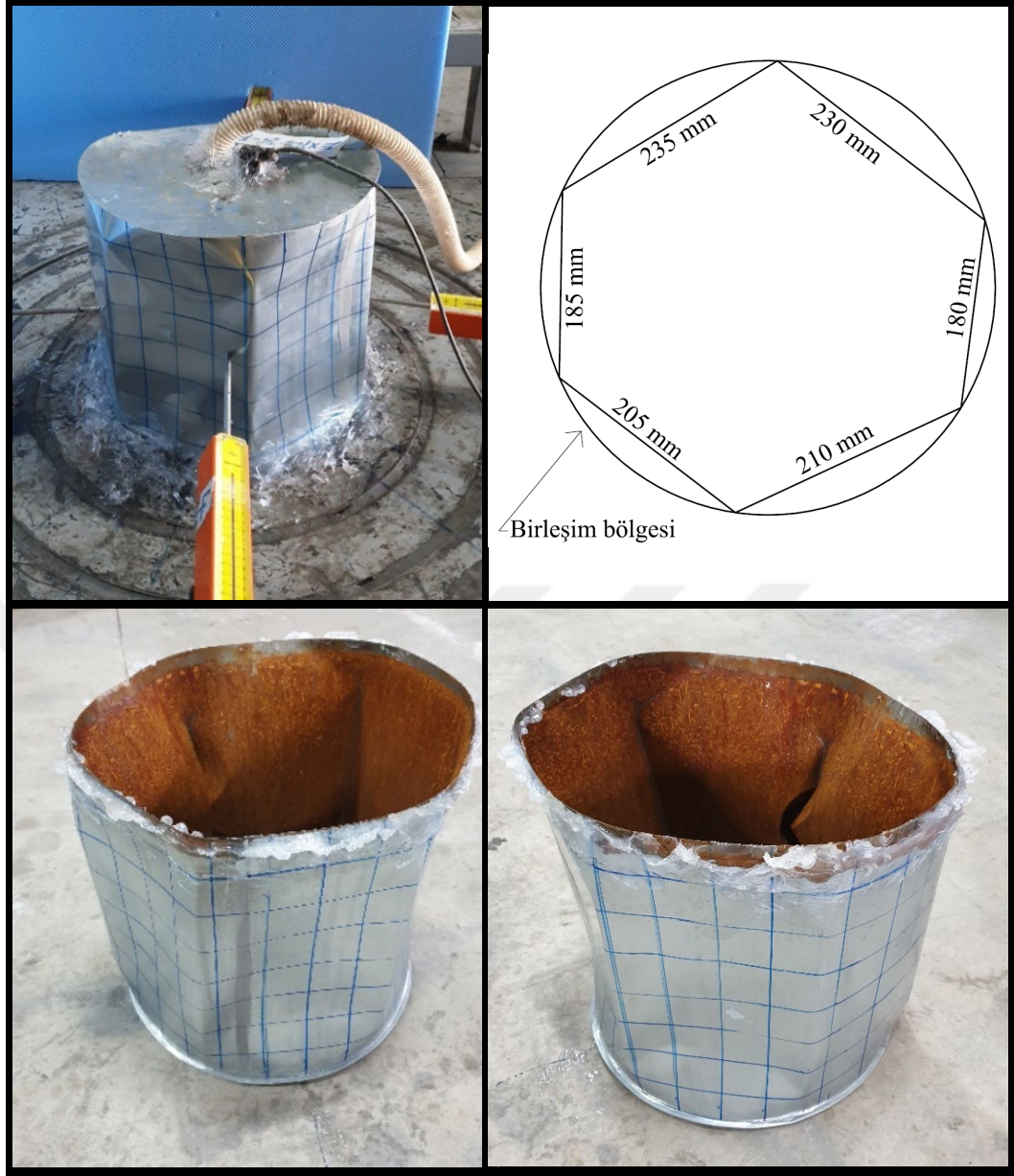


Şekil 4.10. Exp5-%5-P Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.10. Exp5-%5-P burkulma değerleri

| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 2,37                     | 5,33           | 5,33             |



