



**ÇENTİKLİ VE KOROZYONLU İNCE CİDARLI
ÇELİK TANKLARIN BURKULMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Dilek BİTEN

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

**2024
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇENTİKLİ VE KOROZYONLU İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN
BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dilek BİTEN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahyar MAALI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**ÇENTİKLİ VE KOROZYONLU İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN
BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Mahyar MAALI danışmanlığında, Dilek BİTEN tarafından hazırlanan bu çalışma 27 / 12 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mahmut KILIÇ *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Süleyman Nazif ORHAN *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Mahyar MAALI *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

27 / 12 / 2024

İmzası

Dilek BİTEN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇENTİKLİ VE KOROZYONLU İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Dilek BİTEN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI

İnce cidarlı çelik yapılar, yüksek dayanım/ağırlık oranlarıyla bilinse de mekanik ve kimyasal etkenlerden dolayı meydana gelen hasarlara karşı oldukça hassaslardır. Bu tür yapılarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar, yapıların sınırlı kalınlıkları nedeniyle hızlandırılmış bozulmalara yol açabilmekte ve bu da onları korozyon etkilerine karşı savunmasız hale getirmektedir. Bu çalışmada, ince cidarlı, 0.45 mm kalınlığında çelik levhalardan üretilmiş silindirik çelik tankların burkulma kapasitesi üzerindeki korozyon ve çentiklerin birleşik etkileri incelenmiştir. Numuneler, gerçekçi yapısal davranışları yansıtmak amacıyla r/t oranı 445 olacak şekilde hassas bir şekilde üretilmiştir. Bu çalışma, özellikle %2,5 ve %5 hidroklorik asit çözeltilerinin neden olduğu korozyonla ortaya çıkan kimyasal etkileşimlere odaklanılmıştır; bu korozyon oranı, oksidasyon, metal kaybı ve sonuç olarak malzemenin stabilite ve mukavemetinde değişikliklere yol açmıştır. Mekanik kusurları taklit etmek amacıyla, kabuk kalınlığı t'nin bir katı, iki katı ve üç katı derinliklerde çentikler uygulanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen deneysel veriler teorik formülasyonlarla ve literatürdeki bir çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma hem korozyonun hem de çentiklerin çelik kabukların burkulma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını ve bu faktörlerin birleşik etkilerinin yapısal performans üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur.

2024, 60 sayfa

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı silindirler, Burkulma kapasitesi, Hidroklorik asit, Korozyon, Mekanik düzensizlikler

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF THIN-WALLED STEEL TANKS WITH DENTS AND CORROSION

Dilek BİTEN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahyar MAALI

Thin-walled steel structures, known for their high strength-to-weight ratios, are highly susceptible to damage caused by mechanical and chemical factors. The chemical reactions occurring in such structures can lead to accelerated degradation due to their limited thickness, leaving them particularly vulnerable to the effects of corrosion. This study investigates the combined effects of corrosion and dents on the buckling capacity of thin-walled cylindrical steel tanks fabricated from 0.45 mm thick steel sheets. The specimens were precisely manufactured to achieve an r/t ratio of 445, ensuring realistic structural behavior. The study particularly focused on the chemical interactions resulting from corrosion induced by 2.5% and 5% hydrochloric acid solutions. This corrosion led to oxidation, material loss, and ultimately, changes in the stability and strength of the material. To simulate mechanical imperfections, dents with depths equal to one, two, and three times the shell thickness were applied. Additionally, the experimental results obtained in this study were compared with theoretical formulations and a previous study from the literature to evaluate the accuracy and applicability of these approaches. The findings revealed that both corrosion and dents significantly reduced the buckling capacity of the steel shells, highlighting the critical role of these combined factors in influencing structural performance.

2024, 60 page

Keywords: Thin-walled cylinders, Buckling capacity, Hydrochloric acid, Corrosion effect, Mechanical imperfections.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanması ve yürütülmesi sürecinde bilgi birikimi, tecrübeleri ve rehberliğiyle bana yol gösteren, sabır ve hoşgörüsüyle her zaman destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyler sürecinde desteğini esirgemeyen Araştırma Görevlisi Mahmut Buğra BİLEN'e minnettarlığımı sunarım. Ayrıca çalışmalarında bana sürekli destek olan ve her zaman yanımda olan ekip arkadaşlarım Yasin TİZİ, Nurullah ÇINAR ve Ömer KARADAĞ'a teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olan, destekleri ve kadim dostluklarıyla çalışmalarımı daha anlamlı hale getiren sevgili arkadaşlarım Emine SARAÇ'a ve Zehranur Bayrak'a gönülden teşekkür ederim. Bu zorlu süreçte moral ve motivasyon kaynağım olmuş, bana verdikleri destekle bu çalışmanın tamamlanmasına önemli katkılarda bulunmuştur.

Bu çalışmanın her aşamasında bana sevgisiyle, desteğiyle güç veren, sabırlarıyla her zaman yanımda olan değerli babam, canım annem ve sevgili kardeşlerime en derin teşekkürlerimi sunarım. Onların bana sunduğu manevi destek, bu süreçte en büyük dayanağım olmuştur. Varoluşlarıyla her an bana güç vermiş, bu zorlu yolculukta yalnız bırakmamışlardır. Sonsuz teşekkür ederim.

Dilek BİTEN
Aralık 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
3. MATERYAL ve YÖNTEM	17
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	17
3.2. Deneylerin Yapılışı	19
3.3. Deneyde Kullanılan Malzemeler	24
3.3.1. Hidroklorik asit	24
3.3.2. Foamboard levha.....	25
3.3.3. LVDT cihazı.....	25
3.3.4. Veri toplama cihazı (Data logger).....	26
3.3.5. Vakum pompası	27
3.3.6. Lazerli ölçüm cihazı.....	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	30
4.1. Silindirlerin Korozyona Maruz Bırakılması	30
4.2. Silindirlerin Burkulma Testeleri	31
4.2.1. Korozyonsuz grup	32
4.2.1.1. Korozyonsuz ve 1t çentikli deney numunesi (P-1t)	32
4.2.1.2. Korozyonsuz ve 2t çentikli deney numunesi (P-2t)	34
4.2.1.3. Korozyonsuz ve 3t çentikli deney numunesi (P-3t)	35
4.2.2. Korozyonlu grup	37
4.2.2.1. %2,5 korozyonlu ve 1t çentikli deney numunesi (%2,5-1t).....	37
4.2.2.2. %2,5 korozyonlu ve 2t çentikli deney numunesi (%2,5-2t).....	39
4.2.2.3. %2,5 korozyonlu ve 3t çentikli deney numunesi (%2,5-3t).....	40
4.2.2.4. %5 korozyonlu ve 1t çentikli deney numunesi (%5-1t).....	42

4.2.2.5. %5 korozyonlu ve 2t çentikli deney numunesi (%5-2t).....	44
4.2.2.6. %5 korozyonlu ve 3t çentikli deney numunesi (%5-3t).....	45
4.2.3. Korozyon ve çentiğin silindir numuneleri üzerindeki etkisi	47
4.3. Silindir Numunelerinin Karşılaştırılması	48
4.4. Deney Verilerinin Teorik Formülasyonlarla Karşılaştırılması	49
4.5. Deney Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması	53
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	57



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°	Derece
%	Yüzde
C	Celcius
d	Silindir çapı
E	Elastisite modülü
kPa	Kilopascal
kg	Kilogram
H	Silindir yüksekliği
HCL	Hidroklorik asit
g	gram
mm	Milimetre
n	Silindirde oluşan dalga sayısı
P_{cr}	Kritik burkulma yükü
pH	Power of hydrogen (hidrojenin gücü)
R	Silindir yarıçapı
t	Silindir et kalınlığı

Kısaltmalar

LVDT	Doğrusal değişken deplasmanlı transformatör
CFRP	Karbonfiber takviyeli polimer
TNT	Trinitrotoluen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örnek çelik silindirik yapı	1
Şekil 1.2. Örnek çelik silindirik depolama tankı.....	2
Şekil 1.3. Örnek korozyona uğramış çelik silindirik silo.....	3
Şekil 1.4. Örnek çelik silindirik depolama siloları.....	4
Şekil 1.5. Örnek çelik silindirik silolar.	5
Şekil 3.1. Silindir numunesi.	17
Şekil 3.2. Numunelerdeki çentiklerin geometrik özellikleri	19
Şekil 3.3. Deney düzeneği	19
Şekil 3.4. Hidrolik aside maruz bırakılmış numune.....	20
Şekil 3.5. Deneye hazırlanan numunenin silikon ile sabitlenmesi.....	21
Şekil 3.6. Vakum pompasının numuneye silikon ile sabitlenmesi.....	22
Şekil 3.7. Deney düzeneğine yerleştirilmiş numune.....	22
Şekil 3.8. Hazırlanan silindir numunesi	23
Şekil 3.9. Hidroklorik asit.	24
Şekil 3.10. Foamboard	25
Şekil 3.11 LVDT ölçüm cihazı	26
Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan veri toplama cihazı	26
Şekil 3.13. Vakum pompası	27
Şekil 3.14. Lazerli ölçüm cihazı.....	28
Şekil 3.15. Silindirlerin farklı yüksekliklerde ölçülen geometrik kusur değeri grafiği ..	29
Şekil 4.1. P-1t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....	32
Şekil 4.2. P-1t deney numunesi.....	33
Şekil 4.3. P-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği	34
Şekil 4.4. P-2t deney numunesi.....	35
Şekil 4.5. P-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği	36
Şekil 4.6. P-3t deney numunesi.....	36
Şekil 4.7. %2,5-1t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....	38
Şekil 4.8. %2,5-1t deney numunesi.....	38
Şekil 4.9. %2,5-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği	39
Şekil 4.10. %2,5-2t deney numunesi.....	40
Şekil 4.11. %2,5-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği	40

Şekil 4.12. %2,5-3t deney numunesi.....	41
Şekil 4.13. %5-1t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....	43
Şekil 4.14. %5-1t deney numunesi.....	43
Şekil 4.15. %5-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....	44
Şekil 4.16. %5-2t deney numunesi.....	45
Şekil 4.17. %5-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği.....	46
Şekil 4.18. %5-3t deney numunesi.....	46
Şekil 4.19. Çentik kalınlığı ve korozyon yüzdesinin karşılaştırmalı olarak burkulma yüklerine etkisi	48
Şekil 4.20. Deney sonucu burkulma değerlerinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.21. Deney sonucu oluşan dalgalar	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Silindir numunelerinin özellikleri	18
Çizelge 3.2. LVDT cihazlarının yerden yükseklikleri	23
Çizelge 4.1. Numunelere ait ağırlık değişimleri	30
Çizelge 4.2. Numunelere ait burkulma değerleri	31
Çizelge 4.3. Korozyonlu deney numunelerinin isimleri	37
Çizelge 4.4. Göçme burkulma değerlerinin teorik değerlerle karşılaştırılması	50
Çizelge 4.5. Deney sonucu oluşan dalga sayılarının karşılaştırılması	52
Çizelge 4.6. Çentikli ve çentiksiz numunelerin karşılaştırılması	54



1. GİRİŞ

Çelik, yüksek dayanım-ağırlık oranı ve dayanıklılığı sayesinde endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir (Demeri 2013). Bu özellikleriyle depolama, taşıma ve çeşitli üretim süreçlerinde yoğun olarak kullanılan çelik tanklar, özellikle ince cidarlı silindirik formlarıyla hem ekonomik hem de yapısal verimlilik sağlar (Saifi et al. 2024). Ancak, bu tür ince cidarlı çelik elemanlar, malzemenin dayanımını tehdit eden çeşitli olumsuz etkilere de açıktır. Özellikle çentikler ve korozyon, tankların yük taşıma kapasiteleri üzerinde belirgin zayıflıklara neden olmaktadır. Çentik varlığı, tanklarda gerilme yığılmalarına yol açarken; çevresel koşullarla temas eden çelik yüzeylerde korozyon gelişimi, malzeme kaybı ve deformasyon riskini artırır.



Şekil 1.1. Örnek çelik silindirik yapı

İnce cidarlı çelik tanklarda burkulma davranışı günümüzde çalışma alanı olmaya devam etmektedir. Özellikle yapısal mühendislikte bu malzemelerde çentik oluşumu ve korozyon etkisi gözlemlenmektedir (Fridman et al. 2024). İnce cidarlı tanklar, sıvıların depolanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan depolama ve basınçlı kaplar olarak, güvenlik ve dayanıklılık açısından kritik öneme sahiptir. Bu tanklar, özellikle petrol, kimya, enerji ve su arıtma gibi

1. GİRİŞ

sektörlerde sıvı ve gaz depolama amacıyla tercih edilmektedir. Ancak, bu yapıların güvenli kullanımı, tasarım ve imalat süreçlerinde karşılaşılan zorlukların yanı sıra, zamanla oluşabilecek mekanik hasarlar ve çevresel etkilerle de yakından ilişkilidir (Baddoo 2008). Yapısal bütünlüklerini korumak ve arızaları önlemek büyük önem taşımaktadır. Burkulma olayı, geometrik kusurlar, korozyon nedeniyle malzeme bozulması ve rüzgâr veya sismik yükler gibi dış basınç dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir.

Bu tankların burkulma davranışını etkileyen önemli bir faktör, çentiklerin varlığıdır. Çentikler, ince cidarlı yapıların burkulma kapasitesini önemli ölçüde azaltan geometrik kusurları ortaya çıkarabilmektedir. Çentikler, üretim hataları, montaj sırasında yapılan yanlışlıklar veya operasyonel süreçlerde meydana gelen hasarlar nedeniyle tank yüzeylerinde oluşabilmektedir. Bu tür lokal geometrik kusurlar, tankın yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde etkileyebilmekte ve burkulma davranışını olumsuz yönde değiştirebilmektedir. Çentikli silindirik çelik kabukların aksenal basınç altındaki stabilite davranışında bu tür kusurlar, hasar görmemiş yapılarda gözlemlenenlerden farklı kritik burkulma modlarına yol açabilmektedir (Pourkhorshidi and Abedi. 2017). Ayrıca, silindirik tankların burkulma davranışları, tank yapılarının tasarım ve değerlendirme sürecinde çentiklerin dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır (Shokrzadeh et al. 2020).



Şekil 1.2. Örnek çelik silindirik depolama tankı

Korozyon, ince cidarlı çelik tankların bütünlüğünü tehlikeye atan bir diğer kritik faktördür. Korozyon, farklı malzemelerde ve ortamlarda çeşitli şekillerde gerçekleşebilir. Korozyon tank malzemesinin zamanla zayıflamasına ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesinin azalmasına neden olur (Maali et al. 2024). Korozyonun tank yüzeyine yayılması, yerel incelmelere ve çentiklere ek olarak, tankın genel mukavemetini etkileyen önemli bir faktördür (Shreir 2013). Korozyon çeşitlerinden genel korozyon, metal yüzeyinin tümünde homojen bir şekilde aşınma meydana getirir, bu da metalin eşit hızda aşınmasına neden olur. Galvanik korozyon ise, iki farklı metalin ortak bir elektrolit içinde bulunmasıyla ortaya çıkar ve bu durumda bir metal diğerine göre daha hızlı bir şekilde aşınır. Çukur korozyonu, metal yüzeyinde lokal çukurların oluşmasına yol açar ve bu durum ileri seviyede malzemenin delinmesine neden olabilir. Çatlak korozyonu, metal yüzeylerinde oksijen ve nemin sınırlı hareketiyle meydana gelir, genellikle metal parçalarının temas ettiği veya kapalı bölgelerde görülür. Erozyonlu korozyon ise, korozyon ve mekanik aşınmanın birleşik etkisi sonucu malzemede bozulma meydana getirir.



Şekil 1.3. Örnek korozyona uğramış çelik silindirik silo

İç ve dış korozyonun etkileri, bu yapıların yük taşıma kapasitesinde önemli azalmalar meydana getirebilmektedir. Özellikle, rüzgâr ve vakum basınçlarına maruz kalan, çelik tankların burkulma davranışında korozyon, tankların rüzgâr yükleri gibi diğer

stres etkenleriyle birleştğinde burkulmaya karşı olan savunmasızlığı daha da artabilmektedir (Shokrzadeh and Sohrabi. 2016). Bununla birlikte korozyonu sadece malzeme özelliklerini değil, aynı zamanda dış basınçlar altında burkulma davranışını da değiştirmekte; bu sebeple korozyonla ilişkili riskleri azaltmak için çelik tankların düzenli bakımı önem teşkil etmektedir (Aydın et al. 2021). Bunun yanı sıra, bu tankların burkulma davranışı dış çevresel faktörlerden de etkilenmektedir. Rüzgâr yükü altında silindirik çelik tanklar ince cidarlı yapıları nedeniyle burkulmaya duyarlıdır (Zeybek et al. 2021). Bu çalışmalar, ince cidarlı tanklarda burkulma davranışının çok yönlü doğasını topluca göstermekte olup, çeşitli yükleme koşulları ve malzeme bozulmalarını dikkate alan kapsamlı bir tasarım ve analiz yaklaşımını gerekli kılmaktadır.



Şekil 1.4. Örnek çelik silindirik depolama siloları

Yapılan araştırmalarda, çentik gibi geometrik kusurların ince cidarlı yapılardaki burkulma davranışını ve gerilim dağılımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Çentikler silindirik kabuklarda burkulma kapasitesinin azalmasına yol açabilmekte ve bu durumda çentiğin derinliği ve konumu gibi faktörler rol oynamaktadır (Fazlalipour et al. 2022; Krasovsky and Evkin, 2021).

Deneysel çalışmalar, çentik varlığının belirgin olarak burkulma yüklemesine yol açtığını ve genellikle kusursuz kabuklara kıyasla daha düşük ilk burkulma yüklerine neden olduğunu ortaya koymaktadır (Krasovsky and Evkin, 2021). Çentikli bölgelerde gerilme konsantrasyonları belirgin şekilde daha yüksek olmakta ve bu durum çentik boyutlarını gerilme konsantrasyonu katsayılarıyla ilişkilendiren matematiksel modellerle ölçülebilmektedir (Suleimenov et al. 2022). Kasıtlı ve kasıtlı olmayan kusurların birbirleriyle etkileşimi, burkulma dayanımının değerlendirilmesini karmaşık hale getirmekte ve yapısal davranışları doğru şekilde tahmin edebilmek için ileri düzey sonlu eleman analizlerini zorunlu kıldığı belirtilmiştir (Musa et al. 2021).



Şekil 1.5. Örnek çelik silindirik silolar

Çelik tanklarda oluşan bu yapısal zayıflıkların güvenlik ve çevresel etkiler açısından önemli sonuçlar doğurabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, çentik ve korozyon etkilerinin ayrıntılı olarak araştırılması, tankların servis ömrü ve güvenli kullanımı için kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli seviyelerde çentik ve korozyona maruz bırakılan ince cidarlı silindirik çelik tankların burkulma dayanımları incelenerek; farklı hasar türlerinin tank performansına olan etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Attia et al. (2024) çalışmalarında, konik kabukların geniş bir yükleme koşulunda geometrik olarak doğrusal olmayan davranışını tahmin etmek için yeni bir sonlu eleman formülasyonu sunmuşlardır. Formülasyonu, Love-Kirchhoff ince kabuk teorisi ve Saint-Venant-Kirchhoff yapısal modeli temelinde geliştirmiş ve eksenel simetri özelliğinden faydalanarak çevresel yönde yer değiştirmeleri Fourier serisiyle ifade etmişlerdir. Çalışmanın, kabukların eksenel ve eksenel olmayan yükleme koşullarındaki doğruluğunu minimal serbestlik derecesi ile göstererek hesaplama verimliliğini artırdığını belirtmişlerdir. Sonuçlarda, eksenel simetrik yüklemelerde tek bir Fourier terimi yeterli iken eksenel olmayan durumlarda dört terim gerektirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, farklı yükleme durumlarında iç ve dış yüzeylerde meridyenle ve çevresel gerilme dağılımlarının karakteristik davranışları tespit etmişlerdir.

