



**İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN
GÜÇLENDİRME YAPILARAK BURKULMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Murat ŞİMŞEK

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

**2022
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN GÜÇLENDİRME YAPILARAK
BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Murat ŞİMŞEK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahyar MAALİ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

30 / 06 / 2022

Murat ŞİMŞEK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNCE CİDARLI ÇELİK TANKLARIN GÜÇLENDİRME YAPILARAK BURKULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Murat ŞİMŞEK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALİ

Bu çalışmada ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasitesine, yükseklik ve güçlendirme veya yalıtımın etkisi araştırılmıştır. Çalışmaya esas teşkil edecek şekilde üç grup ince cidarlı çelik tank modeli hazırlanmıştır. Birinci grup silindirik tank modellerinde numunelere herhangi bir güçlendirme ve kaplama yapılmazken, ikinci grup modellerde numuneler yükseklikleri boyunca CFRP kumaşla kaplanarak güçlendirilmiştir. Üçüncü grup modellerdeki numuneler yükseklikleri boyunca Delta Thene yalıtım membranı ile kaplanmıştır. Deneyler 400x400x0,45mm, 400x800x0,45mm, 400x1200x0,45mm, 400x1600x0,45mm boyutlarında çatı kısımları aynı kalınlıktaki malzemeden yapılan kapakla kapatılmış, alt kısımları açık 12 adet numune üzerinde yapılmıştır. İnce cidarlı çelik tankların bulunduğu ortam şartlarından dolayı meydana gelebilecek yoğunlaşma, korozyon ve sızdırma vb. sorunlar yalıtımı daha önemli hale getirmektedir. Bu nedenle ince cidarlı çelik tankların Delta- Thene membranı ile yalıtımı yapılarak yalıtımın tankların burkulma kapasitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelemiştir. Hazırlanan ince cidarlı model tank numuneleri özel olarak tasarlanan deney düzeneğine yerleştirilerek numunelerin hava sızdırmazlıkları sağlanıp vakumlu deney düzeneği ile test edilen numunelerde meydana gelen deformasyonlar yük hücresi(load Cell) ve LVDT'ler (Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler) marifetiyle ölçülerek veri kaydediciyle (data logger) bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Toplanan verilerden grafikler çizdirilmiştir. Bulunan veriler ışığında Delta-Thene membranı ince cidarlı çelik tankların ilk burkulma kapasitesinde, CFRP ilk ve genel burkulma kapasitesinde artış meydana getirmiştir.

2022, 75 Sayfa

Anahtar Kelimeler: İnce cidarlı Çelik tank, Burkulma, CFRP, Delta-Thene, güçlendirme.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF BUCKLING BEHAVIOR OF THIN-WALLED STEEL TANKS BY REINFORCING

Murat ŞİMŞEK

Erzurum Technical University
Gradute School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahyar MAALİ

This study investigated the effect of height and reinforcement or insulation on the buckling capacity of thin-walled steel tanks. Three groups of thin-walled steel tank models were prepared as a basis for the study. In the first group of cylindrical tank models, no reinforcement and coating is applied to the specimens, In the second group of models, the specimens were reinforced by covering their height with CFRP fabric. The specimens in the third group models were covered with Delta Thene insulation membrane along their height. The experiments were carried out on 12 specimens with dimensions of 400x400x0,45mm, 400x800x0,45mm, 400x1.200x0,45mm, 400x1.600x0,45mm, the roof parts of which were covered with a cover made of the same thickness material, and the lower parts were open. Condensation, corrosion, leakage, etc., may occur due to ambient conditions in thin-walled steel tanks. Therefore, problems make insulation more critical. For this reason, the effects of insulation on the buckling capacity of the tanks were investigated experimentally by insulating thin-walled steel tanks with a Delta-Thene membrane. The prepared thin-walled model tank samples are placed in a specially designed test setup, the air tightness of the samples is ensured, and the deformations that occur in the samples tested with the vacuum test setup are measured by load cells and LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) and recorded with a data logger—transferred to the computer environment. Graphs were drawn from the collected data. In light of the data found, Delta-Thene membrane increased the initial buckling capacity of thin-walled steel tanks, and CFRP increased the initial and overall buckling capacity.