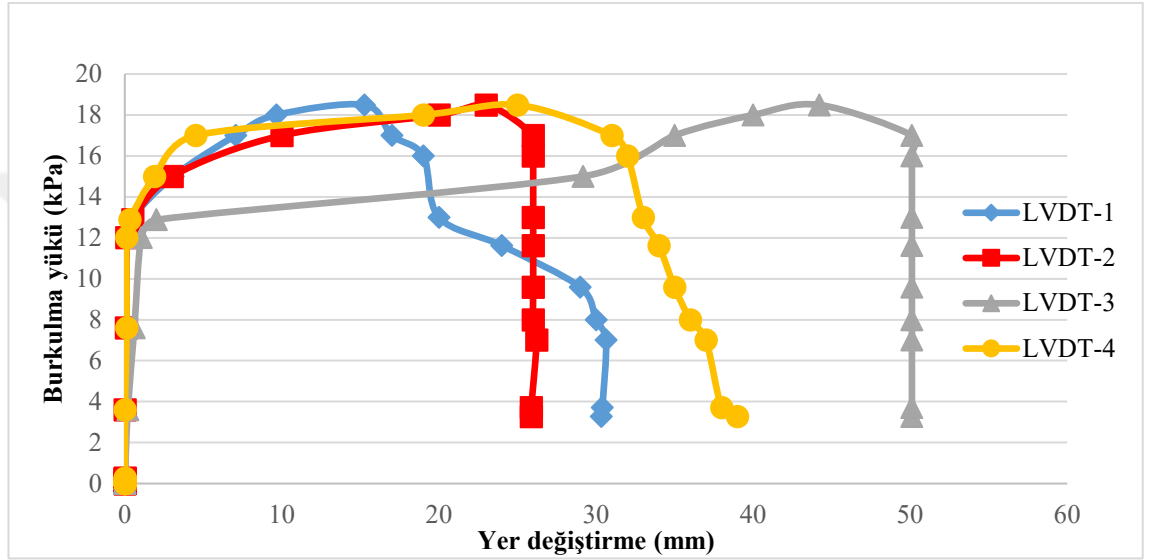


Şekil 4.11. Burkulma deneyi sonrası Exp5-%5-P numunesi

#### 4.4.4. %5 Korozyonlu ve CFRP'li deney numunesi (Exp6-%5-CFRP)

CFRP kullanımının daha yüksek asit yüzdesinden dolayı korozyona uğramış çelik tanklarda burkulma kapasitesini nasıl etkilediğini incelemek için %5 oranında hidroklorik aside maruz kalarak korozyona uğramış ve CFRP'li olan Exp6-%5-CFRP deney numunesi burkulma deneyine tabi tutulmuştur. LVDT aletleri yerden 200 mm yükseklikte kurulmuştur. Burkulma deneyi sırasında numunede gerçekleşen yer değiştirme verileri bilgisayar ortamına aktarılarak incelenmiştir. Deney sonucunda Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği oluşturulmuş, numuneye ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme

burkulması değerleri çıkarılmıştır. Deney sonucunda ortaya çıkan Burkulma yükü- Yer değiştirme verileri incelendiğinde, ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerlerinin Exp5-%5-P numunesine kıyasla daha geç olduğu tespit edilmiştir. Numunede burkulma esnasında dalga oluşumu gözlemlenmemiş olup, kapak kısmından göçme gerçekleşmiştir. İlk ve genel burkulma esnasında numunede şekil değiştirme gözlemlenmiş ve göçme burkulması sonucu çatlak ve hava kaçırmaları gözlemlenmiştir. Çelik tankta gözlemlenen burkulma durumu sadece birleşme bölgesinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Exp6-%5-CFRP Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.11. Exp6-%6-CFRP burkulma değerleri

| Burkulma Değerleri (kPa) |                |                  |
|--------------------------|----------------|------------------|
| İlk burkulma             | Genel burkulma | Göçme Burkulması |
| 12,88                    | 12,88          | 18,49            |



Şekil 4.13. Burkulma deneyi sonrası Exp6-%5-CFRP numunesi

#### 4.5. Deney Verilerinin Teorik Formülasyonlarla Karşılaştırılması

Deneyisel çalışmada kullanılan numunelerinin kritik burkulma değerlerini hesaplamak amacıyla 3 teorik burkulma formülasyonuna başvurulmuştur. Bu formülasyonlar Ross Teorisi, Jawad Teorisi ve Ventsel ve Krauthammer Teorisi olarak seçilmiştir. Bu 3 teoriye göre silindir numunede hesaplanan kritik burkulma yük değerleri, deneyisel çalışmada elde edilen burkulma değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bulunan kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.



Ross Teorisi' ne göre kritik burkulma yükü formülasyonu Eşitlik 4.1' de gösterilmiştir.

$$P_{cr} = \frac{2,6E\left(\frac{t}{d}\right)^{2,5}}{\frac{H}{d}-0,45\left(\frac{t}{d}\right)^{0,5}} \quad (4.1)$$

Jawad Teorisi' ne göre kritik burkulma yükü formülasyonu Eşitlik 4.2' de gösterilmiştir.

$$P_{cr} = \frac{0,92E\left(\frac{t_e}{d}\right)^{2,5}}{\frac{H}{d}-0,45\left(\frac{t}{d}\right)^{0,5}} \quad (4.2)$$

Ventsel ve Krauthammer Teorisi' ne göre kritik burkulma yükü formülasyonu Eşitlik 4.3' te gösterilmiştir.

$$P_{cr} = 0,92 \frac{Et}{L_e} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{1,5} \quad (4.3)$$

$E$ : Elastisite modülü (210 GPa)

$t_e=t$ : Kalınlık (0,45 mm)

$R=r_m=r$ : Yarıçap (200 mm)