Maali et al. (2024), ince cidarlı çelik tanklarda korozyon ve CFRP güçlendirmesinin burkulma dayanımına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı HCl konsantrasyonlarında (%2,5 ve %5) korozyona uğratılmış ve CFRP ile güçlendirilmiş altı numune test edilmiştir. Bulgular, korozyon oranı arttıkça burkulma dayanımının azaldığını, ancak CFRP güçlendirmesinin bu kaybı önemli ölçüde telafi ettiğini göstermektedir. Ayrıca, deneysel burkulma yüklerinin teorik hesaplamalara göre daha düşük olduğu bulunmuş, bu sapmanın geometrik kusurların etkisinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Ren et al. (2024) çalışmalarında uzay ve havacılık alanında kullanılan ince cidarlı yapılar için rijitlik artırma yöntemlerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Pasif rijitlik artırma yöntemleri olarak, ince cidarlı yapılar için lamine plaka tasarımı ve takviye uygulamaları ele alınmış; aktif rijitlik artırma yöntemleri olarak ise şekil hafızalı alaşımlar ve piezoelektrik malzemeler gibi akıllı malzemeler incelenmiştir. Akıllı malzemelerle rijitlik artırmanın sınırlamaları ve uygulama potansiyeli vurgulanmış, bu teknolojinin gelecekte uçuş güvenliği ve manevra kabiliyetini artırmada önemli rol oynayacağı belirtilmiştir. Çalışma, ince cidarlı yapıların rijitlik artırma tekniklerinin mühendislik uygulamalarına geçişini hızlandırmayı amaçlamaktadır.

Saifi et al. (2024) çalışmalarında, ince cidarlı yatay su depolama tankının patlama yükleri altındaki dinamik tepkisini sayısal yöntemlerle araştırmışlardır. 50 kg-TNT eşdeğeri patlayıcının etkisiyle su dolu tankın deformasyon ve hasar seviyesinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu azaltmanın başlıca nedeni, tank içerisindeki suyun "ek kütle" etkisi yaratarak patlama sırasında yapısal dayanımı artırması olarak açıklanmıştır. Su seviyesinin artmasıyla birlikte tankın patlamalara karşı dayanıklılığının da arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, endüstriyel ortamlarda güvenlik ve dayanıklılığı artırmak amacıyla su dolu tank kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Zhang et al. (2024) çalışmalarında, metal astarlı kompozit sarımlı basınçlı kaplarda (COPV) metal astarın kritik burkulma basıncının belirlenmesi ve bu basıncın güvenlik faktörüne etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Teorik bir model oluşturularak, metal astarın burkulma dayanımı hesaplanmış ve fiber sarımlı ince cidarlı bir COPV üzerinde basınç denemeleri yapılmıştır. Bulgular, yüksek akma dayanımına sahip metal astarların fiber sarım katmanlarının daha yüksek bir kullanım oranına sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tasarım standartlarının burkulma hasarını dikkate almadığı vurgulanmış ve önerilen modelin COPV tasarımında belirsizlikleri azaltabileceği belirtilmiştir.

Aydin et al. (2023) çalışmalarında, hidrostatik basınca maruz kalan çelik silindirik kabukların karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kaplamalarla güçlendirilmesi durumunda burkulma davranışını incelemişlerdir. Bu araştırmada, farklı göçük sayısı, derinliği ve genişliğine sahip 12 silindirik model ile iki mükemmel modelin (CFRP ile ve CFRP'siz) analiz edildiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, göçük sayısı ve derinliği arttıkça ilk burkulma yüklerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, CFRP kaplamanın kritik burkulma dayanımını artırdığı ve etkili bir güçlendirme yöntemi sunduğu sonucuna varmışlardır. Elde ettikleri ana bulgular arasında, CFRP'nin hem ilk hem de genel burkulma kapasitesini artırdığı, göçük sayısı ve derinliğinin ise burkulma dayanımını genellikle olumsuz etkilediği yer almıştır. Ayrıca, belirli koşullarda göçük sayısının dayanımı artırabildiğini de fark etmişlerdir. Bu sonuçlar, CFRP kaplamaların, çelik silindirik kabukların burkulma dayanımını artırmada önemli bir çözüm olduğunu göstermiştir.

Maali et al. (2023), çelik silindirik kabukların burkulma tepkisini deneysel olarak üç farklı durumda karşılaştırmışlardır: güçlendirilmemiş veya sızdırmazlık sağlanmamış, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş ve sızdırmazlık sağlanmış kabuklar. Yarıçap/kalınlık oranı 445 olan kabuklar, farklı yükseklik/yarıçap oranları (2, 4 ve 6) ile hazırlanarak dış basınç altında test edilmiştir. Deney sonuçları, kabuk yüksekliği arttıkça burkulma kapasitesinin azaldığını göstermiştir. CFRP ile güçlendirilmiş kabuklar, başlangıç ve genel burkulma yüklerini önemli ölçüde artırmış, ancak sızdırmazlık yalnızca başlangıç burkulma yükünde etkili olmuştur. Güçlendirilmemiş ve sızdırmazlık yapılmış kabuklar burkulma sonrası bir tepki sergilerken, CFRP ile güçlendirilmiş kabuklarda ani bir göçme meydana gelmiş ve burkulma sonrası bir yanıt gözlemlenmemiştir.

Sagiroglu et al. (2023) çalışmalarında, yüksek sıcaklıklara maruz kalan soğuk şekillendirilmiş çelik kiriş-kolon vida bağlantılarının CFRP ile güçlendirilmiş deneysel davranışını sekiz testle incelemişlerdir. Kiriş elemanları, oda sıcaklığından 600 °C'ye kadar ısıtılmış, bu sıcaklıkta 5 saat bekletilmiş ve ardından CFRP ile güçlendirilmeden önce oda sıcaklığına soğutulmuştur. Sonuçlar, destekleyici kullanılmayan kirişlerde, destekleyici kalınlığının artırılmasının bağlantının moment, sertlik ve dönme değerlerini düşürdüğünü, ancak kirişin döngüsellikini artırdığını göstermiştir. CFRP'nin kullanımı, kirişin burkulmasını azaltırken, kirişin kalınlığının, destek kalınlığından fazla olduğu durumlarda vida kırılmasına neden olan çökme modlarına yol açtığı tespit edilmiştir. Çalışma, CFRP'nin malzemenin güçlendirilmesi ve yeniden kullanımının, yangın sonrası hasar gören CFS kirişlerinin değiştirilmesinin maliyetini ve zamanını azaltabileceğini önermişlerdir.

Aydin et al. (2022) çalışmalarında, ince cidarlı silindirik kabukların dış basınç altında korozyon etkisiyle burkulma kapasitelerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Silindirik kabukların, düşük pH değerine sahip sıvılarla dolduğunda korozyona uğradığını ve bu durumun kabukların kalınlığını azaltarak burkulma kapasitelerini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Araştırmada, kabukları %5 ve %10 HCl çözeltileriyle yarım veya tamamen doldurularak korozyona maruz bırakmışlardır. Korozyonun olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla kabukları farklı boyutlarda Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP) tabakalarıyla kaplamışlardır. Toplam 12 model üzerinde deneysel testler yapmışlar ve

korozyona uğramamış modellerle kıyaslama yapmışlardır. Sonuçlar, korozyonun ince cidarlı silindirik kabukların burkulma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, asit oranı, dolum miktarı ve CFRP kaplamalı yüzey alanının burkulma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği bulmuşlardır. CFRP ile kaplanan modellerde, burkulma kapasitesindeki kaybın azaldığını ve silindirik kabukların sünekliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Fazlalipour et al. (2022) araştırmalarında eksenel ve üniform çevresel basınca maruz kalan ince çelik silindirik kabukların etkileşimini incelemişlerdir. Araştırmalarını deneysel bir yöntemle gerçekleştirdiklerini ve elde ettikleri verileri tasarım standartları ile teorik analizlerle karşılaştırdıklarını ifade etmişlerdir. Deney numunelerinde, silo gibi depolama yapılarında görülebilecek kalınlık değişimlerini uyguladıklarını dile getirmişlerdir. Eksenel yükü tüm numunelere sabit bir ön yükleme olarak uyguladıklarını, ardından üniform basıncı kademeli olarak artırarak burkulma ve çökme davranışlarını gözlemlediklerini aktarmışlardır. Sonuçlarının, kabukların kapasitelerinin incelik oranına bağlı olarak değiştiğini gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Aydın et al. (2021), ince cidarlı çelik tanklarda hidroklorik asit (HCl) içeren çözeltilerin korozyon yoluyla burkulma davranışına etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, 800x400x0,45 mm boyutlarındaki dört çelik tank farklı asit oranlarına (%5 ve %10 HCl) sahip çözeltilerle doldurularak 24 saat boyunca korozyona maruz bırakılmıştır. Araştırmacılar, korozyon nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybını ve bu kaybın burkulma davranışına etkilerini analiz etmişlerdir. Sonuçlar, tanklardaki doluluk oranı ve çözelti içerisindeki asit oranı arttıkça korozyonun ve burkulma hasarının belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Özellikle yüksek asit oranına ve tam doluluk seviyesine sahip tanklarda daha fazla burkulma dalgası olduğu tespit edilmiştir. Tam dolu tanklarda asit oranının %5'ten %10'a çıkarılmasının ağırlık kaybını %50 oranında artırdığı gözlemlenirken, yarı dolu tanklarda bu artışın yaşanmadığı belirtilmiştir. Ayrıca, araştırmacılar, tankların orta yükseklik bölgelerinde yoğunlaşan burkulma hasarının, bu alanların güçlendirilmesiyle azaltılabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Kilic (2021) çalışmasında petrol ve türevlerini depolamak için kullanılan silindirik tankların burkulma davranışını incelemişlerdir. Yapılan deneylerde, yatay kaynak işlemleri nedeniyle oluşan geometrik kusurların hidrostatik basınç altında burkulma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Başlangıç burkulması, kusur derinliği arttıkça artarken, genel burkulma 14t derinliğine kadar azalmıştır. Belirli bir derinliğe ulaşıldığında, kusurlar güçlendirme etkisi yaratabilmiştir. Elde ettikleri bulgular, bazı geometrik kusurların yapıları olumsuz etkilemediğini ve uluslararası standartların güncellenmesi gerektiğini göstermektedir.

Kilic and Cinar (2021) çalışmalarında sülfürik asit korozyonuna maruz kalan ince cidarlı silindirik tankların burkulma davranışını ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilerek kayıpların telafi edilmesini incelemişlerdir. Deneyler, üç grup model (kontrol, tam CFRP, değişken CFRP) ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, CFRP uygulaması ile koroziyon etkilerinden etkilenen modellerin %20–60 oranında güç kazanımı sağladığını göstermektedir. CFRP ile güçlendirilmiş modeller, dayanım, süneklik ve enerji emme kapasitesinde önemli artışlar göstermektedir.

Maali et al. (2021) çalışmalarında, erimiş atık polimer ile doldurulmuş hafif çelikten yapılmış silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Yedi farklı kompozit kaplamaya sahip silindirik kabuk modeli, hidrostatik basınca maruz bırakılarak test edilmiştir. Testler, çift katman CFRP sargısının burkulma yükü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Erimiş polipropilen kullanımı, diğer malzemelere göre daha etkili bulunarak, çökme yükünü artırmıştır. DeneySEL bulgular, başlangıç burkulma yüklerinin teorik değerlerden genellikle daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Rahman et al. (2021) çalışmalarında hafif çelikten imal edilen ince duvarlı kapalı uçlu silindirik yapıların vakum nedeniyle oluşan burkulmasını araştırmışlardır. Uzunluk-çap oranı (L/D) 2,4 ile 3,43 arasında değişirken, çap-kalınlık oranı (D/t) ise 390,8 ile 558,24 arasında olmuştur. Silindirlerin içinde vakum oluşturarak burkulmaya yol açacak bir kurulum gerçekleştirilmiş ve burkulma basınçları kaydedilmiştir. Destekleyicilerle modifiye edilen silindirlerin burkulma basınçları arasındaki farklar incelenmiş ve

destekleyicilerin etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışma, Bangladeş'te üretilen ince duvarlı silindirlerin burkulmaya karşı direnç artırma yöntemleri hakkında bilgi sunmuştur.

Taraghi et al. (2021) çalışmalarında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş silindirik kabukların üniform dış basınç altında burkulma davranışını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Farklı incelik oranlarına sahip CFRP güçlendirmeli silindirik kabuklar, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan doğrusal olmayan stabilite analizleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kabuğun orta bölgesinin çevresel olarak CFRP şeritleri ile güçlendirilmesinin, burkulma dayanımını en etkili şekilde artırdığını göstermiştir.

Aydin et al. (2020) çalışmalarında ince cidarlı çelik silindirik kabukların burkulma davranışını ve CFRP (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) şeritlerin dayanım üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı çentik derinlikleri ve çentik çizgisi sayısına sahip iki model grubunu, tek biçimli dış basınca maruz bırakarak test etmişlerdir. Sonuçlarda, CFRP uygulamasının burkulma dayanımını %8-52 artırdığını ve tam yüzey CFRP kaplamasının dalga sayısını azalttığını gözlemlemişlerdir. Çentik derinlikleri arttıkça, tek çentik çizgili modellerde başlangıç burkulma yükü düşerken, çift çentik çizgili modellerde yükseldiğini belirtmişlerdir. Deneysel veriler, çentik çizgilerinin ve derinliklerinin yapıyı rijitleştirdiğini ortaya koymuş; ayrıca, tasarımda belirli katsayıların teorik değerlerle çarpılmasıyla ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulma yüklerinin öngörülebileceği sonucuna varılmıştır.

Maali and Kilic (2020) çalışmalarında, karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kullanarak yangın sonrası hasar görmüş silindirik tankların burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemiştir. Farklı sıcaklıklarda (150°C-600°C) ısıtılan on laboratuvar modeli, dış basınç altında test edilmiştir. Sonuçlar, CFRP ile kaplanan tankların başlangıç burkulma yükünün arttığını göstermektedir. Ayrıca, CFRP uygulaması ile tankların çökme yükleri belli bir oranda iyileşmiştir. Yangın sonrası CFRP ile onarılan tankların burkulma kapasitesinin artırılmasının, maliyet açısından etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm örneklerde V şeklinde deformasyonlar gözlemlenirken, CFRP kaplaması dalgaların oluşumunu azaltmıştır.

Shuai et al. (2020) çalışmalarında, eksenel basınç altında korozyon kusuru bulunan bir X80 çelik borunun burkulma dayanımını incelemişlerdir. Yazarlar, korozyon kusurunun boyutu (uzunluk, derinlik ve genişlik), boru geometrisi, iç basınç ve çeliğin mekanik özellikleri gibi parametrelerin etkilerini belirlemek için üç boyutlu bir sayısal model geliştirmişlerdir. Sonuçlar, korozyon kusurunun derinliği ve genişliğinin kritik burkulma yükünü önemli ölçüde etkilediğini, ancak kusur uzunluğunun en az önemli faktör olduğunu göstermiştir. Ayrıca, korozyon kusurunun derinliği ve genişliği arttıkça kritik burkulma yükünün azaldığı, fakat genişlik oranı 0.5'in üzerinde olduğunda genişliğin etkisinin belirgin olmadığı bulunmuştur. Yazarlar, borunun dış çapı ve duvar kalınlığının artmasının burkulma direncini artırdığını, iç basıncın ise bu direnci azalttığını belirlemişlerdir.

Zhang et al. (2020a) çalışmalarında, C şekilli ince duvarlı çelik yapıların mekanik özellikleri üzerindeki korozyon etkisini incelemişlerdir. Dokuz yıl boyunca sanayi ortamında hizmet vermiş C şekilli çelik aşıkların düz ve köşe parçaları test örneklerine dönüştürülmüştür. Korozyonun etkisini değerlendirmek için, çatlak ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Sonuçlar, korozyon nedeniyle hem düz hem de köşe parçalarında farklı kırılma modları ve özelliklerinin gözlemlendiğini göstermiştir. Araştırmacılar, korozyon oranı %36 olduğunda, köşe parçalarının akma oranının 0,99'a kadar çıktığını ve uzamanın yalnızca %2,8 olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang et al. (2020b) çalışmalarında, korozyonun eksenel olarak sıkıştırılmış çelik elemanların lokal ve sonrası burkulma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. H şeklindeki çelik kolonlar, hızlandırılmış korozyon testleri ile farklı korozyon derecelerine sahip olarak elde edilmiştir. Eksenel sıkıştırma testi, korozyon derecesi ile kırılma modu, lokal burkulma yükü ve son yük arasındaki ilişkileri analiz etmek için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, korozyon derecesinin artmasıyla birlikte eksenel yük kapasitesinin azaldığını göstermiştir.

Chegeni et al. (2019) korozyon derinliği ve şeklinin, iç basınç ve dört noktalı eğilme yükü altındaki ince cidarlı çelik borular üzerindeki etkilerini incelediklerini belirtmişlerdir. Deneysel ve sayısal yöntemlerle gerçekleştirdikleri bu çalışmada, korozyon derinliğinin artmasının eğilme kapasitesini önemli ölçüde azalttığını tespit

etmişlerdir. Ayrıca, dairesel ve kare korozyon şekillerinin benzer eğilme davranışları sergilediğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, korozyonun boru duvarında çevresel yönde uzatılmasının, uzunlamasına uzatmaya göre eğilme performansı üzerinde daha olumsuz bir etki yarattığını da gözlemlediklerini aktarmışlardır. Bu bulgular, korozyonun derinliği ve yöneliminin boruların mekanik performansı üzerindeki kritik etkilerini ortaya koymuştur.

El- Mahdy et al. (2019) çalışmalarında karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) çelik yapıları güçlendirme potansiyelini araştırmışlardır. Deniz gibi agresif ortamlarda korozyon nedeniyle kesit kaybına uğramış çelik yapıları güçlendirmek için CFRP kullanımını test ettiklerini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, CFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş korozyona uğramış ve sağlıklı çelik kiriş örneklerini karşılaştırdıklarını aktarmışlardır. Deney sonuçlarının, CFRP'nin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için tabaka kalınlığının artırılması ve iyi bir yapışma direncinin sağlanması gerektiğini gösterdiğini belirtmişlerdir; çünkü yapışma zayıflığının ana başarısızlık sebebi olarak belirlendiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, galvanik korozyonu önlemek için cam fiber yalıtım katmanı eklediklerini ve mekanik ankrajların, CFRP katman sayısı ile birlikte etkinliği artırabileceğini önerdiklerini dile getirmişlerdir. Bu sonuçlar, CFRP'nin korozyon kaynaklı zayıflıkları gidermede önemli bir güçlendirme yöntemi olabileceğini göstermiştir.