2022, 75 Page

Keywords: Thin-Walled Steel Tank, Buckling, CFRP, Delta-Thene, Reinforcement.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın başından beri bilgi birikim ve tecrübeleriyle desteklerini esirgemeyen ilim irfan rehberi danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALİ'ye teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Çalışmamın bütün safhası boyunca yanımda olan desteğini esirgemeyen hocam Araştırma Görevlisi Sayın Mahmut Buğra BİLEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Dua ve destekleriyle her daim yanımda olan annem ve babama, çalışmam boyunca göstermiş oldukları sabırdan dolayı eşim Yasemin ŞİMŞEK'e, biricik oğlum Melih Talha'ma ve biricik kızım Asel Mihra'ma çok teşekkür ederim.

Eğitimim hayatım boyunca üzerimde hakkı olan tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Murat ŞİMŞEK
Haziran 2022

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL ve YÖNTEM	8
3.1. Materyal	8
3.1.1. CFRP kumaş	8
3.1.2. Delta-Thenne membran.....	9
3.1.3. Deformasyon ölçme aleti (LVDT).....	10
3.1.4. Veri toplama cihazı (Data Logger)	11
3.2. Yöntem.....	12
3.2.1. Silindirik tank modellerinin hazırlanışı.....	12
3.2.2. Burkulma deneyleri.....	16
3.2.3. Teorik burkulma değerleri ve çevresel burkulma dalga sayısı.....	18
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	20
4.1. Güçlendirme veya Kaplama Yapılmayan Silindirik Tank Modelleri	22
4.1.1. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H400 numunesi.....	22
4.1.2. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H800 numunesi.....	25
4.1.3. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan B-H1.200 numunesi	28
4.1.4. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H1.600 numunesi.....	31
4.1.5. Deney sonrası güçlendirme veya kaplama yapılmayan numunelerin karşılaştırılması	33
4.2. CFRP Kumaşla Güçlendirilen İnce Cidarlı Silindirik Tank Modelleri.....	34
4.2.1. CFRP ile güçlendirilen C-H400 numunesi	35
4.2.2. CFRP ile güçlendirilen C-H800 numunesi	37