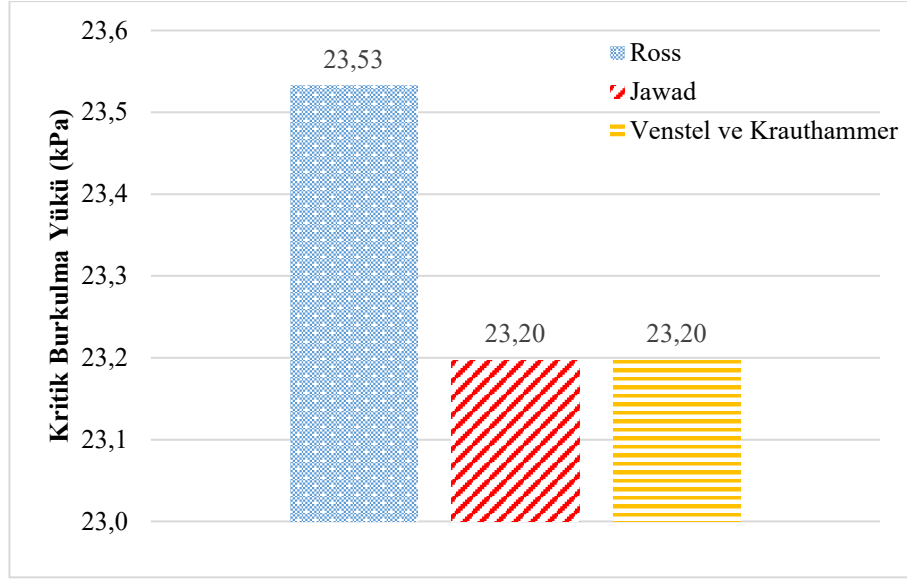
$H=L_e$ : Yükseklik (400 mm)

$d$ : Çap (400 mm)

$P_{cr}$ : Kritik burkulma yükü

**Çizelge 4.12.** Numunelerde hesaplanan kritik burkulma değerleri

| Grup        | Deney Numunesi | Göçme<br>Burkulması<br>(kPa) | Ross Teorisi<br>(kPa) | Jawad<br>Teorisi<br>(kPa) | Ventsel ve<br>Krauthammer<br>Teorisi (kPa) |
|-------------|----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| Korozyonsuz | EXP1-P         | 12,38                        | 23,53                 | 23,20                     | 23,20                                      |
|             | EXP2-CFRP      | 23,11                        |                       |                           |                                            |
| Korozyonlu  | Exp3-%2,5-P    | 10,66                        |                       |                           |                                            |
|             | Exp4-%2,5-CFRP | 17,43                        |                       |                           |                                            |
|             | Exp5-%5-P      | 5,33                         |                       |                           |                                            |
|             | Exp6-%5-CFRP   | 18,49                        |                       |                           |                                            |



**Şekil 4.14.** Teorik formülasyonlara göre kritik burkulma değerleri

Teorik formülasyonlara göre bulunan kritik burkulma yükleri Şekil 4.12’de, teorik burkulma yüklerinin karşılaştırmaları Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Ross Teorisi’ ne göre kritik burkulma yükü 23,53 kPa, Jawad Teorisi ve Ventsel ve Krauthammer Teorisi’ ne göre kritik burkulma yükü 23,20 kPa olarak hesaplanmıştır. Deneysel veriler ve teorik formülasyonlarla hesaplanan değerler karşılaştırıldığında, deneysel verilerin düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Kullanılan teorik formülasyonlar yetersiz kalmıştır.

Burkulma deneyi sonucu deney numunelerinde gerçekleşen dalga sayıları incelenmiş olup, teorik formülasyonla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik verilerin karşılaştırılmasında Eşitlik 4.4’te gösterilen formülasyon kullanılmıştır (Fatemi et al 2013; Teng et al. 2001).

$$n = 2,74 \sqrt{\frac{R}{L} \sqrt{\frac{R}{t}}} \quad (4.4)$$

$n$ : Yaklaşık hesaplanan dalga sayısı

$R$ : Yarıçap (200 mm)

$L$ : Yükseklik (400 mm)

$t$ : Kalınlık (0,45 mm)

Teorik formülasyon kullanarak elde edilen dalga sayıları Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

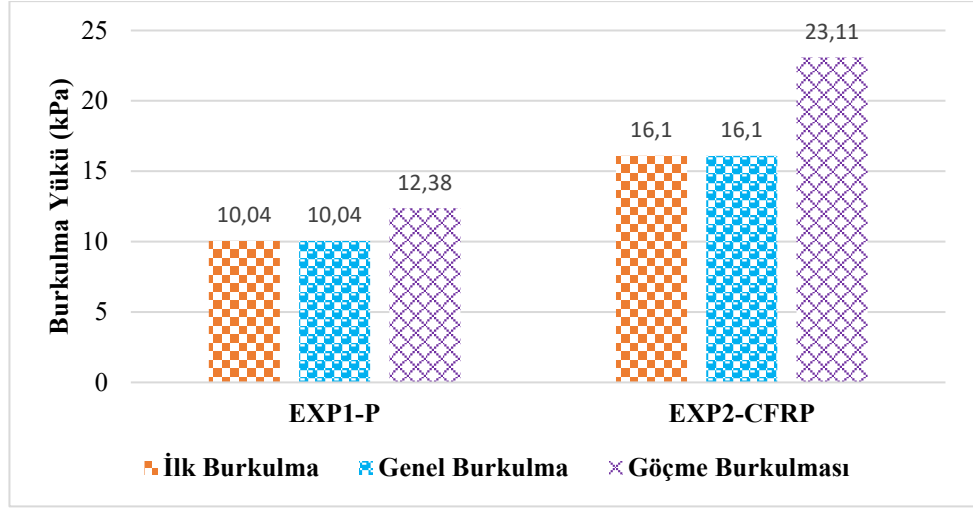
**Çizelge 4.13.** Numunelerde hesaplanan dalga sayıları

| Grup        | Deney Numunesi | Teorik formülasyonla elde edilen yaklaşık dalga sayısı | Deney sonucu gözlemlenen dalga sayısı |
|-------------|----------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Korozyonsuz | EXP1-P         | 8-9                                                    | 7                                     |
|             | EXP2-CFRP      |                                                        | 1                                     |
| Korozyonlu  | Exp3-%2,5-P    |                                                        | 7                                     |
|             | Exp4-%2,5-CFRP |                                                        | 3                                     |
|             | Exp5-%5-P      |                                                        | 6                                     |
|             | Exp6-%5-CFRP   |                                                        | 0                                     |