Hisazumi and Kanno (2019) çalışmalarında çelik yapıların korozyon nedeniyle maruz kaldığı sorunları ve bu yapıların dayanımını incelediklerini ifade etmişlerdir. Korozyonun etkilerini anlamak amacıyla, korozyon seviyesi farklı olan çelik profillerin eksenel basınç dayanımını deneysel testler ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizleriyle araştırdıklarını belirtmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, korozyon seviyesi arttıkça çelik profillerde yerel burkulma, global burkulma, kesit akma ve birleşik hasar modlarının meydana geldiğini gözlemlediklerini aktarmışlardır. Ayrıca, korozyon seviyesine bağlı olarak global ve yerel burkulma ile kesit akma etkileşimini içeren bir dayanım formülü önerdiklerini ifade etmişlerdir. Bu formülün, korozyona maruz kalmış çelik profillerin dayanımlarının tahmin edilmesinde etkili bir araç olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Korucuk et al. (2019) çalışmalarında ince cidarlı silindirik kabukların burkulma davranışlarını, farklı derinlik ve sayılarda girintilerle test etmişlerdir. On dört örnek üzerinde yapılan testlerde, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kaplamanın burkulma kapasitesine etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, girinti sayısı ve derinliği arttıkça burkulma kapasitesinin azaldığını, ancak CFRP kaplamanın bu kapasiteyi artırdığını göstermiştir. Teorik hesaplamalar, deneysel sonuçlara kıyasla daha düşük burkulma yükleri vermiş, ancak CFRP kaplamanın bu farkı azalttığını belirlemişlerdir.

Khatuni and Showkati (2019) çalışmalarında, tankların ve ince cidarlı silindirik kabukların burkulma dayanımını artırmak için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) halkalarının kullanımını incelemişlerdir. Gerçek tank boyutlarına yakın bir tank inşa edilerek CFRP halkası ile güçlendirilmiştir. Deneyler, CFRP halkasının tankın burkulma ve sonrası kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları ile teorik ilişkiler arasındaki karşılaştırmalar, bulguların tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Maali et al. (2019) çalışmalarında, ince cidarlı silindirik kabuklarda başlangıç geometrik kusurların ve CFRP kaplamanın burkulma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Farklı derinlik ve yönlerde eziklere sahip iki grup numune, harici basınca maruz bırakılmıştır. Bulgular, CFRP uygulamasının burkulma dayanımını artırdığını, ancak tüm yüzeyin CFRP kaplanması maliyet etkin olmadığını göstermektedir. Ayrıca, teorik ve deneysel burkulma yükleri karşılaştırılmış ve deneysel numunelerdeki burkulma dalga sayısının teorik tahminlerden az olduğu gözlemlenmiştir.

Taraghi et al. (2019) çalışmalarında, düzgün dış basınca maruz kalan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş çelik konik kabukların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı incelik oranlarına sahip dokuz konik kabuk, farklı sayıda CFRP katmanları ile test edilmiştir. Sonuçlar, CFRP konik kabukların sertliğini ve burkulma dayanımını artırdığını göstermiş, artışın konik kabuğun incelik oranına bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, mevcut analitik modellerde yapılan değişikliklerle, takviyeli konik kabukların burkulma dayanımını tahmin etmek için öneriler sunmuşlardır.

Draidi et al. (2018) metalik silindirik kabukların burkulma kapasitesini artırmak için CFRP kompozit katman kullanımını incelemişlerdir. Geleneksel metal sertleştiriciler yerine tüm yüzeyi kaplayan CFRP katmanlarla güçlendirme yaptıklarını ve bu yöntemin taşıma kapasitesinde %40'tan fazla artış sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, üç veya daha fazla CFRP katmanının burkulma modunu değiştirdiğini, ancak yapışma kalitesinin taşıma kapasitesinde belirleyici bir etkiye sahip olmadığını gözlemlediklerini aktarmışlardır. Çalışmalarında, deneysel verilerle uyumlu bir model sunduklarını ve burkulma sonrası davranışın daha doğru tahmin edilebilmesi için kompozit hasarlarının modellemeye dahil edilmesi gerektiğini vurguladıklarını ifade etmişlerdir. Bu bulgular, CFRP katmanların yapısal güçlendirmedeki etkili rolünü göstermiştir.

Maali et al. (2018) çalışmalarında, basınç yüklerine maruz kalan ince cidarlı konik kabukların burkulma ve post-burkulma davranışını incelemişlerdir. Farklı derinliklerde tek ve çoklu uzunlamasına kusurların etkileri sonlu eleman modelleri ile analiz edilmiştir. Çalışma, mevcut teorileri desteklemiş ve ince cidarlı konik kabukların burkulmasıyla ilgili yeni bulgular sunmuştur. Konik yüksekliğinin, kusurların zayıflatıcı etkisini artırdığı gözlemlenmiştir. Nonlineer analizlerde, tek bir kusurun varlığı burkulma yük kapasitesini artırırken, birden fazla kusur, tek kusurlu modele göre daha düşük bir kapasiteye yol açmıştır.

Amir and Mohammad (2016) çalışmalarında yer üstü çelik silindirik depolama tanklarının iç ve dış korozyon etkileri ile yaşlanmanın burkulma davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı yükseklik/çap oranlarına sahip üç tank, rüzgâr ve vakum basıncına maruz bırakılarak analiz edilmiştir. Üst kısımdaki korozyon, kritik burkulma yükünü önemli ölçüde azaltırken, özellikle belirttikleri “geçiş dönemi” sonrasında ani dayanım kayıpları gözlemlemişlerdir. Tüm tanklarda korozyonun etkisi büyük olurken, alt kısımda meydana gelen korozyonun etkisi sınırlı kalmıştır. Rüzgâr yükü altındaki korozyonun, üniform dış basınca kıyasla daha büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Shokrzadeh and Sohrabi (2016) çalışmalarında, yer üstü petrol depolama tanklarının önemli bir bozulma süreci olarak değerlendirildiği belirtilmiştir. Sayısal bir çalışmada, farklı yükseklik-çap oranlarına sahip üç çelik silindirik tankın rüzgâr ve

vakum basıncı altında burkulma davranışı incelenmiştir. Çalışmada, tankların üst kısmında zamanla meydana gelen üniform kalınlık kaybının yanı sıra, alt kısımda kalan su ve tortuyla temas eden duvar korozyonunu da dikkate almışlardır. Araştırma bulguları, üst kısımda aşırı incelmenin burkulma yükünü önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, üst kısım korozyonu nedeniyle burkulmuş bölgelerin aniden tankın üst kısmına kaydığı belirlenmiştir.

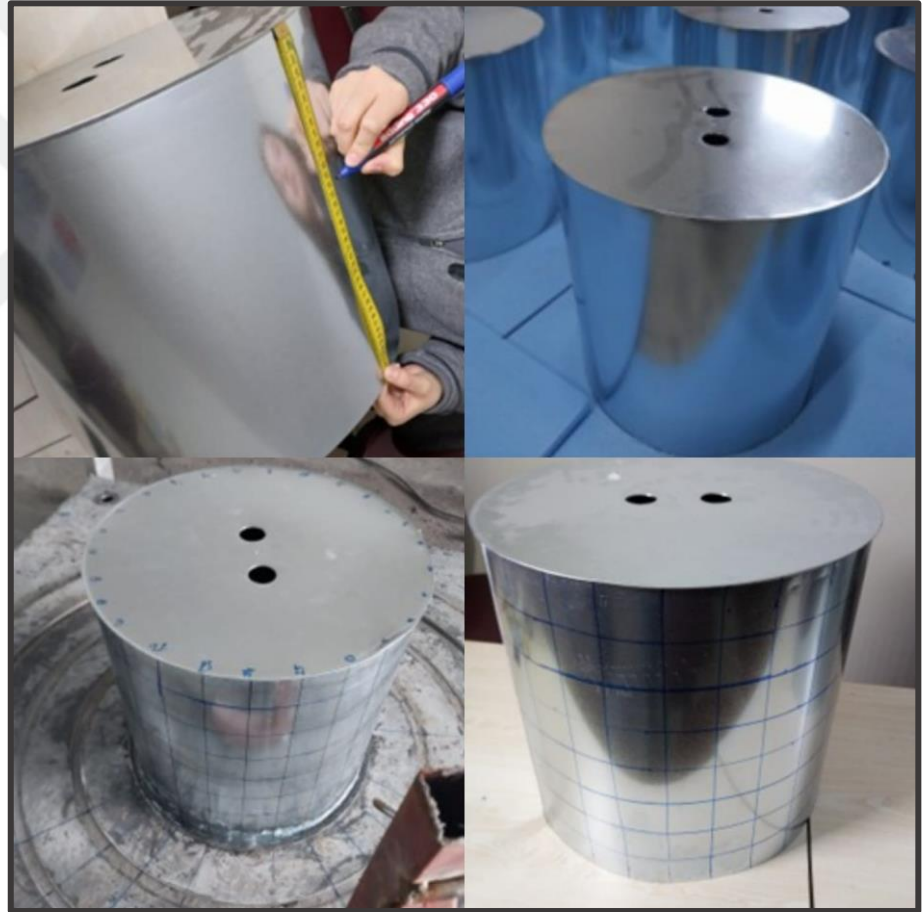
Ghazijahani et al. (2014) çalışmalarında düzgün dış basınç altında yerel ezik kusurlarına sahip ince cidarlı silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışını deneysel olarak incelediklerini ifade etmişlerdir. Elde ettikleri başlıca sonuçlara göre, burkulmanın başlangıç aşamasında yalnızca eksenel bir hareketin gözlemlendiğini ve burkulmanın, kabukta lobların oluşumu ile başladığını belirtmişlerdir. Yerel ezik kusurların, numunelerin burkulma modunu önemli ölçüde etkilediğini dile getirmişlerdir. Bu bulguların, çap/kalınlık oranı benzer olan diğer mühendislik yapılarında da kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada çelik silindir tankların burkulma kapasiteleri çentik ve korozyon etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir.

Deneyler Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan silindir numunesi Şekil 3.1’de gösterilmiş olup silindirlerin özellikleri ve boyutlarına ilişkin bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Silindir numunesi

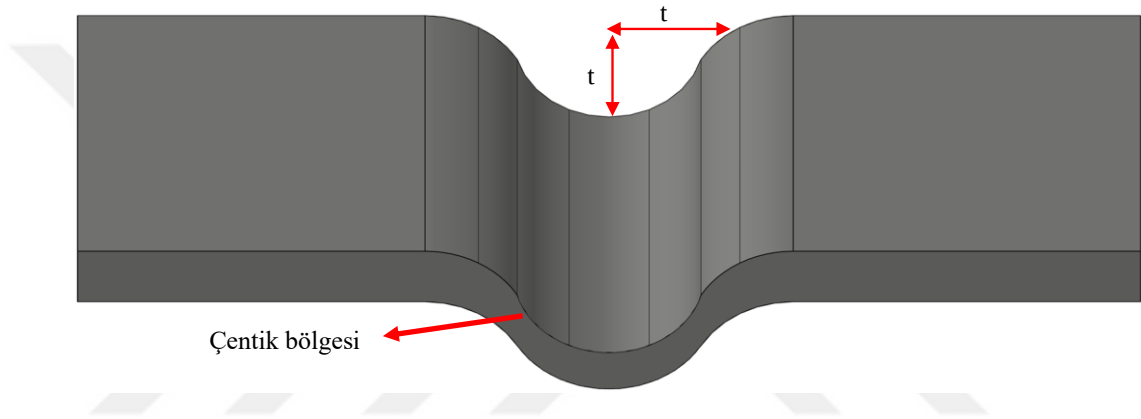
Çizelge 3.1. Silindir numunelerinin özellikleri

Deney Grubu	Numune	Asit Yüzdesi (%)	Silindir boyutları (mm)		
			Yükseklik	Çap	Kalınlık
Korozyonsuz Grup	P-1t	-	400	400	0,45
	P-2t				
	P-3t				
Korozyonlu Grup	%2,5-1t	2,5			
	%2,5-2t				
	%2,5-3t				
	%5-1t	5			
	%5-2t				
	%5-3t				

Deney numunelerine ait detaylar Çizelge 3.1'de sunulmaktadır. Silindirik çelik kabuk numunelerin imalatında, kalınlığı 0.45 mm olan çelik levhalar kullanılmıştır. Numunelerin gerçekçi davranış sergilemesini sağlamak amacıyla, yarıçap/kalınlık (r/t) oranları 300 ile 1000 arasında seçilmiştir (Golzan and Showkati, 2008). Her bir silindirik kabuğun yarıçapı 200 mm, yüksekliği 400 mm ve r/t oranı 445 olarak belirlenmiştir, bu da gerçekçi test koşulları için istenen aralık içinde yer almaktadır. Çelik levhalar, gerekli boyutlarda hassas bir şekilde CNC tezgâhında kesilmiş ve ardından lehimleme yöntemiyle silindirik şekillere dönüştürülmüştür. Kapak olarak kullanılan çelik plakalar da 200 mm yarıçapa sahiptir ve her biri iki delik içermektedir. Deliklerden biri bir vakum pompasına bağlanmak için, diğeri ise bir yük hücresinin bağlanması için tasarlanmıştır. Toplamda dokuz adet silindir numunesi hazırlanmıştır; bunlardan üçü korozyona uğramamış, altısı ise korozyona uğramış numunelerden oluşmaktadır. Korozyona uğramış numunelerden üçü %2,5'lik HCl çözeltisine, diğeri üçü ise %5'lik HCl çözeltisine maruz bırakılmıştır.

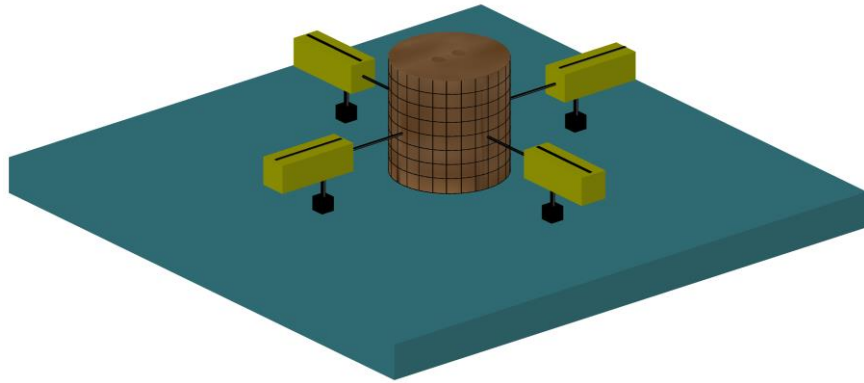
3.2. Deneylerin Yapılışı

Bu çalışmada yapılan deneylerin amacı, çentik ve korozyon etkisinin çelik silindirlerin yapısal bütünlüğü üzerindeki etkilerini belirlemek ve olası zayıf noktaları tespit etmektir. Bu kapsamda, silindirlerde çentik etkisinin incelenmesi için sanayi tipi torna makinesi kullanılarak silindirler çentikli hale getirilmiştir. Çentikler, farklı derecelerde olmak üzere üç ayrı kademe halinde gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, çentik derinliği ve yoğunluğunun silindirlerin burkulma dayanımı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Uygulanan çentiklerin geometrik özelliği Şekil 3.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Numunelerdeki çentiklerin geometrik özellikleri

Numune isimlerinde geçen 1t, 2t ve 3t ibareleri numunede incelenen çentiğin yarıçapını belirtmektedir. Burada t değeri silindirin et kalınlığı olup (0,45mm) çentik boyutu sırasıyla et kalınlığı, et kalınlığının iki katı ve et kalınlığının üç katı değerinde oluşturulmuştur. Deney düzeneği Şekil 3.3’ te çizilerek gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deney düzeneği

Korozyon etkisinin değeriendirilmesi amacıyla hidroklorik asit (%2,5 ve %5 HCl çözeltileri) kullanılmıştır. Silindir numunelerin aside maruz bırakılması sürecinde, silindir yan yüzey ve kapak kısımları dâhil olmak üzere tüm yüzeyleri asit ile etkileşime girmesi sağlanmıştır. Korozyon sürecinde asitlerin numunelerden sızmasını önlemek amacıyla, silindirlerin üst kısımlarına foamboard levhalar soğuk silikon yardımıyla sabitlenmiştir. Korozyonlu numuneler, 24 saat boyunca asit etkisine maruz bırakıldıktan sonra deneylere tâbi tutulmuştur. Bu yöntemle, yüzeylerinde oluşan korozyonun burkulma kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Böylece hem çentik hem de korozyon etkisinin tek başına ve birleşik olarak burkulma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Korozyona uğratılmak üzere hidroklorik asit ile temas ettirilen numune Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Hidrolik asite maruz bırakılmış numune

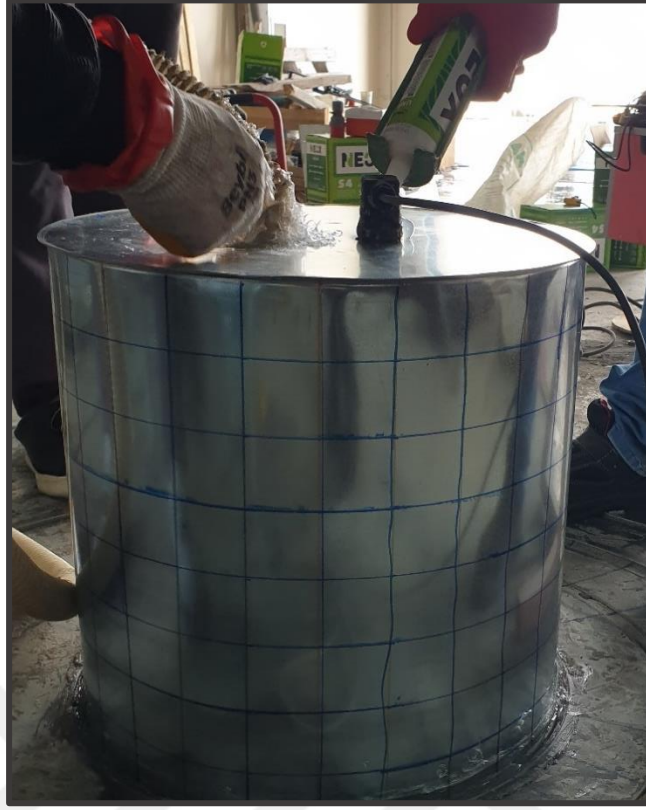
Hazırlanan numuneler, deney düzeneğine dikkatlice yerleştirilmiş ve silikon yardımıyla monte edilmiştir. Deney düzeneğine silikon ile yerleştirilen numune Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Deneye hazırlanan numunenin silikon ile sabitlenmesi

Basınç etkisini simüle etmek için bir vakum pompası kullanılmış, bu esnada basınç değerlerini ölçmek amacıyla yük hücresi (load cell) numuneye entegre edilmiştir. Şekil 3.6'da vakum pompasının silindir numune üzerine silikon yardımı ile montajı görülmektedir. Numunenin burkulma davranışını detaylı bir şekilde gözlemlemek ve ölçümlemek için LVDT cihazları, numunenin belirlenen noktalarına dikkatlice yerleştirilmiştir.

Bu kapsamlı düzenek ve dikkatlice hazırlanmış numuneler sayesinde, çentiklerin ve korozyonun birleşik etkileri hem deneysel hem de teorik düzeyde analiz edilmiş, çelik silindirlerin burkulma dayanımını etkileyen faktörler derinlemesine incelenmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilmiş deneye hazır silindir numunesi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Vakum pompasının numuneye silikon ile sabitlenmesi



Şekil 3.7. Deney düzeneğine yerleştirilmiş numune

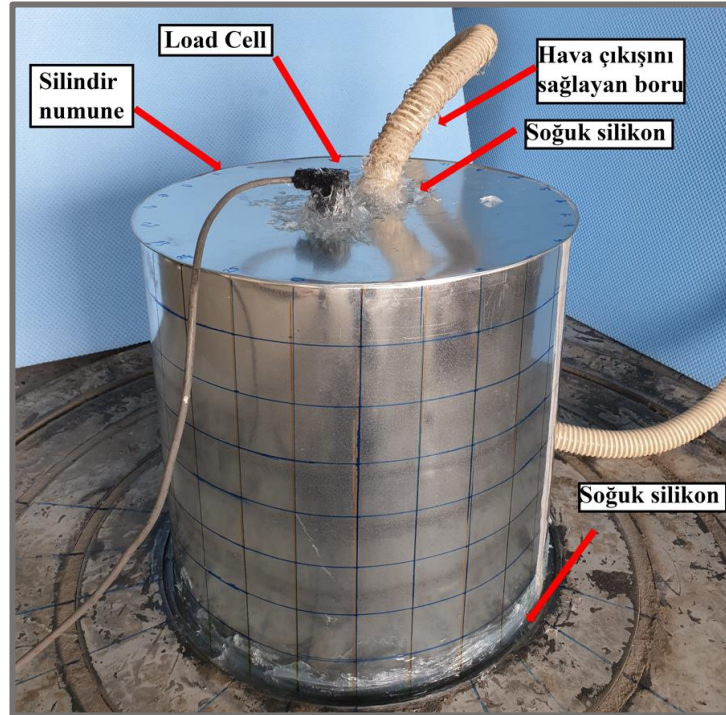
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Deney düzeneği merkezde silindir numunesi ve eşit mesafede 4 LVDT cihazı olacak şekilde hazırlanmıştır. LVDT cihazlarının yükseklikleri Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. LVDT cihazlarının yerden yükseklikleri

Numune	LVDT’lerin yerden yüksekliği (mm)
%2,5-1t	200 mm
%2,5-2t	
%2,5-3t	
%5-1t	
%5-2t	
%5-3t	

Şekil 3.8’de görülebileceği üzere deney düzeneğine yerleştirilen numunede basınç etkisini simüle etmek amacıyla vakum pompası, deney esnasında basınç değerlerini ölçmek için yük hücresi numuneye soğuk silikonla monte edilmiştir.



Şekil 3.8. Hazırlanan silindir numunesi

3.3. Deneyde Kullanılan Malzemeler

3.3.1. Hidroklorik asit

Hidroklorik asit (HCl), kimyasal olarak klor ve hidrojen elementlerinden oluşan güçlü bir mineral asittir. Özellikle korozyon deneylerinde tercih edilmesinin nedeni, güçlü bir asidik yapıya sahip olması ve metallerle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüzeyde korozyona neden olmasıdır.

Bu çalışmada kullanılan hidroklorik asit, TS-EN ISO 9001:2008 standardına uygun olarak belirli kimyasal özelliklere sahip ve yüksek saflıkta üretilmiştir. Safiyet oranı %30-32 arasında olup, bu durum hidroklorik asidin güçlü asidik yapısını korurken, kontrol edilebilir bir reaktivite sunmasını sağlamaktadır. Asidin yoğunluğu 1,15-1,16 g/cm³ aralığındadır, bu da onun belirli bir hacimdeki kütlesini ifade etmekte ve deneylerde gerekli miktarın hassas bir şekilde ölçülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, hidroklorik asidin içerisindeki demir (Fe) miktarı %0,0005, arsenik (As) miktarı ise %0,0001 gibi çok düşük seviyelerde tutulmuştur, bu da asidin saflığını korumayı ve deney sonuçlarının dış etkenlerden kaynaklı müdahalelerden etkilenmemesini garanti eder. Şekil 3.9.'da deneyde kullanılan hidroklorik asit görülmektedir.



Şekil 3.9. Hidroklorik asit

3.3.2. Foamboard levha

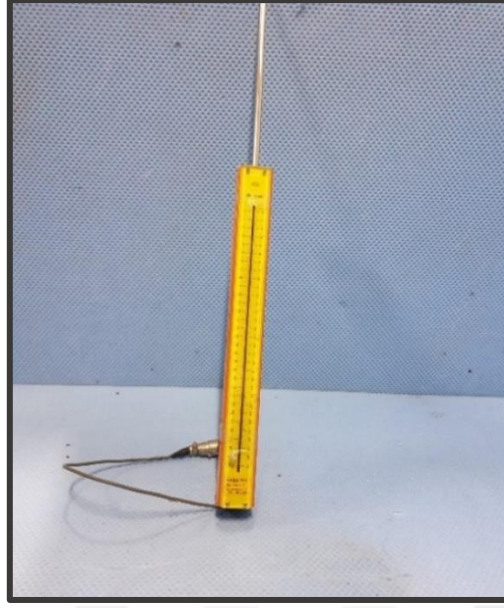
Deneyde, asit çözeltisinin silindirde 24 saat boyunca kalması ve sızdırmazlığın sağlanması amacıyla foamboard levhalar kullanılmıştır. Bu levhalar, sızdırmazlık özellikleri ve HCl asidine karşı dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilmiştir. Silindirler, foamboard levhaların içerisine yerleştirilmiş ve silindirin foamboard ile temas eden bölgelerine içten ve dıştan silikon çekilerek sızdırmazlık sağlanmıştır. Foamboard levhalar, asit çözeltisiyle dolu olan deney numunesinin asitle temas etmesi durumunda etkilenmemesi için kullanılmış ve çelik tanklara soğuk silikon ile monte edilmiştir. Kullanılan foamboard levhalar Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10. Foamboard

3.3.3. LVDT cihazı

Burkulma deneyi sırasında, yatayda oluşan deformasyonu ölçmek için 300 mm'ye kadar deplasman ölçme kapasitesine sahip dört adet SPD-300D model LVDT (Lineer Deplasman Transformatörü) cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar, yüksek hassasiyetli sensörleri sayesinde, numunenin farklı noktalarında oluşan yer değiştirmeleri eş zamanlı olarak kaydederek ölçüm doğruluğunu artırmıştır. Ölçüm sırasında elde edilen deformasyon verileri, bir veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılmış ve bu verilerden burkulma yükü yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Deneyde kullanılan LVDT cihazı Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. LVDT ölçüm cihazı

3.3.4 Veri toplama cihazı (Data logger)

Deney boyunca LVDT, gerinim pulu ve hava pompasından gelen verileri toplamak için Insturinet I420 model, 120 kanallı ve 13 portlu bir veri toplama cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, dirençler aracılığıyla ölçüm aletlerine bağlanmış ve veriler kablo ile bilgisayara aktarılmıştır. Veriler, bilgisayarda DasyLab programı ile okunarak analiz edilmiş ve sonrasında MS Excel'e aktarılıp kaydedilmiştir. Şekil 3.12'de gösterilen bu veri toplama cihazı sıcaklık, basınç, nem gibi çok çeşitli verileri farklı koşullarda toplama, kaydetme ve analiz etme işlevine sahiptir. Deney sürecinde kullanılan data logger cihazı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Deneylerde kullanılan veri toplama cihazı

3.3.5. Vakum pompası

Silindir deneylerinde vakum pompası, test sırasında silindir içindeki havanın veya gazların dışarı atılarak belirli bir vakum seviyesi oluşturulması için kullanılmaktadır. Bu, özellikle ince cidarlı silindirik yapıların burkulma davranışını analiz etmek için yapılan deneylerde yaygın bir uygulamadır. Vakum ortamı, dış basınç etkisini simüle etmek ve numunenin burkulma yüklerini doğru bir şekilde ölçmek için kritik öneme sahiptir.

Vakum pompası, deney düzeneğinde silindirin içindeki hava moleküllerini dışarı atarak numune üzerinde homojen bir dış basınç oluşturur. Bu sayede, test edilen silindirin burkulma dayanımı, stabilitesi ve deformasyon özellikleri, dış ortamın etkilerinden bağımsız bir şekilde incelenebilmektedir. Ayrıca, vakum pompaları yardımıyla oluşturulan düşük basınç ortamı, çentik derinlikleri, malzeme türü ve geometri gibi faktörlerin burkulma davranışına etkisinin daha hassas bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Silindir numunelerin içerisindeki havayı alan vakum pompası Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Vakum pompası

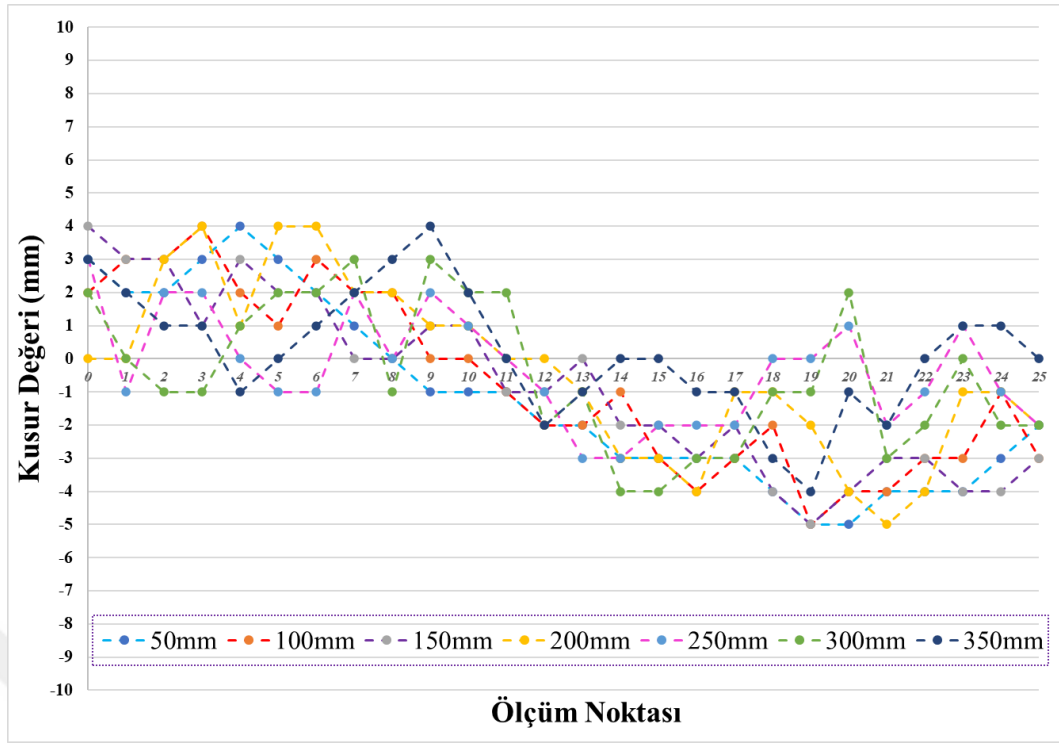
3.3.6. Lazerli ölçüm cihazı

Burkulma deneyi yapılacak numunelerin yüzey düzensizliklerini ölçmek amacıyla lazer ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu işlemde, Leico Disto D2 marka ve model cihaz tercih edilmiştir. Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Lazerli ölçüm cihazı

Deney düzeneğinde numunenin silikon ile birleştirildiği metal levhada bulunan oluk kısımlardan numuneye uygun uzaklıktaki seçilerek lazer ölçüm cihazı için destek yerleştirilmiştir. Bu destek üzerinden silindir üzerinde bulunan sırasıyla 50, 100, 150, 200, 250, 300 ve 350 mm yüksekliklerdeki noktalardan ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonuçları not alınarak deney öncesi numunedeki düzensizlik oranları hesaplanmıştır. Ölçümlerin sonucunda düzensizliklerin maksimum 5 mm olduğunu ve bu sebepten dolayı bu kusurların göz ardı edilebilecek düzeyde olduğu saptanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ölçülen değerler Şekil 3.15’te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Silindirlerin farklı yüksekliklerde ölçülen geometrik kusur değeri grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Silindirlerin Korozyona Maruz Bırakılması

Çentikli silindir tankların korozyona maruz kalması sonucu burkulma davranışlarının incelendiği bu deneysel çalışmada numunelere ilk olarak çentik uygulanmış olup daha sonra gerekli numuneler korozyona maruz bırakılmıştır. Numunelere uygulanan asit çözeltisinin yüzdesinin, numunelerin ağırlık kaybı üzerindeki etkisi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelere ait ağırlık değişimleri

Numune	Asit Yüzdesi (%)	Korozyon Öncesi ağırlık (g)	Korozyon Sonrası ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (%)
%2,5-1t	2,5	1550	1446	6,7
%2,5-2t		1550	1440	7,1
%2,5-3t		1545	1439	6,8
%5-1t	5	1550	1407	9,2
%5-2t		1545	1394	9,8
%5-3t		1550	1403	9,5

%2,5 asit çözeltisiyle doldurulmuş 1t, 2t ve 3t silindirlerinde sırasıyla %6,7, %7,1 ve %6,8 oranlarında ağırlık kayıpları tespit edilirken; %5 asit çözeltisi ile doldurulmuş 1t, 2t ve 3t silindirlerinde sırasıyla %9,2, %9,8 ve %9,5 oranlarında daha yüksek ağırlık kayıpları gözlemlenmiştir. %2,5 asit çözeltisi ile yapılan testlerde, asit oranı düşük olduğu için numunelerde gözlemlenen ağırlık kaybı, %5 asit çözeltisine kıyasla daha azdır. Asit oranı arttıkça, çözeltinin numune üzerindeki etkisi de artmakta ve dolayısıyla ağırlık kaybı oranı yükselmektedir.

4.2. Silindirlerin Burkulma Testleri

Çizelge 4.2’de ince cidarlı çelik numuneler için burkulma davranışları, hem mekanik çentiklerin (1t, 2t, 3t) hem de korozyon etkilerinin (%2,5 ve %5 HCl çözeltileri) etkisi altında gösterilmiştir. İlk burkulma değeri, ölçüm noktalarından alınan ilk hareketin kaydedildiği değer olarak tanımlanmıştır. Genel burkulma, tüm LVDT’lerin eşzamanlı olarak değer ölçmeye başladığı ilk an olarak tanımlanmaktadır ve göçme burkulma Göçme burkulma, numunenin taşıyabildiği maksimum yük olarak ifade edilmiştir. P-1t, P-2t ve P-3t olarak adlandırılan çentikli numunelerde ilk burkulma değeri, çentik derinliği arttıkça azalmış, aynı şekilde genel ve göçme burkulma değerlerinde de düşüş gözlemlenmiştir. %2,5 HCl çözeltisine maruz kalan numunelerde çentik boyutunun artışı (1t, 2t, 3t) genel olarak burkulma kapasitesini daha da azaltmıştır. %5 HCl çözeltisine maruz kalan numunelerde ise hem korozyonun hem de çentik derinliği etkisiyle burkulma değerleri en düşük seviyelere inmiştir. Özellikle %5-3t numunesi, ölçümlerde en düşük göçme dayanımını göstermiştir. Bu sonuçlar, korozyonun ve çentik derinliğinin artışının ince cidarlı çelik numunelerin burkulma dayanımını belirgin şekilde azalttığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.2. Numunelere ait burkulma değerleri

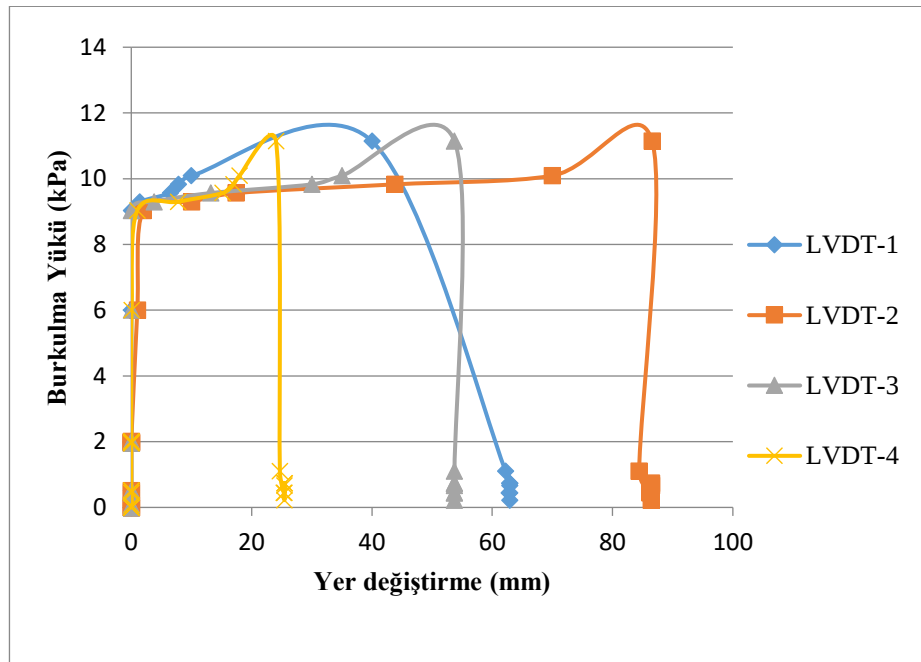
Numune İsmi	İlk Burkulma (kPa)	Genel Burkulma (kPa)	Göçme Burkulması (kPa)	(Genel Burkulma) / (İlk Burkulma)	(Göçme Burkulması) / (Genel Burkulma)
P-1t	2,01	9,04	11,14	4,50	1,23
P-2t	1,89	5,87	10,13	3,11	1,73
P-3t	1,70	5,28	9,12	3,11	1,73
%2,5-1t	1,61	6,78	9,48	4,22	1,40
%2,5-2t	1,70	3,76	9,14	2,21	2,43
%2,5-3t	1,79	3,96	8,62	2,21	2,18
%5-1t	0,95	4,50	4,67	4,74	1,04
%5-2t	0,44	3,07	4,54	6,98	1,48
%5-3t	0,35	3,17	3,65	9,01	1,15

4.2.1. Korozyonsuz grup

Korozyonsuz çelik tankların burkulma kapasitesini ve dayanımını değerlendirmek amacıyla, korozyonsuz 1t, 2t ve 3t çentikli deney numuneleri üzerinde burkulma deneyi yapılmıştır. Yer değiştirme verileri, yerden 200 mm yüksekliğe yerleştirilen LVDT cihazları ile ölçülmüş ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonuçlarıyla burkulma yükü-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuş, numunelere ait ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri analiz edilmiştir.