Teorik ve deneysel dalga sayısı verileri incelendiğinde deneylerde gözlemlenen dalga sayılarının teorik formülasyonlarla elde edilen yaklaşık dalga sayısından düşük çıktığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucu deney numunelerinde oluşan dalga sayılarını hesaplamada kullanılan teorik formülasyon yetersiz kalmıştır.

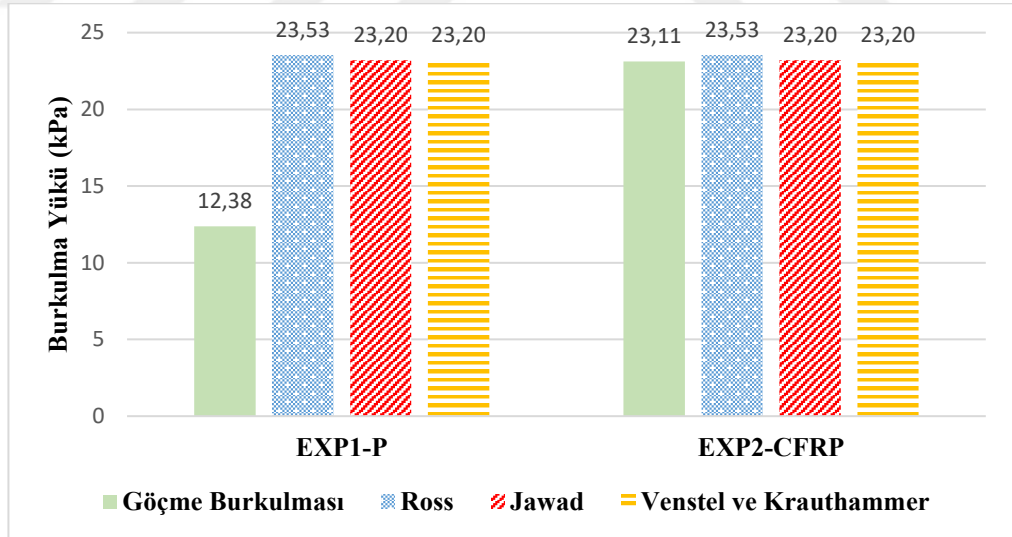
#### 4.5.1. Korozyonsuz grup numunelerinin karşılaştırılması

Burulma deneyi sonucu Exp1-P ve Exp2-CFRP numunelerinde gözlemlenen burkulma yükleri incelendiğinde CFRP kullanılmayan numunede ilk burkulma değeri 10,04 kPa, CFRP kullanılan numunede ilk burkulma değeri ise 16,1 kPa olarak ölçülmüştür. Numunelerin genel burkulma ve göçme burkulması değerlerine bakıldığında genel burkulma değerleri Exp1-P numunesinde 10,04 kPa ve Exp2-CFRP numunesinde 16,1 kPa gözlemlenirken; göçme burkulması değerleri Exp1-P numunesinde 12,38 kPa, Exp2-CFRP numunesinde 23,11 kPa olarak gözlemlenmiştir. Sonuçlarda CFRP kullanımının, korozyonsuz deney numunelerinde göçme dayanımını yaklaşık %87 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Korozyonsuz grubun burkulma değerleri Şekil 4.15' de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Korozyonsuz grup burkulma değerleri

Burkulma deneyi sonucu Exp1-P ve Exp2-CFRP numunelerinde gözlemlenen göçme burkulması değerleri teorik burkulma formülasyonlarıyla elde edilen kritik burkulma değerleriyle karşılaştırıldığında, her iki numunenin göçme burkulma değeri formülasyonlarla elde edilen kritik burkulma yükü değerinden düşük çıkmıştır. Sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.16’ da gösterilmiştir.