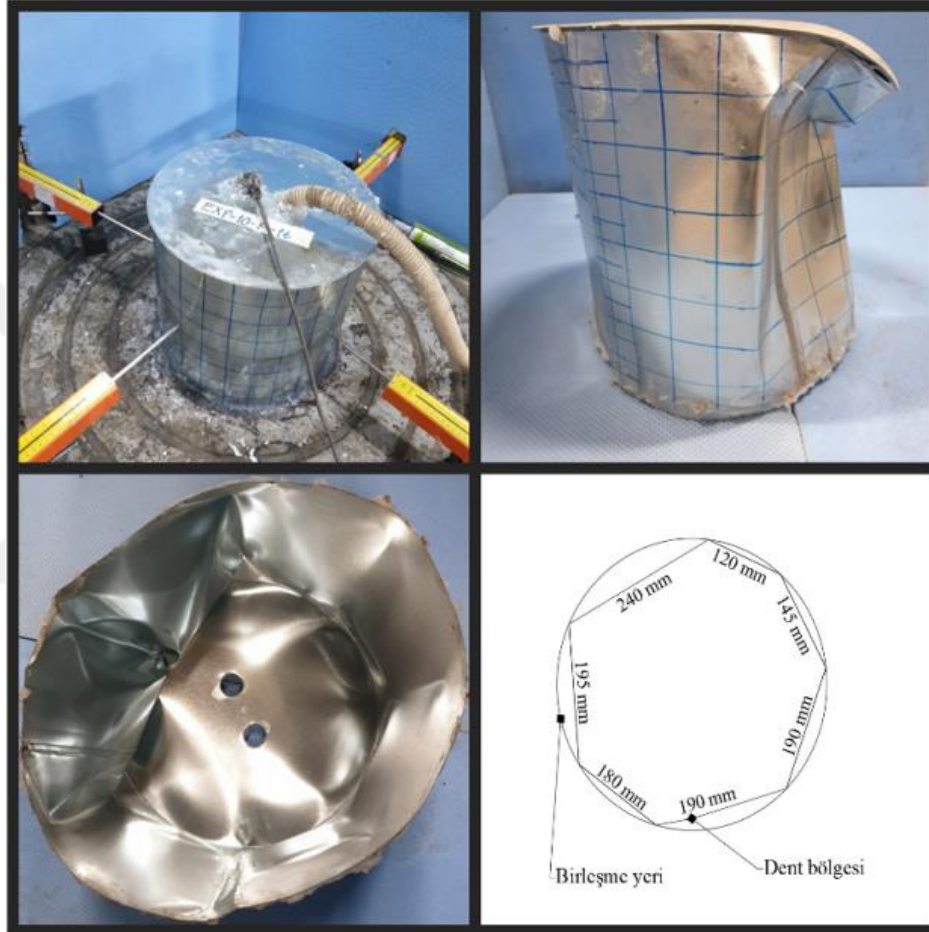
4.2.1.1. Korozyonsuz ve 1t çentikli deney numunesi (P-1t)

Şekil 4.1’de elde edilen veriler incelendiğinde, numunede ilk burkulmanın 2,01 kPa, genel burkulmanın 9,04 kPa ve göçme burkulmasının 11,14 kPa basınç değerinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. İlk ve genel burkulma aşamalarında, bazı bölgelerde şekil değiştirme görülürken, diğer bölgelerde stabil devam etmiştir. Göçme burkulması sırasında özellikle çentik ve birleşim bölgelerinde çatlak oluşumu ve hava sızdırma gibi hasarlar tespit edilmiş olup, bu deformasyonların numunenin üst ve yan yüzeylerinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Numunelerin deneye tabi tutulduktan sonraki görünüşleri ve oluşan dalgalar Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. P-1t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

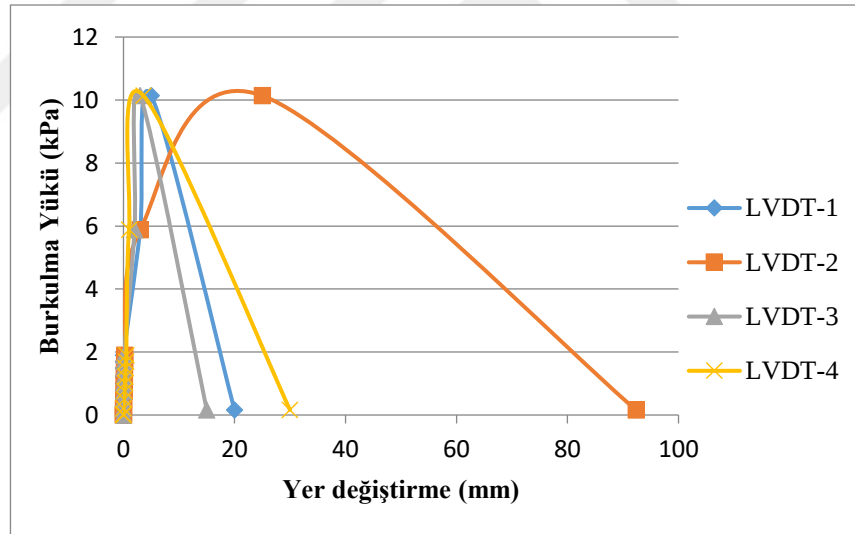
LVDT-2 ölçüm noktasında, yer değiştirme sırasında dalgalanmalar meydana gelmiş, bu da çentik bölgesinin deformasyona duyarlılığını göstermiştir. Numunenin yer değiştirme kapasitesinin oldukça geniş olması (yaklaşık 80 mm), çeliğin sünek davranış sergilediğini ve korozyonsuz durumda yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, korozyonsuz çeliğin çentik etkisine rağmen dayanıklılığını koruduğunu göstermektedir.



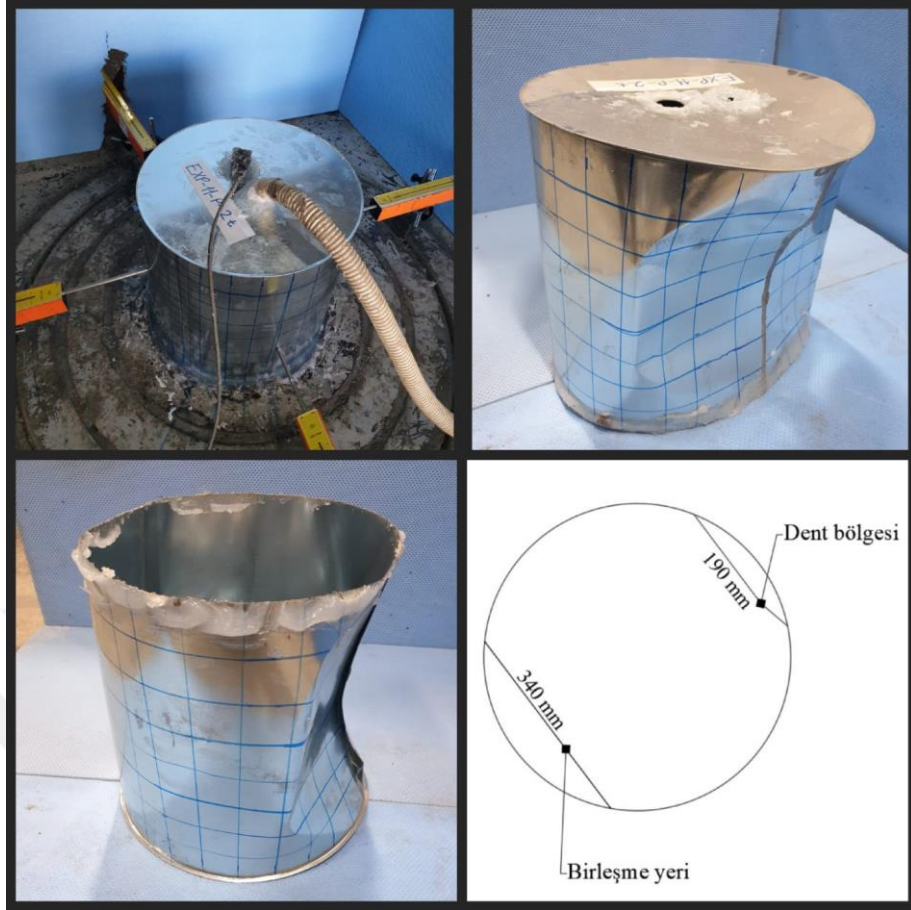
Şekil 4.2. P-1t deney numunesi

4.2.1.2. Korozyonsuz ve 2t çentikli deney numunesi (P-2t)

Şekil 4.3'te P-2t numunesine ait burkulma yükü yer değiştirme grafiği verilmiştir. Veriler incelendiğinde İlk burkulma, çentik ve korozyon etkisi nedeniyle düşük bir yük seviyesinde, 1,89 kPa'da meydana gelmiştir. Genel burkulma ise 5,87 kPa'da gerçekleşmiş olup, numunede belirgin şekil değişiklikleri görülmüştür, ancak çatlama gibi hasar belirtileri henüz gözlemlenmemiştir. Göçme burkulması, 10,13 kPa'da gerçekleşmiş ve bu aşamada silindirin birleşim ve çentik bölgesinde çatlak oluşumu ve hava sızdırma gibi hasarlar tespit edilmiştir. Grafikte, yer değiştirme miktarının ilk ve genel burkulma sırasında kademeli olarak arttığı, ancak göçme burkulmasında hızlı bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu bulgulara çentiklerin numunenin burkulma kapasitesini zayıflattığını ve göçme burkulması sonrası dayanıklılık kaybı yaşandığını göstermektedir. Şekil 4.4'te numunelere ait burkulma sonrası oluşan deformasyonlar ve dalgalar verilmiştir.



Şekil 4.3. P-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği



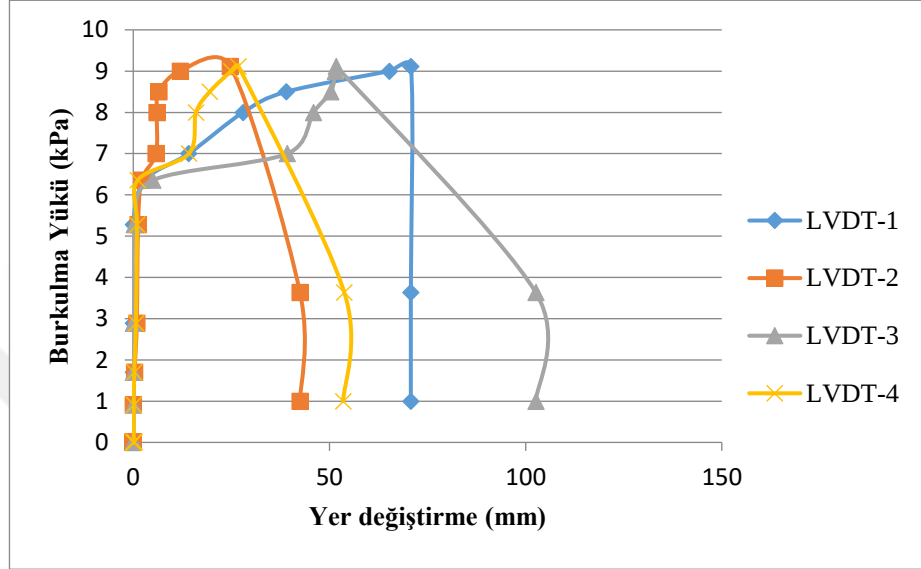
Şekil 4.4. P-2t deney numunesi

4.2.1.3. Korozyonsuz ve 3t çentikli deney numunesi (P-3t)

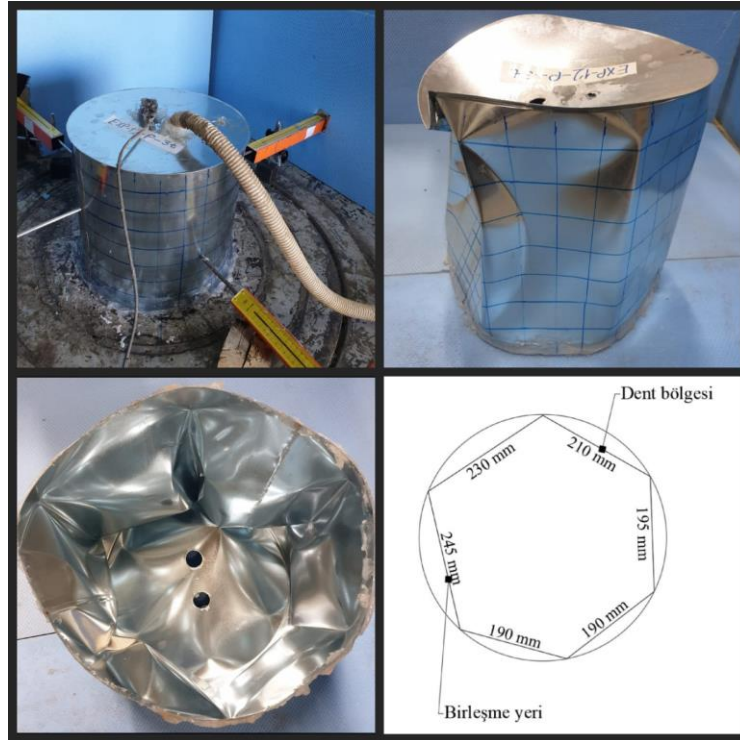
Korozyonsuz ve 3t çentikli (P-3t) çelik tank numunesinde deney boyunca elde edilen basınç ve yer değiştirme değerleri alınarak Şekil 4.5'te burkulma yükü yer değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Numunede ilk burkulma değeri 1,70 kPa ile gerçekleşmiş olup, bu değer diğer numunelere göre daha erken bir aşamada meydana gelmiştir. Burada, çentikli yapının etkisiyle burkulma kapasitesinin kısmen düşmüş olduğu anlaşılmaktadır. Genel burkulma, 5,28 kPa seviyesinde gerçekleşmiş ve burada da belirgin şekil değişiklikleri gözlemlenmiştir. Bu aşamada, numunede çatlak veya ciddi bir hasar meydana gelmemiştir, bu da çeliğin hala yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Göçme burkulması ise 9,12 kPa'da gözlemlenmiş olup, bu aşamada çatlak oluşumu ve hava kaçırma gibi deformasyonlar tespit edilmiştir. Korozyon etkisi olmadığı için, bu deformasyonlar yalnızca çentiklerin etkisiyle meydana gelmiştir ve numune hala sağlam kalmış, ancak dayanımda bir azalma gözlemlenmiştir. Grafikte, yer değiştirme miktarının göçme burkulması sırasında arttığı, ancak korozyonlu numunelere

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kıyasla daha stabil bir şekilde gerçekleştiği belirgin şekilde görülmektedir. Bu da korozyonsuz numunenin burkulma kapasitesinin, çentiklerin etkisiyle erken aşamalara düşmesine rağmen, yine de korozyonlu numunelere göre daha yüksek dayanım sunduğunu göstermektedir. Şekil 4.6'da numunenin deney sonrası davranışı ve dalga görünümü verilmiştir.



Şekil 4.5. P-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği



Şekil 4.6. P-3t deney numunesi

4.2.2. Korozyonlu grup

Çentikli silindirik çelik tankların burkulma kapasitesine korozyonun etkisini araştırmak amacıyla, deney numuneleri %2,5 ve %5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılarak korozyona uğratılmış ve 1t, 2t, 3t çentikli %2,5 ve %5 korozyonlu numuneler burkulma deneyine tabi tutulmuştur. Deney süresince yer değiştirme verileri, yerden 200 mm yüksekliğe yerleştirilen LVDT cihazları ile ölçülerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilerden burkulma yükü-yer değiştirme grafiği oluşturulmuş ve numunenin ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Burkulma yükü-yer değiştirme verilerinin analizi, ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerlerinin korozyonsuz numunelere (P-1t, P-2t, P-3t) kıyasla daha erken gerçekleştiğini göstermiştir.

Çizelge 4.3. Korozyonlu deney numunelerinin isimleri

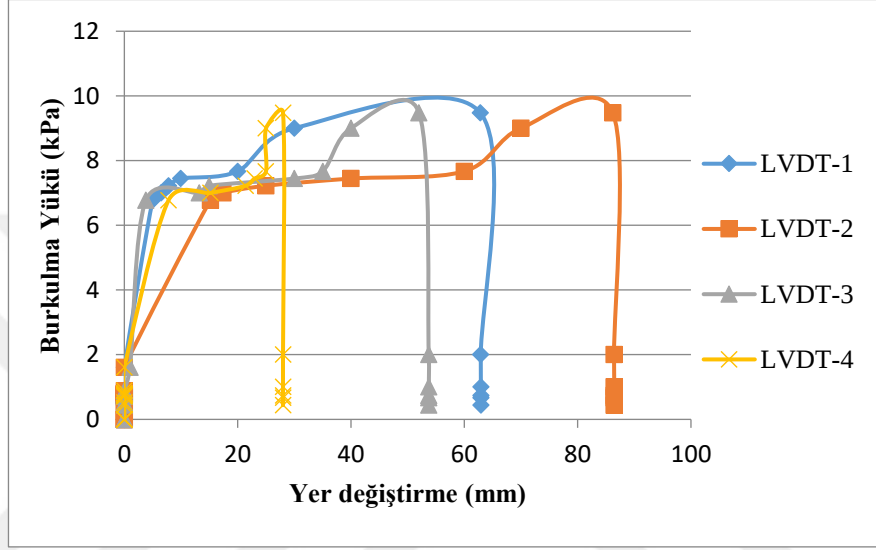
Numune Özelliği	Numune İsimleri
%2,5 HCl-1t çentikli	%2,5-1t
%2,5 HCl-2t çentikli	%2,5-2t
%2,5 HCl-3t çentikli	%2,5-3t
%5 HCl-1t çentikli	%5-1t
%5 HCl-2t çentikli	%5-2t
%5 HCl-3t çentikli	%5-3t

4.2.2.1. %2,5 Korozyonlu ve 1t çentikli deney numunesi (%2,5-1t)

Silindir numunesi %2,5 oranında hidroklorik asitte bırakılarak korozyon süreci başlatılmış ve 1t çentikli silindir numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de deney sonucuna göre elde edilen Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği verilmiştir. İlk burkulma değeri 1,61 kPa ile gözlemlenmiştir. Bu değer, korozyon etkisi altındaki numunenin, korozyonsuz numunelere kıyasla daha düşük bir burkulma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. İlk burkulma sonrası, genel burkulma değeri 6,78 kPa’ya ulaşmıştır. Bu aşama sırasında, numunede belirgin şekil değişiklikleri gözlemlenmiş olup, ancak çatlak veya ciddi deformasyonlar görülmemiştir. Göçme burkulması ise 9,48 kPa seviyesinde gerçekleşmiş ve bu aşamada çelik tankın birleşim bölgelerinde ve yapısal zayıflık gösteren çentikli alanlarda daha yoğun ve belirgin bir şekil değişikliği, çatlak oluşumu veya hava kaçırma gibi deformasyonlar

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

gözlemlenmiştir. Bu numune, korozyon etkisi nedeniyle burkulma kapasitesinin azaldığını, ancak hala belirli bir dayanım sunduğunu göstermektedir. Çentiklerin etkisiyle burkulma kapasitesinin daha erken aşamalarda gerçekleştiği ve göçme burkulmasının da korozyonsuz numunelere kıyasla daha erken olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.8’de %2,5 korozyonlu 1t çentikli numunenin burkulma sonrası davranışı ve oluşan dalgalanmalar gösterilmiştir.