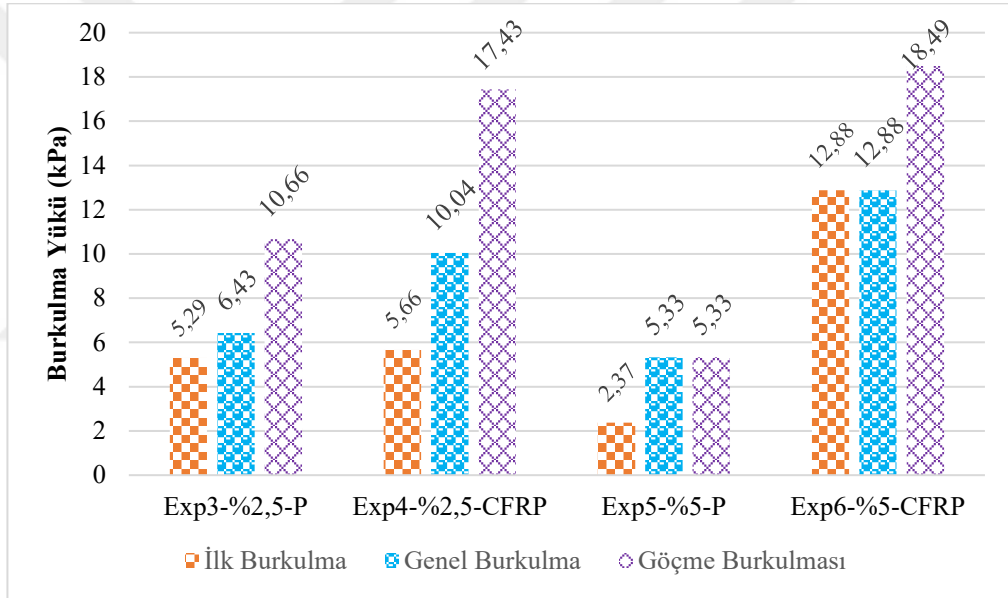


Şekil 4.16. Korozyonsuz grup burkulma değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.5.2. Korozyonlu grup numunelerinin karşılaştırılması

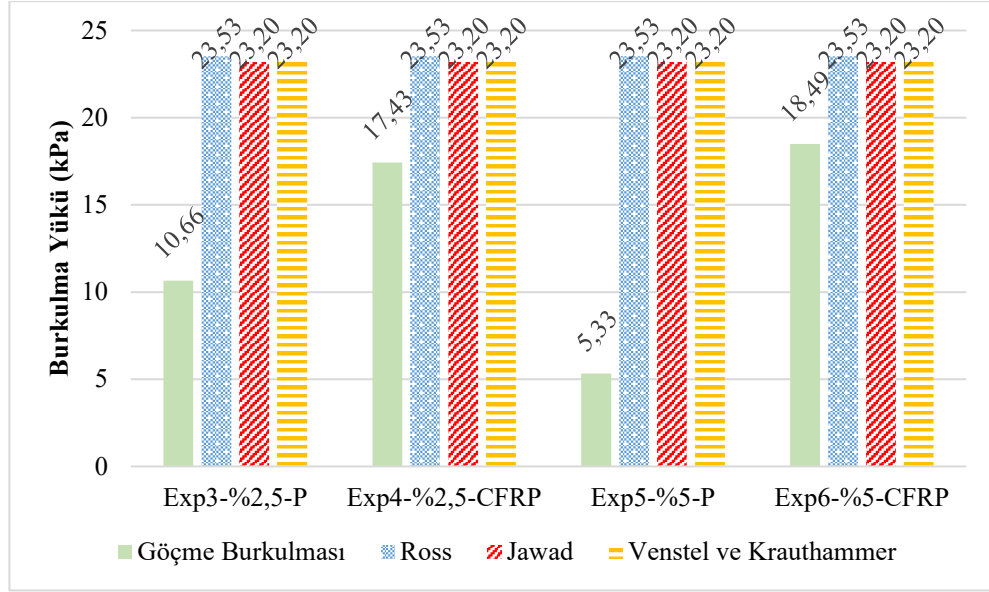
Burkulma deneyi sonucu gözlemlenen burkulma yükleri incelendiğinde ilk burkulma değerleri Exp3-%2,5-P numunesinde 5,29 kPa, Exp4-%2,5-CFRP

numunesinde 5,66 kPa, Exp5-%5-P numunesinde 2,37 kPa ve Exp6-%6-CFRP numunesinde 12,88 kPa olarak ölçülmüştür. Numunelerdeki genel burkulma değerleri incelendiğinde Exp3-%2,5-P numunesinde 6,43 kPa, Exp4-%2,5-CFRP numunesinde 10,04 kPa, Exp5-%5-P numunesinde 5,33 kPa ve Exp6-%6-CFRP numunesinde 12,88 kPa olarak ölçülmüştür. Numunelerdeki göçme burkulması değerleri incelendiğinde Exp3-%2,5-P numunesinde 10,66 kPa, Exp4-%2,5-CFRP numunesinde 17,43 kPa, Exp5-%5-P numunesinde 5,33 kPa ve Exp6-%6-CFRP numunesinde 18,49 kPa olarak ölçülmüştür. Sonuçlarda CFRP kullanımının, %2,5 korozyonlu deney numunesinde göçme dayanımını yaklaşık %64 oranında artırdığını ve %5 korozyonlu deney numunesinde ise %247 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Korozyonlu grubun burkulma değerleri Şekil 4.17’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Korozyonlu grup burkulma değerleri

Burkulma deneyi sonucu Exp3-%2,5-P, Exp4-%2,5-CFRP, Exp5-%5-P ve Exp6-%5-CFRP numunelerinde gözlemlenen göçme burkulması değerleri teorik burkulma formülasyonlarıyla elde edilen kritik burkulma değerleriyle karşılaştırıldığında, Exp4-%2,5-CFRP numunesinin Ross, Jawad ve Ventsel ve Krauthammer teorilerinden elde edilen kritik burkulma değerine yakın olduğu, diğer numunelerin göçme burkulma değerleri ise teorik formülasyonlardan elde edilen kritik burkulma yük değerlerinden düşük çıktığı tespit edilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Korozyonlu grup burkulma değerlerinin karşılaştırılması

### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

6 adet ince cidarlı çelik tank numunesinin burkulma deneyine tabi tutulduğu bu deneysel çalışmada korozyona uğrayan çelik tankların burkulma kapasitesi incelenmiştir. Deney numunesi yüzeyindeki düzensizlikler ölçülmüş olup düzensizliklerin oranı %2-3 aralığında olduğu tespit edilmesinden dolayı düzensizlikler deney sürecinde ihmal edilmiştir. Deney numunelerinden 2 tanesi korozyonsuz incelenmiş olup, numunelerden birisinde CFRP uygulanmazken diğer numunede CFRP uygulanmıştır. Geriye kalan 4 numunede 2 tanesi %2,5 oranında hidroklorik aside, diğer ikisi ise %5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılmıştır. %2,5 ve %5 oranında hidroklorik aside maruz kalan numunelerden birer tanesine CFRP uygulanmıştır. Silindir numunelerinin yüzeyleri üzerindeki düzensizlikler lazer ölçüm cihazı kullanılarak hesaplanmıştır. Deneyden elde edilen veriler ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Korozyona maruz kalan Exp3-%2,5-P numunesinde %6,9 oranında, Exp4-%2,5-CFRP numunesinde %6,3 oranında, Exp5-%5-P numunesinde %9,6 oranında ve Exp6-%5-CFRP silindir numunesinde %10,1 oranında ağırlık kaybı yaşanmıştır. Burkulma deney sonuçları incelendiğinde ağırlık kaybının silindir göçme dayanımı ile ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.
- Korozyonsuz grup numuneleri incelendiğinde Exp1-P numunesinin göçme dayanımı 12,38 kPa, Exp2- CFRP numunesinin göçme dayanımı 17,43 kPa çıktığı gözlemlenmiştir. Bu verilere bakıldığında CFRP kullanımının bu çalışmada kullanılan korozyonsuz deney numunelerinde göçme dayanımını %40 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.
- Korozyonlu grup numuneleri incelendiğinde Exp3-%2,5-P numunesinin göçme dayanımı 10,66 kPa, Exp4-%2,5-CFRP numunesinin göçme dayanımı 23,11 kPa, Exp5-%5-P numunesinin göçme dayanımı 5,33 kPa, Exp6-%5-CFRP numunesinin göçme dayanımı 18,49 kPa çıktığı gözlemlenmiştir. Deney numunelerinde hidroklorik asit oranı %2,5 oranından %5 oranına çıktığında, numunelerin göçme dayanımında yaklaşık %50 oranında azalma gözlemlenmiştir. Hidroklorik asit oranı %2,5 olan numunelerde CFRP kullanımının göçme burkulma dayanımını %116 oranında artırdığı, hidroklorik

asit oranı %5 olan numunelerde ise CFRP kullanımının göçme dayanımını %246 oranında artırdığı tespit edilmiştir.

- Deneyler sonucu elde edilen burkulma yükleri teorik formülasyonlar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Numunelerdeki göçme burkulma değerleri kullanılan teorik formülasyonlar kullanılarak hesaplanan kritik burkulma değerlerinden düşük çıkmıştır. Bu çalışma sonucu deney numunelerinde kritik burkulma değerlerinin hesaplanmasında kullanılan teorik formülasyon yetersiz kalmıştır.
- Numunelerde deneyler sonucu elde edilen dalga sayıları teorik formülasyonla elde edilen yaklaşık dalga sayısı ile karşılaştırılmıştır. Deneyde gözlemlenen dalga sayıları, teorik olarak hesaplanan yaklaşık dalga sayısı değerinden düşük çıkmıştır. Bu çalışma sonucu deney numunelerindeki yaklaşık dalga sayılarının hesaplanmasında kullanılan teorik formülasyon yetersiz kalmıştır.

Diğer çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

- Korozyon ve CFRP etmenlerini de içeren formülasyon üzerinde çalışmaları,
- Daha ekonomik ve daha etkili güçlendirme yöntemlerinin araştırılması,
- Farklı kesitlere sahip numuneler üzerinde çalışılması önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Aghajari, S., Abedi, K. and Showkati, H. 2006. Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 44(8), 904-909.
- Aydin, A. C., Bilen, M. B. and Maali, M. 2021. Effect of mass loss due to corrosion on buckling behavior of thin-walled steel tanks, *International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering (Pace-2021)*. 20-23 June, Ataturk University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Erzurum
- Aydin, A. C., Bilen, M. B. and Maali, M. 2021. Effect of hydrochloric acid corrosion and CFRP coating on the buckling behavior of cylindrical shells under external pressure. *Scientia Iranica*, 9(6), 2886-2901.
- Aydin, A. C., Maali, M., Kilic, M., Bayrak, B., and Akarsu, O. 2023. A numerical perspective for CFRP-wrapped thin-walled steel cylinders. *Steel Construction* 16(4), 227-236.
- Aydin, A. C., Yaman, Z., Agcakoca, E., Kilic, M., Maali, M. and Aghazadeh Dizaji, A. 2020. CFRP effect on the buckling behavior of dented cylindrical shells. *International Journal of Steel Structures*, 20, 425-435.
- Bambach, M. R., Jama, H. H. and Elchalakani, M. 2009. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Structures*, 47(10), 1112-1121.
- Batikha, M., Chen, J. F., Rotter, J. M. and Teng, J. G. 2009. Strengthening metallic cylindrical shells against elephant's foot buckling with FRP. *Thin-Walled Structures*, 47(10), 1078-1091.
- Beaulieu, L. V., Legeron, F. and Langlois, S. 2010. Compression strength of corroded steel angle members. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(11), 1366-1373.
- Bhetwal, K. K. and Yamada, S. 2012. Effects of CFRP reinforcements on the buckling behavior of thin-walled steel cylinders under compression. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 12(01), 131-151.
- Bisagni, C. 2000. Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post-buckling. *Composites Part B: Engineering*, 31(8), 655-667.
- Bisagni, C. and Cordisco, P. 2003. An experimental investigation into the buckling and post-buckling of CFRP shells under combined axial and torsion loading. *Composite Structures*, 60(4), 391-402.
- 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, 106218.