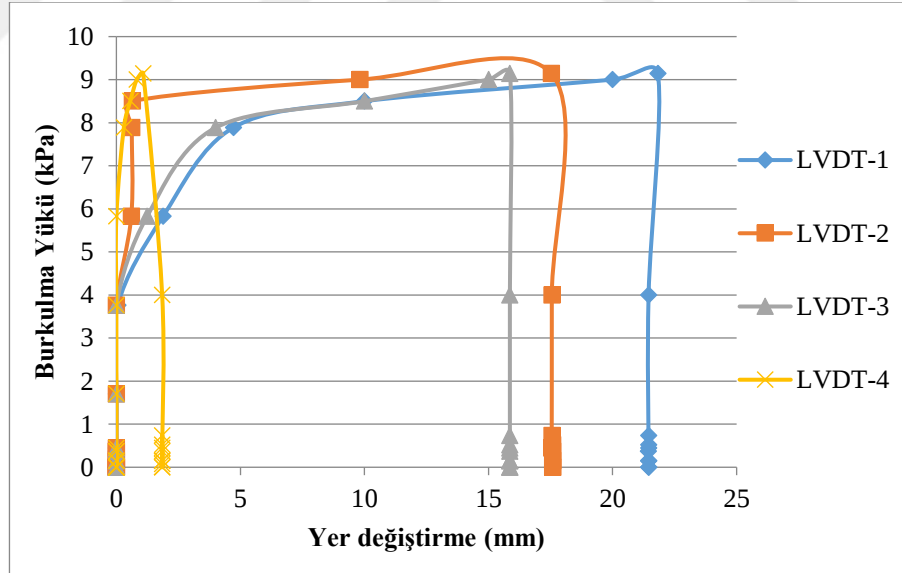
Şekil 4.7. %2,5-1t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği



Şekil 4.8. %2,5-1t deney numunesi

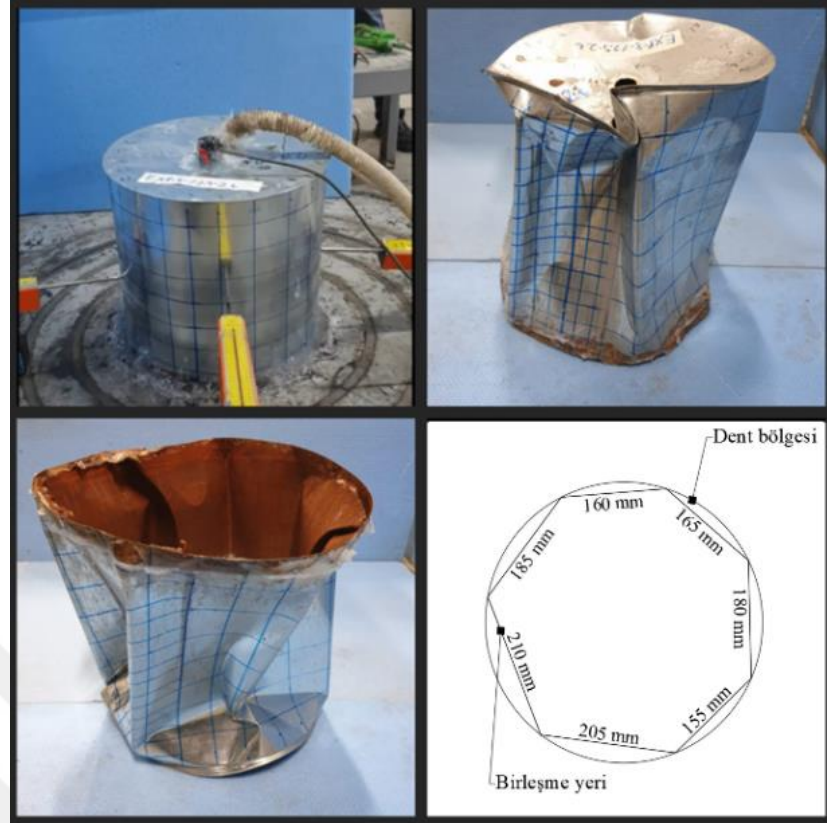
4.2.2.2. %2,5 Korozyonlu ve 2t çentikli deney numunesi (%2,5-2t)

Deney numunesi, %2,5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılarak korozyon süreci başlatılmış ve 2t çentikli silindir numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen Burkulma yükü-Yer değiştirme grafiği Şekil 4.9’da sunulmuştur. İlk burkulma değeri 1,70 kPa olarak ölçülmüştür. Bu değer, numunenin daha yüksek bir çentik yoğunluğuna sahip olduğunu ve dolayısıyla burkulma kapasitesinin korozyonsuz numuneye kıyasla daha erken noktada başladığını göstermektedir. Genel burkulma değeri 3,76 kPa’da gerçekleşmiş olup, bu aşama numunede daha belirgin şekil değişikliklerine yol açmıştır. Çentiklerin etkisiyle, burkulma kapasitesinin daha erken gerçekleştiği ve yapısal bütünlüğünün bu aşamalarda daha fazla zarar gördüğü gözlemlenmiştir. Göçme burkulma değeri ise 9,14 kPa olarak belirlenmiş ve bu noktada çatlaklar ve hava kaçakları gibi deformasyonlar tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çentiklerin ve korozyonun birleşiminin, numunenin dayanımını daha fazla düşürdüğünü ve burkulma kapasitesinin korozyonsuz numunelere göre daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.9. %2,5-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

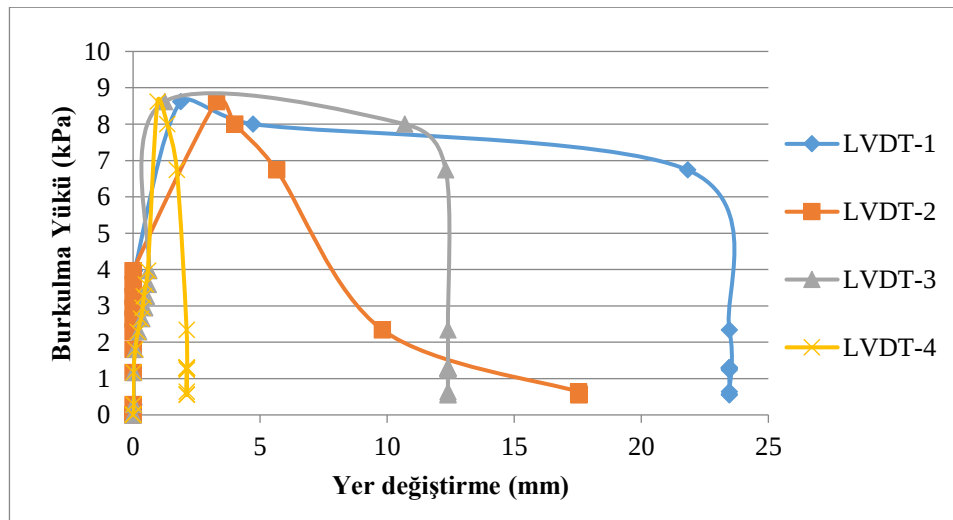
Deney sırasında ise çatlak oluşumu ve hava kaçırma gibi hasar belirtileri tespit edilerek oluşan dalgalanmalar Şekil 4.10’de gösterilmiştir. Ayrıca, burkulma davranışının üniform özellikte numunenin üst ve yan yüzeylerinde gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 4.10. %2,5-2t deney numunesi

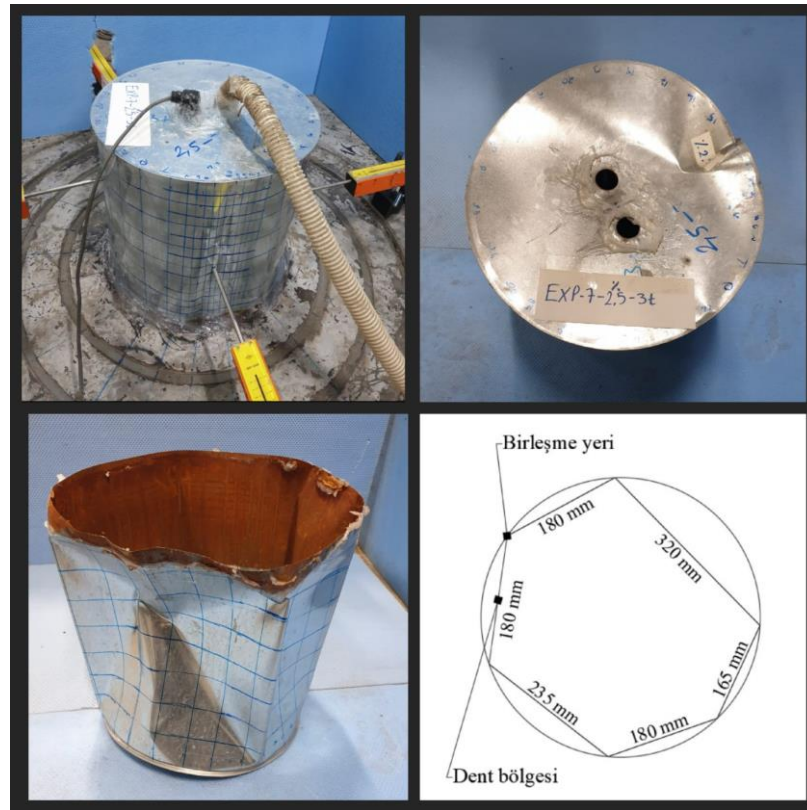
4.2.2.3. %2,5 Korozyonlu ve 3t çentikli deney numunesi (%2,5-3t)

Korozyona uğratılmış ve 3t çentikli %2,5-3t numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilerden burkulma yükü-yer değiştirme grafiği oluşturulmuş Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. %2,5-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

İlk burkulma 1,79 kPa’da gerçekleşmiştir. Bu, önceki iki numuneye göre biraz daha yüksek bir ilk burkulma değeri olup, bunun sebebi deney esnasında meydana gelen çevresel faktörlerin ve numunedeki gözle görülmeyen düzensizliklerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Genel burkulma değeri 3,96 kPa ile ölçülmüş ve bu değerde numune, çentiklerin daha fazla etkisiyle belirgin şekil değişikliklerine uğramıştır. Çentikli bölgeler ve korozyon etkisiyle numunenin burkulma kapasitesi daha erken kaybolmuş ve dayanımı daha fazla düşmüştür. Göçme burkulması, 8,62 kPa seviyesinde gerçekleşmiş ve bu noktada çatlak oluşumu ile hava sızdırma gibi deformasyonlar gözlemlenmiştir. Bu süreçte, maksimum burkulma yükü değeri, çelik tankın yapısal bütünlüğüne zarar veren çentik ve korozyon etkileri nedeniyle düşük bir noktada gerçekleşmiştir. Yer değiştirme değerleri de numunenin kırılgan yapısı sebebiyle sınırlı kalmıştır. Özellikle LVDT-1 ölçüm noktası, bu bölgelerde daha belirgin yer değiştirme dalgalanmaları olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu numune de korozyonun ve çentiklerin etkisiyle burkulma kapasitesinin erken kaybolduğunu, ancak çentik yoğunluğunun arttığı durumlarda burkulma ve göçme aşamalarının daha hızlı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Deney sonrası numunede oluşan deformasyon ve dalgalar Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

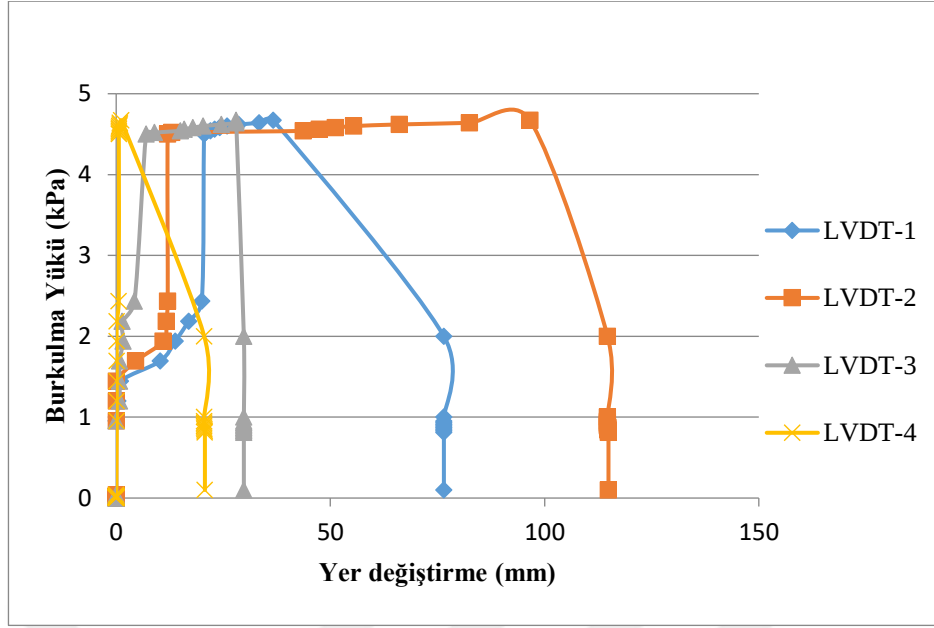


Şekil 4.12. %2,5-3t deney numunesi

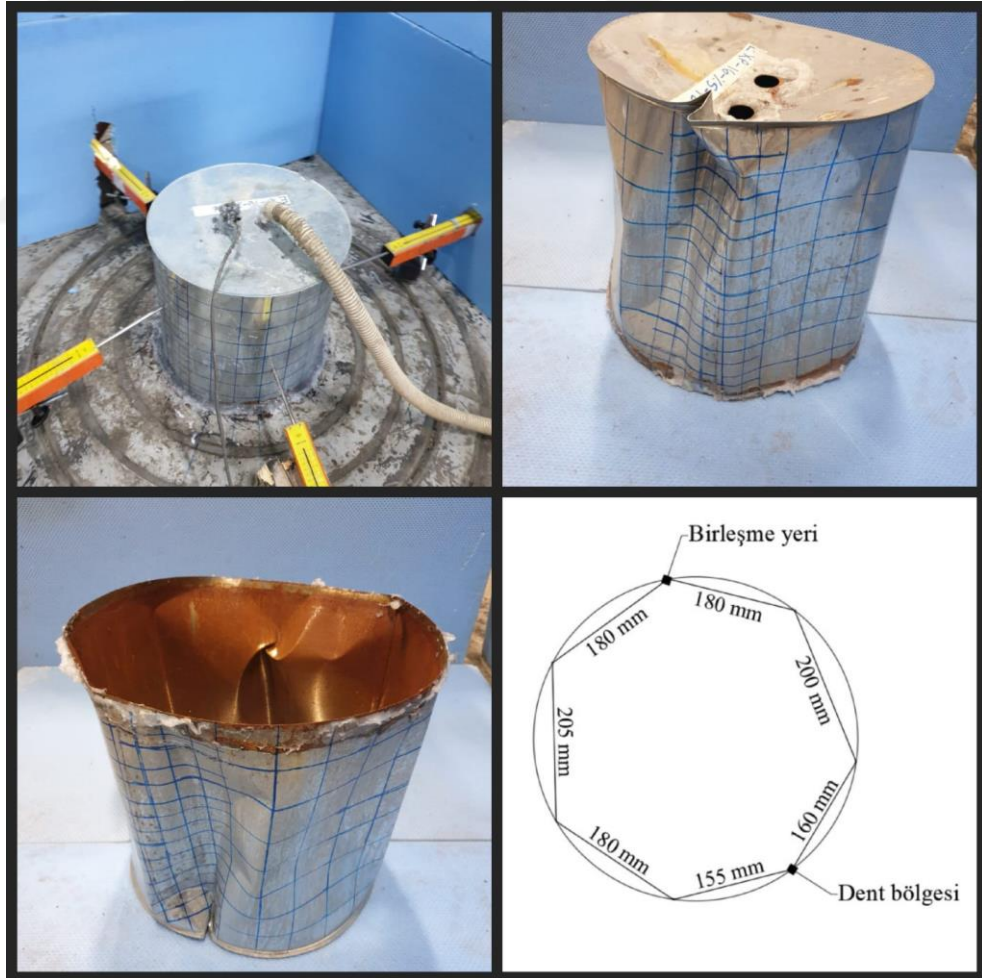
Üç numune arasındaki karşılaştırmada, çentik yoğunluğunun arttıkça, ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması değerlerinin daha erken gerçekleştiği ve burkulma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, korozyonun da etkisiyle, çentikli numunelerin dayanımında belirgin bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. Çentik derinliği arttıkça, burkulma kapasitesindeki düşüş daha belirgin hale gelmiştir. Bu da korozyon ve çentiklerin çelik tankların burkulma davranışını olumsuz yönde etkileyen önemli faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.

4.2.2.4. %5 Korozyonlu ve 1t çentikli deney numunesi (%5-1t)

Silindir numunesi %5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılarak korozyona uğratılmış ve çentikli (%5-1t) deney numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney verileri kullanılarak oluşturulan burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir. Numunede ilk burkulma değeri 0,95 kPa olarak ölçülmüştür. Bu, numunenin korozyon etkisi nedeniyle, korozyonsuz ve %2,5 korozyonlu numunelere kıyasla daha erken burkulma başladığını göstermektedir. İlk burkulma sonrası, genel burkulma değeri 4,50 kPa'ya ulaşmıştır. Bu aşama sırasında, numunede belirgin şekil değişiklikleri gözlemlenmiş ve çentik bölgesinde deformasyonlar oluşmaya başlamıştır. Çentikli bölgeler ve birleşim bölgesindeki zayıflamalar, burkulmanın daha erken başlamasına neden olmuştur. Göçme burkulması ise 4,67 kPa'da gerçekleşmiştir ve bu noktada çatlaklar ve hava kaçakları gibi hasar belirtileri gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, %5-1t çentikli numunede korozyonun ve çentiklerin etkisiyle burkulma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığını, ayrıca birleşim bölgesinin de etkilenecek burkulmanın erken başladığını göstermektedir. Deney sonrasında oluşan dalgalar ve deformasyonlar ise Şekil 4.14' gösterilmiştir.