- 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, 1735-1744.
- De Paor, C., Kelliher, D., Cronin, K., Wright, W. M. D., & McSweeney, S. G. 2012. Prediction of vacuum-induced buckling pressures of thin-walled cylinders. *Thin-Walled Structures*, 55, 1-10.
- Dizaji, A. A., Kilic, M., Maali, M. and Aydin, A. C. 2023. Buckling behaviour of dented short cylindrical shells retrofitted with CFRP. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 176(1), 62-75.
- Draidi, Z., Bui, T. T., Limam, A., Tran, H. V. and Bennani, A. 2018. Buckling behavior of metallic cylindrical shell structures strengthened with CFRP composite. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- Elchalakani, M. 2016. Rehabilitation of corroded steel CHS under combined bending and bearing using CFRP. *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 26-42.
- El-Mahdy, G.M., Yassen, A.H. and Khaled, A. 2019. Strengthening of corroded steel structures using CFRP – an experimental review. 17-19 December 2019. *Proceedings of the International Conference on Advances in Steel Structures – Egypt Steel 19 (ES19)*, Cairo, Egypt.
- Fatemi, S. M., Showkati, H. and Maali, M. 2013. Experiments on imperfect cylindrical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 65, 14-25.
- Fakhim, Y. G., Showkati, H. and Abedi, K. 2009. Experimental study on the buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical shells with varying thickness under hydrostatic pressure. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2009) Symposium*, 28 September - 2 October, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, 2511- 2522, Valencia, Spain.
- Fazlalipour, N., Showkati, H., and Ghanbari-Ghazijahani, T. 2022. Experiments on welded shells with section alteration under axial and peripheral pressure. *Journal of Constructional Steel Research*, 193, 107277.
- Ghazijahani, T. G. and Showkati, H. 2013. Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure. *Journal of Constructional Steel Research*, 88, 109-122.
- Ghazijahani, T. G., Jiao, H. and Holloway, D. 2014. Experiments on dented cylindrical shells under peripheral pressure. *Thin-Walled Structures*, 84, 50-58.
- Golzan, B. S. and Showkati, H. 2008. Buckling of thin-walled conical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 46(5), 516-529.

- Guo, J. Q., Fan, D. S., Lai, H. S., Liu, K. L., Guo, Z., Xu, C. and He, B. W. 2019. Novel method to increase the buckling pressure of cylindrical shells under external pressure. *Measurement*, 136, 438-444.
- Haedir, J., & Zhao, X. L. 2011. Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 497-509.
- Hisazumi, K. and Kanno, R. 2019. Buckling behavior and strength of corroded steel shapes under axial compression. In *Proc., Int. Colloquia on Stability and Ductility of Steel Structures: SDSS2019* (pp. 418-491).
- Jawad, M. H. 1994. *Theory and design of plate and shell structures*. Chapman & Hall, 438p, UK.
- Khatuni, S. Y. and Showkati, H. 2019. Buckling behavior of semi-scale steel tank with carbon fiber reinforced polymer ring subjected to lateral uniform pressure loading. *International Journal of Engineering*, 32(10), 1407-1415.
- Kilic, M. 2021. Buckling behavior of nose cone type steel tanks including horizontal imperfection. *International Journal of Steel Structures*, 21(4), 1408-1419.
- Kilic, M. and Cinar, M. 2021. Buckling behavior of sulfate-corroded thin-walled cylindrical steel shells reinforced with CFRP. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 2267-2282.
- Kidane, S., Li, G., Helms, J., Pang, S. S. and Woldeesenbet, E. 2003. Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders. *Composites Part B: Engineering*, 34(1), 1-9.
- Korucuk, F. M. A., Maali, M., Kilic, M. and Aydin, 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.
- Kuppusamy, C. S., Karuppanan, S. and Patil, S. S. 2016. Buckling strength of corroded pipelines with interacting corrosion defects: Numerical analysis. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 16(09), 1550063.
- Maali, M. and Kilic, M. 2020. Post-fire behavior of CFRP retrofitted thin-walled steel tanks. *Fire and Materials*, 44(7), 1013-1028.
- Maali, M., Aydin, A. C., Showkati, H., Sagioglu, M. and Kilic, M. 2018. The effect of longitudinal imperfections on thin-walled conical shells. *Journal of Building Engineering*, 20, 424-441.
- Maali, M., Bayrak, B., Kilic, M., Sagioglu, M. and Aydin, A. C. 2021. Buckling behavior of double-layered composite cylindrical shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104328.
- Maali, M., Bilen, M. B., Simsek, M., and Firouzsalar, S. E. 2023. Buckling response of externally pressurised sealed and retrofitted steel cylindrical shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 202, 104908.