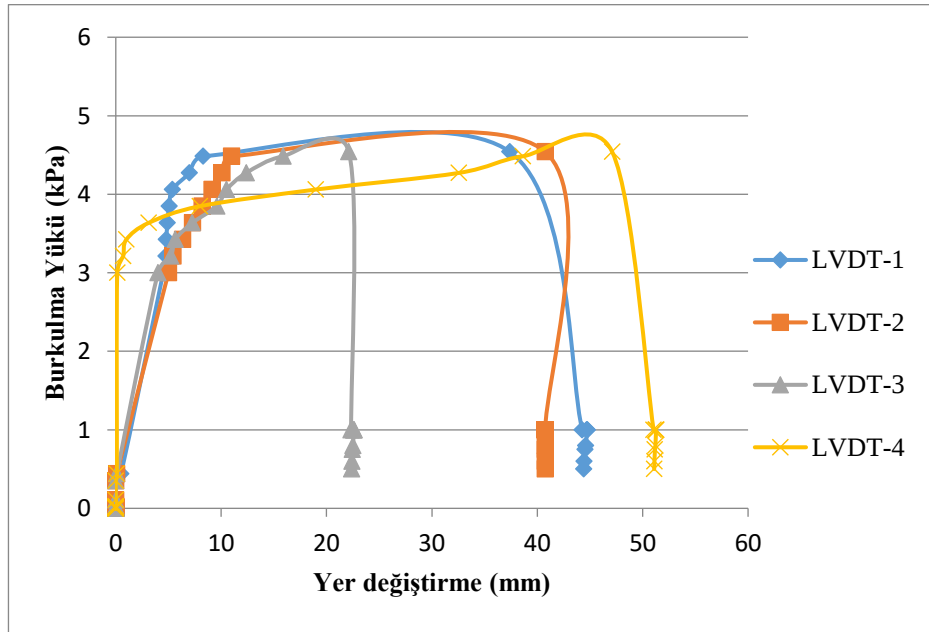
şekil 4.13. %5-1t Burkulma yüklü- Yer değiştirme grafiği



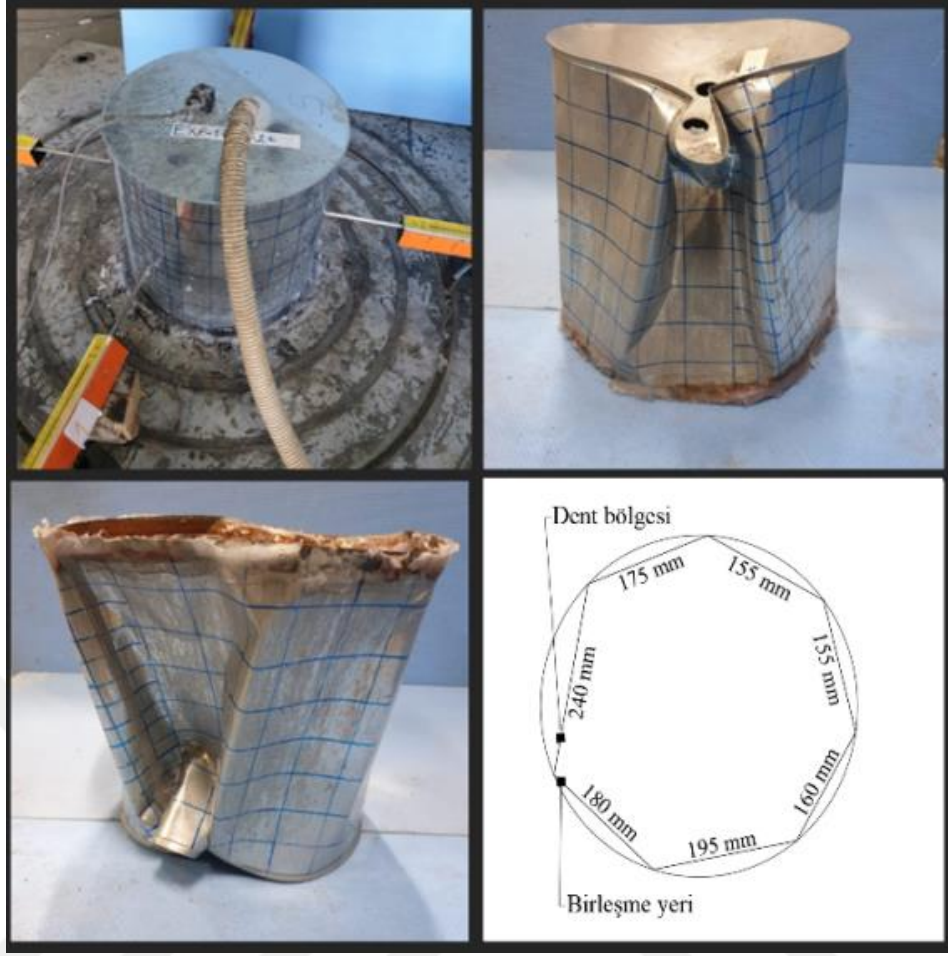
şekil 4.14. %5-1t deney numunesi

4.2.2.5. %5 Korozyonlu ve 2t çentikli deney numunesi (%5-2t)

Daha yüksek asidin neden olduğu korozyonun çelik tankların burkulma kapasitesine etkisini incelemek amacıyla, %5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılarak korozyona uğratılmış ve 2t çentikli (%5-2t) deney numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4. 15'te verilmiştir. Numune için ilk burkulma 0,44 kPa'da gerçekleşmiştir. Bu, çentik yoğunluğunun arttığı ve korozyonun etkisinin belirginleştiği durumun, numunenin daha da zayıflamasına neden olduğunu göstermektedir. İlk burkulma değeri, %5-1t numunesine göre daha düşük bir seviyede ölçülmüş ve bu da çentiklerin yapısal zayıflamayı daha da hızlandırdığını ortaya koymaktadır. Genel burkulma değeri 3,07 kPa olarak ölçülmüş ve bu aşamada numunede daha belirgin şekil değişiklikleri meydana gelmiştir. Çentik bölgesindeki zayıflamalar ve birleşim bölgelerindeki stres birikimi, burkulmanın daha erken başlamasına sebep olmuştur. Göçme burkulma değeri ise 4,54 kPa olarak belirlenmiştir ve bu aşamada numunede çatlaklar ve deformasyonlar gözlemlenmiştir. Çentiklerin yoğunluğu ve korozyonun etkisi, burkulma kapasitesini daha erken kaybettirmiştir. Deney sonrası oluşan dalgalar Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. %5-2t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği



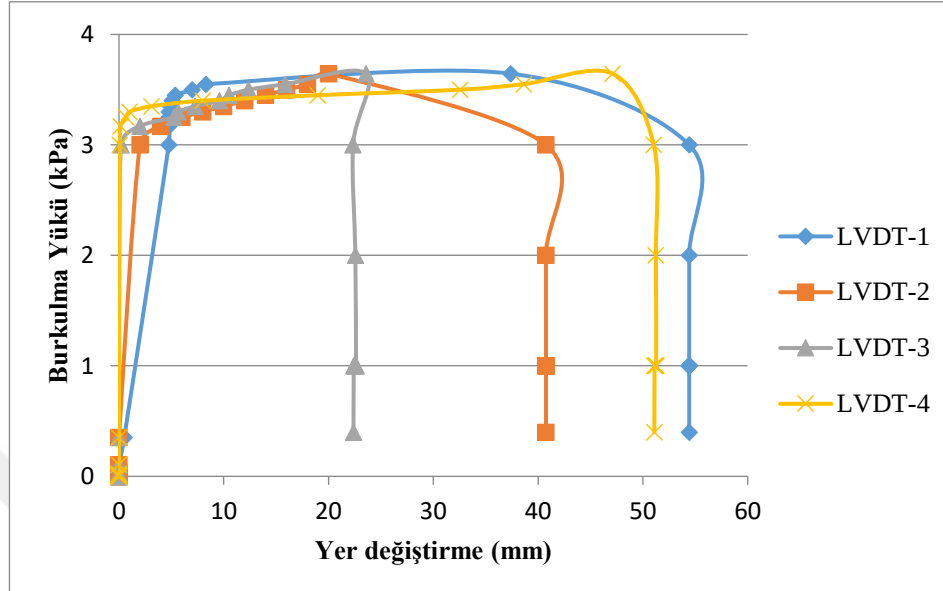
Şekil 4.16. %5-2t deney numunesi

4.2.2.6. %5 Korozyonlu ve 3t çentikli deney numunesi (%5-3t)

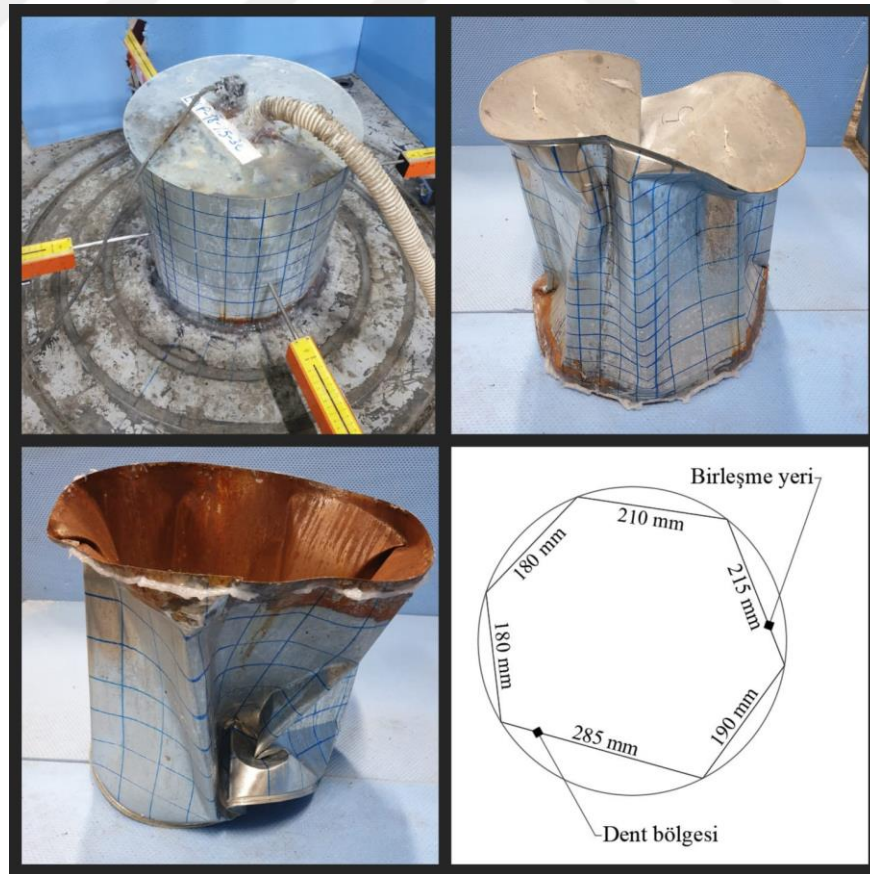
Daha yüksek asidin neden olduğu korozyonun çelik tankların burkulma kapasitesine etkisini incelemek amacıyla, %5 oranında hidroklorik aside maruz bırakılarak korozyona uğratılmış ve 3t çentikli (%5-3t) deney numunesi üzerinde burkulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir. %5-3t numunesinde, ilk burkulma 0,35 kPa olarak ölçülmüştür. Bu, çentik yoğunluğunun artması ve korozyonun etkisiyle, burkulmanın en erken gerçekleştiği numune olduğunu göstermektedir. Genel burkulma değeri 3,17 kPa olarak belirlenmiş olup, bu değer, çentiklerin ve korozyonun etkisiyle daha erken burkulma gerçekleştiğini ve numunenin dayanımının hızlı bir şekilde kaybolduğunu ortaya koymaktadır. Bu aşamada, çentik bölgeleri ve birleşim bölgelerinde yapısal zayıflamalar çok belirgin hale gelmiştir. Göçme burkulma ise 3,65 kPa ile kaydedilmiştir. Bu noktada, çatlaklar, hava kaçakları ve ciddi deformasyonlar gözlemlenmiştir. Çentiklerin ve korozyonun etkisi,

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

burkulma kapasitesini oldukça azaltmış ve birleşim bölgesindeki zayıflamalar, burkulmanın erken aşamalarında belirgin hasarların meydana gelmesine yol açmıştır. Deney sonrası oluşan hasarlar Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. %5-3t Burkulma yükü- Yer değiştirme grafiği

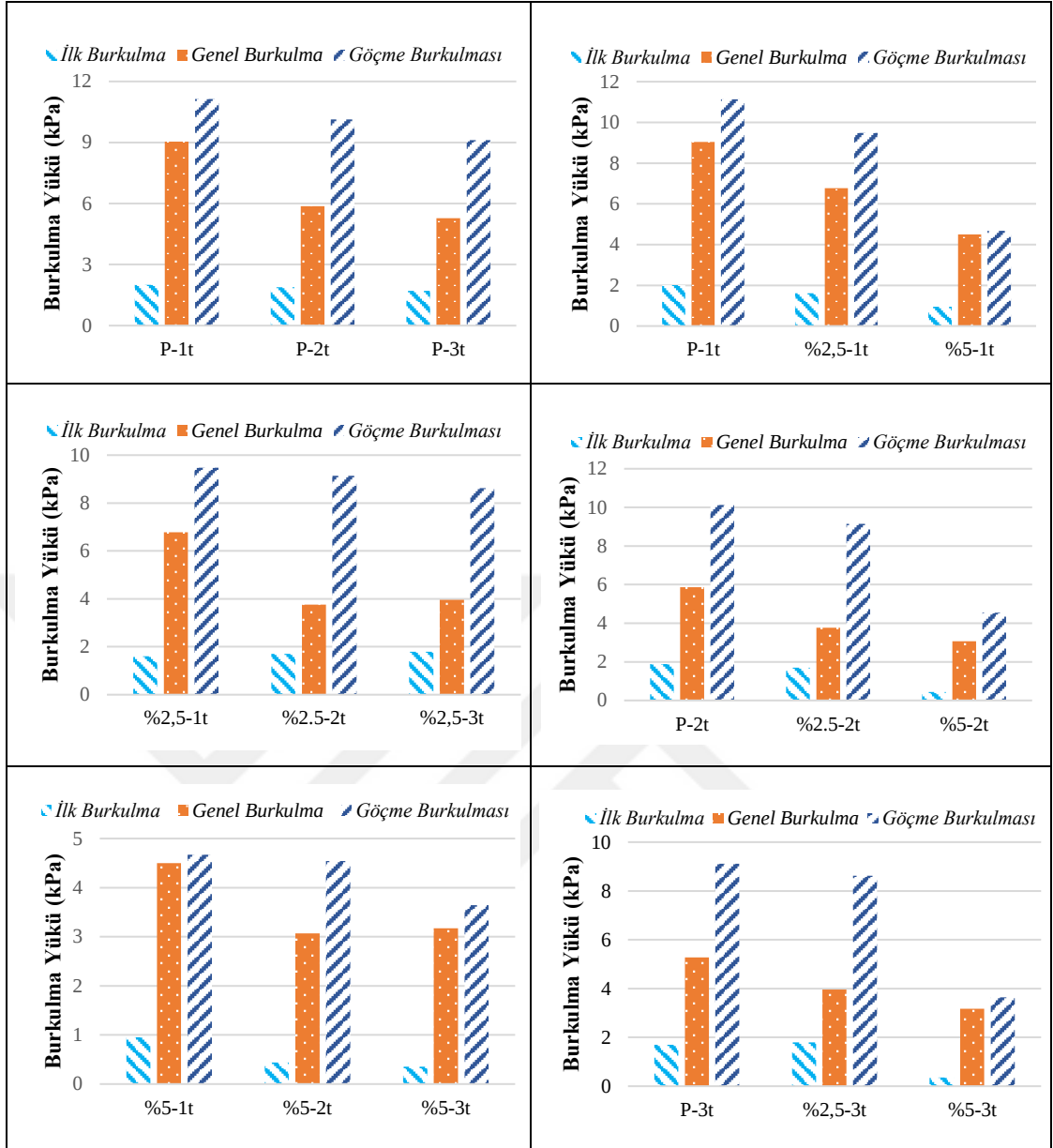


Şekil 4.18. %5-3t deney numunesi

Verilen üç numune arasındaki karşılaştırmada, çentik yoğunluğunun arttıkça burkulma yükü ve yer değiştirme değerlerinin daha düşük olduğu ve burkulma aşamalarının çok daha erken gerçekleştiği görülmektedir. Çentik ve korozyonun birleşimi, numunelerin dayanımını önemli ölçüde azaltmış ve burkulma kapasitesinin hızla kaybolmasına neden olmuştur. %5-3t numunesi, korozyon ve çentiklerin etkisiyle en düşük burkulma değerlerine ulaşırken, %5 -1t numunesi ise burkulma kapasitesini en yüksek oranda koruyan numune olmuştur. Birleşim bölgesindeki zayıflamalar ise tüm numunelerde önemli bir etkidir ve burkulma davranışını doğrudan etkileyen bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

4.2.3. Korozyon ve çentiğin silindir numuneleri üzerindeki etkisi

Genel olarak, korozyon ve çentiklerin birleşimi, çelik silindirlerin burkulma kapasitesini belirgin şekilde azaltmıştır. Korozyonlu numuneler, korozyonsuz numunelere göre çok daha düşük yüklerde burkulmaya başlamış ve bu etki, özellikle %5 korozyona maruz kalan numunelerde daha şiddetli hale gelmiştir. %2,5 ve %5 korozyon seviyeleri hem başlangıç burkulma yükü hem de genel ve göçme burkulma yüklerini düşürmüş, %5 korozyon seviyesinde daha ciddi yapısal bozulmalara yol açmıştır. Çentik derinliğinin artması da burkulma yüklerini olumsuz etkilemiş, özellikle 3t çentikli numunelerde burkulma çok daha düşük yüklerde gerçekleşmiştir. Çentik bölgelerindeki zayıflamalar ve korozyonun birleşim bölgelerine olan etkileri, burkulma sürecinin daha erken başlamasına ve numunelerin stabilitesinin ciddi şekilde azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, artan çentik derinliği ve korozyon seviyeleri, dalga oluşumlarının sayısını ve yük parametre oranlarını etkileyerek, yapısal dayanım ve kararlılıktaki kayıpları açıkça göstermiştir. Çentik kalınlığındaki artışın korozyonsuz numunelerin başlangıç, genel ve göçme burkulma yükleri üzerindeki etkileri ile çözeltilerin yüzdesindeki artışa bağlı olarak burkulma yüklerindeki değişim Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Çentik kalınlığı ve korozyon yüzdesinin karşılaştırmalı olarak burkulma yüklerine etkisi.

4.3. Silindir Numunelerinin Karşılaştırılması

Numuneler, çentik yoğunluğu (1t, 2t ve 3t çentikli) ve asit konsantrasyonu (%2,5 ve %5 HCl) açısından farklılaştırılarak burkulma performansı üzerine etkilerinin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Korozyonun ve çentiklerin çelik silindirlerin burkulma davranışı üzerindeki etkileri, numunelerin ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulma değerleri üzerinden yapılan karşılaştırmalarla net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Korozyonsuz numunelerde çentik derinliğinin artması, burkulma yükünün biraz daha erken gerçekleşmesine ve yük ile yer değiştirme arasında daha hızlı bir ilişki oluşmasına yol açmıştır. Korozyonlu numuneler ise, özellikle asit konsantrasyonu arttıkça (%5 HCl), burkulma yüklerinde ciddi bir düşüş sergilemiş, korozyon ve çentiklerin birleşimi çelik tankların dayanıklılığını zayıflatmıştır.

Korozyonsuz ve %2,5 korozyonlu numunelere kıyasla, %5 korozyonlu numunelerde burkulma çok daha hızlı gerçekleşmiş ve bu numuneler, çok daha düşük yüklerle deformasyona uğramıştır. Çentik yoğunluğunun artması hem korozyonsuz hem de korozyonlu numunelerde burkulmanın erken başlamasına neden olmuştur. Özellikle birleşim bölgelerindeki zayıflamalar, çentiklerin ve korozyonun etkisiyle daha belirgin hale gelmiş, bu durum burkulma kapasitesini önemli ölçüde düşürmüştür. %2,5 HCl çözeltisiyle korozyona uğramış numunelerde burkulma erken başlasa da %5 HCl çözeltisiyle korozyona uğramış numunelerde bu etki daha belirginleşmiştir. Çentik derinliğinin artması, burkulma yüklerini düşürmüş ve deformasyonların daha hızlı meydana gelmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, korozyon ve çentik etkilerinin birleşimi, çelik silindirelerin yapısal dayanıklılığını zayıflatmakta ve burkulma kapasitesini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu bulgular, ince cidarlı çelik yapılar için korozyon ve çentiklerin kontrol altına alınmasının önemini vurgulamaktadır.

4.4. Deney Verilerinin Teorik Formülasyonlarla Karşılaştırılması

Deneyisel çalışmadan elde edilen göçme burkulması değerleri, literatürdeki çalışmalardan türetilmiş olan teorik formülasyonlarla karşılaştırılmıştır (Jawad 1994; Ventsel and Krauthammer 2001; Ross 2007). Kullanılan formülasyonlarda kritik burkulma yükü Jawad Teorisine göre Eşitlik 4.1’de, Ventsel ve Krauthammer Teorisine göre Eşitlik 4.2’de ve Ross Teorisine göre Eşitlik 4.3’te verilmiştir.

$$P_{cr} = \frac{0,92E\left(\frac{t_e}{R}\right)^{2,5}}{\frac{L_e}{R}} \quad (4.1)$$

$$P_{cr} = 0,92 \frac{Et}{L_e} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{1,5} \quad (4.2)$$

$$P_{cr} = \frac{2,6E\left(\frac{t}{d}\right)^{2,5}}{\frac{H}{d}-0,45\left(\frac{t}{d}\right)^{0,5}} \quad (4.3)$$

Formülasyonlarda kullanılan parametreler aşağıda açıklanmıştır.

P_{cr} : Kritik burkulma yükü

E : Elastisite (Young) Modülü (210 kN/mm²)

$t=t_e$: Silindirin et kalınlığı (0,45 mm)

$R=r_m$: Silindirin yarıçapı (200 mm)

d : Silindirin çapı (400 mm)

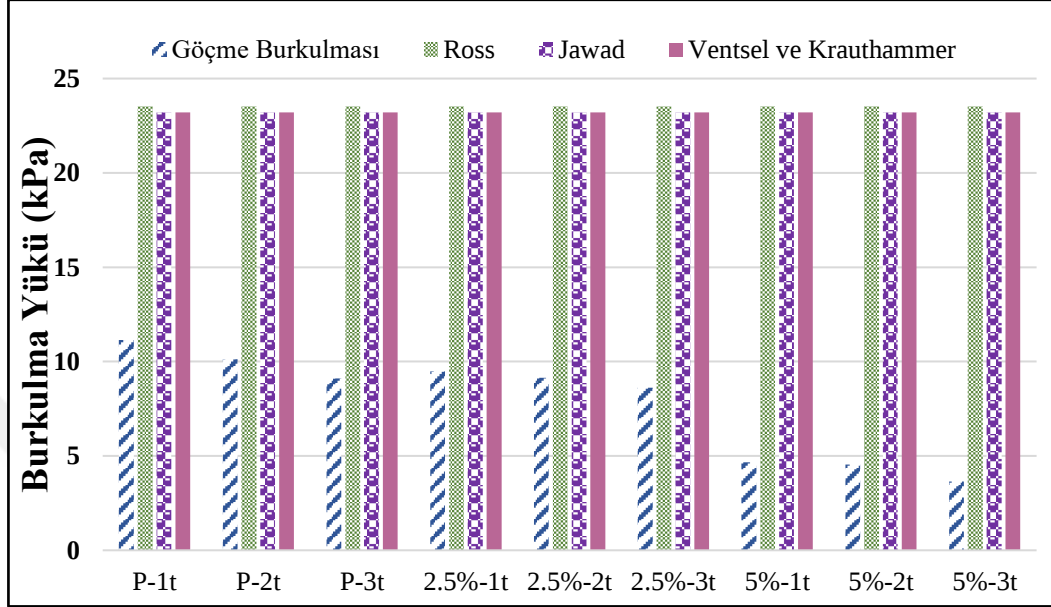
$H=L_e$: Silindirin yüksekliği (400 mm)

Çizelge 4.4. Göçme burkulma değerlerinin teorik değerlerle karşılaştırılması

Deney Grubu	Numune	Göçme Burkulması (kPa)	Jawad Teorisi (kPa)	Ventsel ve Krauthammer Teorisi (kPa)	Ross Teorisi (kPa)
Korozyonsuz Grup	P-1t	11,14	23,20	23,20	23,53
	P-2t	10,13			
	P-3t	9,12			
Korozyonlu Grup	%2,5-1t	9,48			
	%2,5-2t	9,14			
	%2,5-3t	8,62			
	%5-1t	4,67			
	%5-2t	4,54			
	%5-3t	3,65			

Çizelge 4.4'teki veriler doğrultusunda, korozyonsuz, %2,5 ve %5 korozyonlu numunelerin deneysel olarak elde edilen göçme burkulma değerleri, teorik formülasyonlarla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir. Korozyonsuz numuneler için deneysel sonuçlar, teorik değerlere göre yaklaşık %52 ile %61 oranında daha azdır. %2,5 hidroklorik asit ile korozyona uğramış numunelerde bu fark biraz daha artarak yaklaşık %59 ile %63 arasında değişmektedir. %5 korozyonlu numunelerde ise fark belirginleşmekte ve deneysel sonuçlar teorik değerlere göre %80 ile %84 oranında daha düşük çıkmaktadır. Bu durum, teorik formülasyonların çentik ve korozyon gibi

gerçek dünya etkilerini hesaba katmaması nedeniyle, burkulma kapasitesini fazla tahmin ettiğini göstermektedir. Deney sonucu burkulma değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Deney sonuçlarının teorik çalışmalarla karşılaştırması

Burkulma deneyi sonucunda, numunelerde oluşan dalga sayıları incelenmiş ve teorik formüllerle karşılaştırılmıştır (Teng et al. 2001; Fatemi et al 2013). Böylece, deneysel sonuçlarının teorik tahminlerle ne ölçüde uyumlu olduğunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan teorik formülasyon Eşitlik 4.4’te verilmiştir.

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

Formülasyonlarda kullanılan parametreler aşağıda açıklanmıştır.

n : Hesaplanan yaklaşık dalga sayısı

R : Silindirin yarıçapı (200 mm)

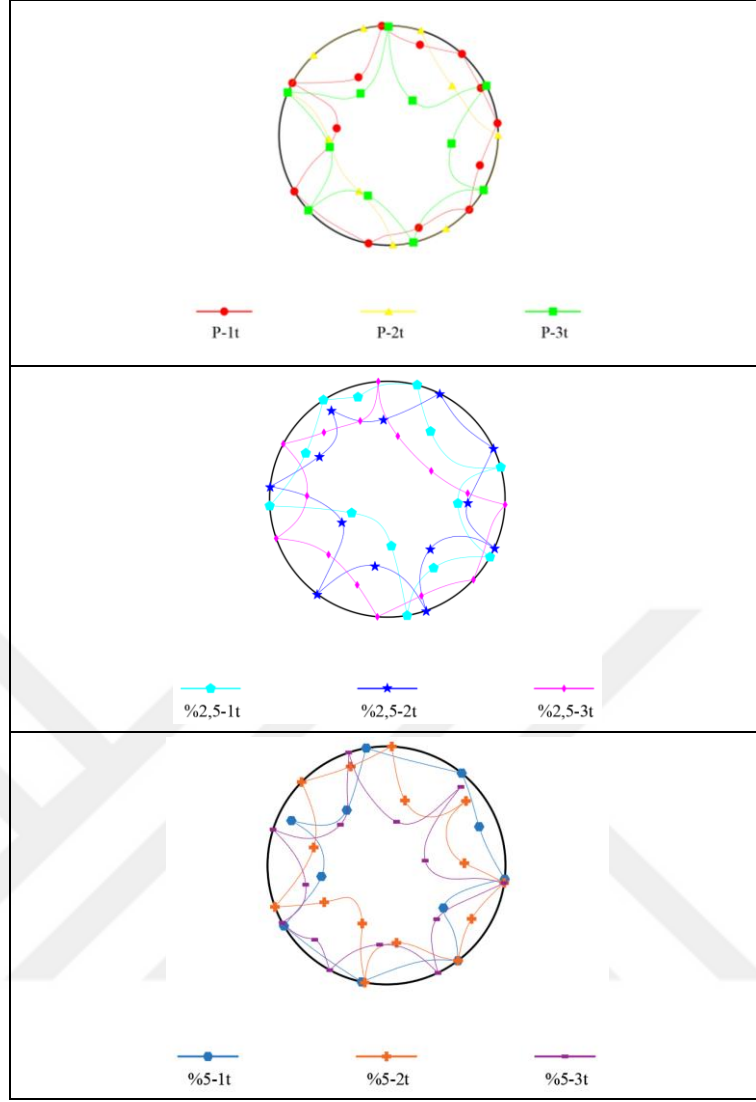
L : Silindirin yüksekliği (400 mm)

t : Silindirin et kalınlığı (0,45 mm)

Çizelge 4.5. Deney sonucu oluşan dalga sayılarının karşılaştırılması

Deney Grubu	Numune	Deney Sonucu Oluşan Dalga Sayıları	Teorik Formülden Elde Edilen Yaklaşık Dalga Sayısı
Korozyonsuz Grup	P-1t	7	8-9
	P-2t	2	
	P-3t	6	
Korozyonlu Grup	%2,5-1t	6	
	%2,5-2t	7	
	%2,5-3t	6	
	%5-1t	7	
	%5-2t	7	
	%5-3t	6	

Çizelge 4.5'te elde edilen bulgular, korozyon, çentik yoğunluğu ve başlangıç kusurları gibi gerçek dünya koşullarının dalga sayısı üzerinde belirgin bir etki yarattığını göstermiştir. Ancak teorik modeller, bu etkileri hesaba katmadığından, dalga sayıları genellikle deneysel sonuçlardan farklılık göstermiştir. Bu durum, teorik hesaplamaların deneysel davranışları tam olarak yansıtamadığını ve daha kapsamlı modellere ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. Silindir numunelerinde gözlemlenen dalga oluşumları Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Deney sonucu oluşan dalgalar

4.5. Deney Verilerinin Literatürle Karşılaştırılması

Burkulma deneyi sonuçlarından elde edilen verilerin literatürdeki bir çalışmayla (Maali et al. 2024) karşılaştırması yapılmıştır. Maali et al. 2024 tarafından yapılan çalışmada, bu tezde kullanılan numunelerle aynı boyutlara sahip silindirik numunelerin burkulma kapasitesi incelenmiştir. Çalışmalarında çentiksiz numuneler üzerinde odaklanılmış ve bu numuneler korozyonsuz (P), korozyona uğratılmış (%2,5-P) ve %5 hidroklorik asit ile korozyona uğratılmış (%5-P) olarak gruplandırılmıştır. Bu çalışmadaki çentikli olan, korozyonsuz, %2,5 ve %5 hidroklorik asit korozyonuna maruz bırakılmış numunelerin burkulma kapasitesi ile söz konusu numunelerin karşılaştırması Çizelge 4.6’te sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Çentikli ve çentiksiz numunelerin karşılaştırılması

Mevcut Çalışma		Maali et al. (2024)	
Numune	Göçme Burkulması (kPa)	Numune	Göçme Burkulması (kPa)
P-1t	11,14	P	12,38
P-2t	10,13		
P-3t	9,12		
%2,5-1t	9,48	%2,5-P	10,66
%2,5-2t	9,14		
%2,5-3t	8,62		
%5-1t	4,67	%5-P	5,33
%5-2t	4,54		
%5-3t	3,65		

Karşılaştırma, numunelerdeki çentiklerin tüm koşullarda göçme burkulma kapasitesinde bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Korozyona uğramamış numuneler için, mevcut çalışmadaki çentikli numune (P-1t), literatürdeki çalışmadaki çentiksiz numuneye kıyasla %10'luk bir göçme burkulma kapasitesi azalışı göstermektedir (12,38 kPa ve 11,14 kPa). %2,5 hidroklorik asit ile korozyona uğramış durumda, çentikli numune (%2,5-1t), çentiksiz numuneye kıyasla yaklaşık %11'lik bir azalma göstermektedir (10,66 kPa ve 9,48 kPa). Benzer şekilde, %5 korozyonlu durumda, çentikli numune (%5-1t), çentiksiz numuneye kıyasla %12'lik bir göçme burkulma kapasitesi azalışı yaşamaktadır (5,33 kPa ve 4,67 kPa). Bu azalmalar, çentiklerin silindirik numunelerin yapısal dayanımını önemli ölçüde zayıflattığını göstermektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, dış basınç yüklemesi altındaki çentikli silindirik numunelerin burkulma davranışı incelenmiştir. Toplamda, %2,5 ve %5 hidroklorik asit çözümlerine maruz bırakılmış korozyona uğramamış ve korozyona uğramış dokuz numune test edilmiştir. Numuneler, her korozyon seviyesi için üç farklı çentik kalınlığını (1t, 2t ve 3t) içermekte olup, çentik ve korozyon etkilerinin burkulma kapasitesi üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmeye olanak sağlamıştır. Numunelerde ölçülen ilk kusurlar %2 ile %3 arasında değişmiş, bu da gerçek dünya üretim ve operasyon koşullarını yansıtacak şekilde gerçekçi bir temsil sunmuştur. Çalışmanın önemli bulguları şunlardır:

Korozyon nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybı, %2,5 hidroklorik asit çözeltisine maruz bırakılan numunelerde %6,7 ile %7,1 arasında, %5 asit çözeltisine maruz bırakılan numunelerde ise %9,2 ile %9,8 arasında değişmiştir.

Genel burkulma yükü ile ilk burkulma yükü oranı 1,04 ile 4,74 arasında değişirken, göçme burkulması ile genel burkulma yükü oranı 1,04 ile 2,43 arasında değişmiş, bu da korozyon ve çentiklerin numunelerin burkulma performansı üzerindeki birleşik etkilerini yansıtmaktadır.

Deneyler sırasında gözlemlenen toplam burkulma dalga sayısı, korozyon seviyelerine göre değişmiştir. Korozyona uğramamış numunelerde dalga sayısı 2 ile 7 arasında, %2,5 korozyonlu numunelerde 6 ile 7 arasında, %5 korozyonlu numunelerde ise 6 ile 7 arasında değişmiştir.

Korozyon, numunelerin burkulma kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Korozyona uğramamış numunelerle karşılaştırıldığında, %2,5 korozyon burkulma kapasitesinde %11'e kadar bir azalmaya, %5 korozyon ise %12'ye kadar bir azalmaya yol açmıştır.

Teorik formülasyonlarla karşılaştırıldığında, her iki formülasyonun da burkulma kapasitelerini sürekli olarak fazla tahmin ettiği gözlemlenmiştir. Bu tutarsızlık, teorik

modellerin, çalışmadaki önemli faktörler olan korozyon ve kusurlar gibi gerçek dünya etkilerini hesaba katmamasına bağlanmıştır.

İnce cidarlı çelik tankların burkulma davranışı, çentikler ve korozyon ile dış baskılardan önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etkileşimlerin anlaşılması, bu depolama sistemlerinin yapısal bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Gelecekteki araştırmalar, bu tür yapıların burkulma durumlarına karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla gelişmiş modelleme tekniklerini kullanmaya devam etmelidir.

Çentiklerin olumsuz etkilerine odaklanılsa da kompozit malzemelerin kullanılması veya yenileme işlemleri gibi bazı tasarım stratejilerinin bu sorunları hafifletebileceği ve silindirik kabukların genel dayanıklılığını artırabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- Attia, S., Mohareb, M. and Adeeb, S. 2024. Nonlinear Finite Element Formulation for Thin-Walled Conical Shells. *Thin-Walled Structures*, 112617.
- Aydin, A. C., Yaman, Z., Ağcakoca, E., Kiliç, 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.
- Aydin, A. C., Bilen, M. B. and Maali, M. 2022. Effect of hydrochloric acid corrosion and CFRP coating on the buckling behavior of cylindrical shells under external pressure. *Scientia Iranica*, 29(6), 2886-2901.
- 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., Maali, M., Kiliç, M., Bayrak, B. and Akarsu, O. 2023. A numerical perspective for CFRP-wrapped thin-walled steel cylinders. *Steel Construction*, 16(4), 227-236.
- Baddoo, N. R. 2008. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities. *Journal of constructional steel research*, 64(11), 1199-1206.
- 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.
- 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.
- Demeri, M. Y. 2013. *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*. ASM international.
- 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(1), 4231631.
- El-Mahdy, G.M., Yassen, A.H. and Khaled, A. 2019. Strengthening of corroded steel structures using CFRP – an experimental review. 17-19 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.

- Fazlalipour, N., Ghalghachi, R. N. and Firouzsalar, S. E. 2022. Buckling Behaviour of Locally Dented GFRP Cylindrical Shells Under External Pressure—A Numerical Study. In International Conference on Innovative Solutions in Hydropower Engineering and Civil Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 263-271.
- 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.
- Fridman, M. M., Elishakoff, I., & Ribakov, Y. 2024. The history and the current state of the art related to structures under stress and corrosion. *Mechanics Research Communications*, 140, 104320.
- 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.
- 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, 418-491.
- Jawad, M. 2012. Theory and design of plate and shell structures. Springer Science and Business Media.
- 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.
- 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.
- Krasovsky, V. and Evkin, A. 2021. Experimental investigation of buckling of dented cylindrical shells under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 164, 107869.
- 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. and Kilic, M. 2020. Post-fire behavior of CFRP retrofitted thin-walled steel tanks. *Fire and Materials*, 44(7), 1013-1028.
- 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., Tizi, H., Tizi, Y. and Bilen, M. B. 2024. Investigation of buckling capacity behaviours of corroded tanks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 211, 105269.
- Musa, A. E., Al-Shugaa, M. A. and Al-Gahtani, H. J. 2021. An equivalent imperfection-based FE simulation of the stability of dented cylindrical shells accounting for unintended imperfections. *Thin-Walled Structures*, 158, 107159.
- Ren, R., Ma, X., Yue, H., Yang, F. and Lu, Y. 2024. Stiffness enhancement methods for thin-walled aircraft structures: A review. *Thin-Walled Structures*, 111995.
- Pourkhorshidi, S. and Abedi, K. 2017. 05.16: Stability behavior of graded dented cylindrical steel shells under the action of combined external and axial pressure. *Ce/papers*, 1(2-3), 1162-1171.
- 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. 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.
- Sagioglu, M., Maali, M., Kar, M. and Bilen, M. B. 2023. Cold-formed steel beam-tocolumn screw connections exposed to high temperatures reinforced with CFRP. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-17.
- Saifi, F., Anas, S. M., Tahzeeb, R., Shariq, M. and Alam, M. 2024. Numerical investigation of blast loading effects on a thin-walled cylindrical steel storage tank. *Materials Today: Proceedings*. Stern, W.R. 2005. Yazılı görüşme. Batı Avustralya Üniversitesi Tarım Enstitüsü Agronomi Bölümü, Nedland, Avustralya.
- Shokrzadeh, A. R., Mansuri, F., Asadi, M. and Sohrabi, M. R. 2020. Comparative analysis on buckling behavior of steel cylindrical tanks by consideration of more realistic numerical models. In *Proceedings of 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineer*.

- Shreir, L. L. 2013. Corrosion: corrosion control. Newnes.
- 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.
- Suleimenov, U., Zhangabay, N., Utelbayeva, A., Azmi Murad, M. A., Dosmakanbetova, A., Abshenov, K., Baganova, S., Moldagaliyev, A., Imanaliyev, K. and Duissenbekov, B. 2022. Estimation of the strength of vertical cylindrical liquid storage tanks with dents in the wall. *Eastern-European Journal of enterprise technologies*, 1(7), 115.
- Taraghi, P., Showkati, H. and Firouzsafari, 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., Zirakian, T. and Karampour, H. 2021. Parametric study on buckling stability of CFRP-strengthened cylindrical shells subjected to uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 161, 107411.
- Teng, J. G., Zhao, Y. and Lam, L. 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. *Thin-Walled Structures*, 39(8), 685-707.
- Ventsel, E., Krauthammer, T. and Carrera, E. J. A. M. R. 2002. Thin plates and shells: theory, analysis, and applications. *Appl. Mech. Rev.*, 55(4), B72-B73.
- Zeybek, Ö., Topkaya, C. and Rotter, J. M. 2021. Stability of Open-Top Cylindrical Steel Tanks with Primary Stiffening Ring under Wind Loading. *Ce/papers*, 4(2-4), 1781-1788.
- Zhang, Z., Xu, S. and Li, R. 2020a. 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. 2020b. Local and post-buckling behavior of corroded axially-compressed steel columns. *Thin-Walled Structures*, 157, 107108.
- Zhang, P., Gu, F., Cao, Z., Wang, H., Chen, Z., Xiao, H., Wang, X. and Ma, G. 2024. Theoretical and experimental research on the critical buckling pressure of the thin-walled metal liner installed in the composite overwrapped pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 212, 105335.