- Maali, M., Kilic, M., Yaman, Z., Agcakoca, E. and Aydin, 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.
- Maali, M., Showkati, H. and Fatemi, S. M. 2012. Investigation of the buckling behavior of conical shells under weld-induced imperfections. *Thin-Walled Structures*, 57, 13-24.
- Mathon, C., and Limam, A. 2006. "Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending" *Thin-Walled Structures*, 44(1), 39-50.
- Meyer-Piening, H. R., Farshad, M., Geier, B. And Zimmermann, R. 2001. Buckling loads of CFRP composite cylinders under combined axial and torsion loading—experiments and computations. *Composite Structures*, 53(4), 427-435.
- Nabati, A. and Ghanbari-Ghazijahani, T. 2020. CFRP-reinforced circular steel tubes with cutout under axial loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 164, 105775.
- 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. H. 2008. Corrosion behavior of mild steel in hydrochloric acid solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 3(7), 806-818.
- Panossian, Z., de Almeida, N. L., de Sousa, R. M. F., de Souza Pimenta, G. and Marques, L. B. S. 2012. Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: A review. *Corrosion Science*, 58, 1-11.
- Pircher, M. and Bridge, R. Q. 2001. Buckling of thin-walled silos and tanks under axial load—some new aspects. *Journal of Structural Engineering*, 127(10), 1129-1136.
- Rahgozar, R., Sharifi, Y. and Malekinejad, M. 2010. Buckling capacity of uniformly corroded steel members in terms of exposure time. *Steel and Composite Structures*, 10(6), 475-487.
- Rahman, M. A., Hossain, M. R. and Ameen, H. 2021. Buckling of thin-walled cylindrical shells made of mild steel due to vacuum and its prevention-experimental study. 13th International Conference on Mechanical Engineering (ICME2019), Dhaka, Bangladesh, AIP Conf. Proc. 2324, 030016-1-030016-7.
- Ross, C.T.F. 2007. A proposed design chart to predict the inelastic buckling pressures for conical shells under uniform external pressure. *Marine Technology and SNAME News*, 44(02), 77-81.

- Sagiroglu, M., Maali, M., Kar, M., and Bilen, M. B. 2023. Cold-formed steel beam-to-column screw connections exposed to high temperatures reinforced with CFRP. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-17.
- Sharifi, Y. and Rahgozar, R. 2010. Evaluation of the remaining lateral torsional buckling capacity in corroded steel members. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 11(11), 887-897.
- Shokrzadeh, A. R. and Sohrabi, M. R. 2016. Buckling of ground based steel tanks subjected to wind and vacuum pressures considering uniform internal and external corrosion. *Thin-Walled Structures*, 108, 333-350.
- Showkati, H. and Shahandeh, R. 2010. Experiments on the buckling behavior of ring-stiffened pipelines under hydrostatic pressure. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(4), 464-471.
- Shuai, Y., Wang, X. H. and Cheng, Y. F. 2020. Modeling of local buckling of corroded X80 gas pipeline under axial compression loading. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103472.
- Song, S. S., Liu, X., Chen, J., Ye, C., Liu, J., and Liu, C. 2022. Compressive behaviour of corroded thin-walled circular section steel stub columns. *Thin-Walled Structures*, 180, 109794.
- Taraghi, P., Showkati, H., and Firouzsalar, S. E. 2019. "The performance of steel conical shells reinforced with CFRP laminates subjected to uniform external pressure" *Construction and Building Materials*, 214, 484-496.
- Taraghi, P., Showkati, H. and Zirakian, T. 2020. Buckling stability performance assessment of CFRP-strengthened conical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 148, 106618.
- Teng, J.G., Zhao, Y. and Lam, L. 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. *Thin-Walled Structures*, 39, 685-707.
- Usman, A. D., Victoria, A. F. and Okoro, L. N. 2016. Weight loss corrosion study of some metals in acid medium. *J. of Advances Chemistry*, 11(2), 3434-3440.
- Ventsel, E. and Krauthammer, T. 2001. *Thin plates and shells: Theory, analysis, and applications*. Marcel and Dekker, 688, USA.
- Zhang, Z., Xu, S. and Li, R. 2020. Comparative investigation of the effect of corrosion on the mechanical properties of different parts of thin-walled steel. *Thin-Walled Structures*, 146, 106450.
- Zhang, Z., Xu, S., Wang, Y., Nie, B. and Wei, T. 2020. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns. *Thin-Walled Structures*, 157, 107108.

Zhao, Z., Jin, Z., Zhang, Z., Liang, B., and Liu, M. 2024. Post-buckling shear capacity of steel plates with opening strengthened by fiber fabric. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108304.