4.2.3. CFRP ile güçlendirilen C-H1.200 numunesi	40
4.2.4. CFRP ile güçlendirilen C-H1.600 numunesi	43
4.2.5. Deney sonrası CFRP ile güçlendirilen numunelerin karşılaştırılması	46
4.3. Delta-Thene Membranı ile Kaplanan İnce Cidarlı Silindirik Tank Modelleri.....	48
4.3.1. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H400 numunesi	48
4.3.2. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H800 numunesi	51
4.3.3. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H1.200 numunesi	54
4.3.4. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H1.600 numunesi	57
4.3.5. Delta-Thene membranı ile kaplanan numunelerin karşılaştırılması	60
4.4. Aynı Boyutlardaki İnce Cidarlı Silindirik Tank Modellerinin Karşılaştırılması	61
4.4.1. B-H400, C-H400 ve D-H400 numunelerinin karşılaştırılması	61
4.4.2. B-H800, C-H800 ve D-H800 numunelerinin karşılaştırılması	63
4.4.3. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200 numunelerinin karşılaştırılması	65
4.4.4. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600 numunelerinin karşılaştırılması	66
4.5. Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Burkulma Yükleri İle Oluşan Hasarların Mukayesesi	68
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
d	Silindir kabuk çapı
DELTA THENE	Dört kez çaprazlama lamine özel HDPE folyo ile bitüm kauçuktan oluşan su yalıtım membranı
E	Elastisite modülü
H= L_e	Silindir yüksekliği
P_{cr}	Silindirik tanklara ait kritik burkulma yükü
r= r_m=R	Silindir kabuk yarıçapı
t ve t_e	Etkin kalınlık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İnce Cidarlı Çelik tankların kullanım alanları a) Silo tipi yapılar b) Enerji santralleri	1
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan CFRP kumaş.....	8
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan Delta-Tehene membranı	10
Şekil 3.3. Deformasyon ölçme aletleri (LVDT)	11
Şekil 3.4. Veri toplama cihazı (Data Logger)	11
Şekil 3.5. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan silindirik tank modelleri	13
Şekil 3.6. CFRP epoksi astarı ve yapıştırıcısı a) Epoksi astar birleşenleri b) Epoksi astar birleşenlerinin uygun oranlarda karıştırılması (c) Epoksi yapıştırıcı birleşenleri (d) Epoksi yapıştırıcı birleşenlerinin uygun oranda karıştırılması	14
Şekil 3.7. CFRP uygulama aşamaları (a) Epoksi astar sürülmesi (b) Epoksi yapıştırıcı sürülmesi (c) Uygun ölçülerde CFRP kumaş kesilmesi (d) CFRP kumaş yapıştırılarak üzerine epoksi yapıştırıcı sürülmesi (e) CFRP ile güçlendirilen silindirik tank modelleri.....	15
Şekil 3.8. Delta-Thene ile kaplanan silindirik tank modelleri	16
Şekil 3.9. Deney Düzeneğine yerleştirilmiş örnek bir numune	17
Şekil 4.1. B-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	22
Şekil 4.2. Burkulma deneyi sonrası B-H400 numunesinin son hali	23
Şekil 4.3. B-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	24
Şekil 4.4. B-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	24
Şekil 4.5 B-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	25
Şekil 4.6. Burkulma deneyi sonrası B-H800 numunesinin son hali	26
Şekil 4.7. B-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	27
Şekil 4.8. B-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	27
Şekil 4.9. B-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	28
Şekil 4.10. Burkulma deneyi sonrası B-H1.200 numunesinin son hali	29
Şekil 4.11. B-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	30
Şekil 4.12 B-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	30
Şekil 4.13. Burkulma deneyi sonrası B-H1.600 numunesinin son hali	31
Şekil 4.14. B-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	32

Şekil 4.15. B-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	32
Şekil 4.16. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması.....	33
Şekil 4.17. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan silindirik tank numunelerinin son halleri	34
Şekil 4.18. Burkulma deneyi sonrası C-H400 numunesinin son hali	35
Şekil 4.19. C-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	36
Şekil 4.20. C-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	36
Şekil 4.21. C-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	37
Şekil 4.22. Burkulma deneyi sonrası C-H800 numunesinin son hali	38
Şekil 4.23. C-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	39
Şekil 4.24. C-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	39
Şekil 4.25. C-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	40
Şekil 4.26. Burkulma deneyi sonrası C-H1.200 numunesinin son hali	41
Şekil 4.27. C-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	42
Şekil 4.28. C-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	42
Şekil 4.29. C-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	43
Şekil 4.30. Burkulma deneyi sonrası C-H1.600 numunesinin son hali	44
Şekil 4.31. C-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları.....	45
Şekil 4.32. C-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği.....	45
Şekil 4.33. CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması	46
Şekil 4.34. CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinin son halleri	47
Şekil 4.35. D-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	48
Şekil 4.36. Burkulma deneyi sonrası D-H400 numunesinin son hali	49
Şekil 4.37. D-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları	50
Şekil 4.38. D-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği	50
Şekil 4.39. D-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi	51
Şekil 4.40. Deney sonrası D-H800 numunesinin son hali	52
Şekil 4.41. D-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları	53
Şekil 4.42. D-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği	53
Şekil 4.43. D-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	54
Şekil 4.44. Deney sonrası D-H1.200 numunesinin son hali	55

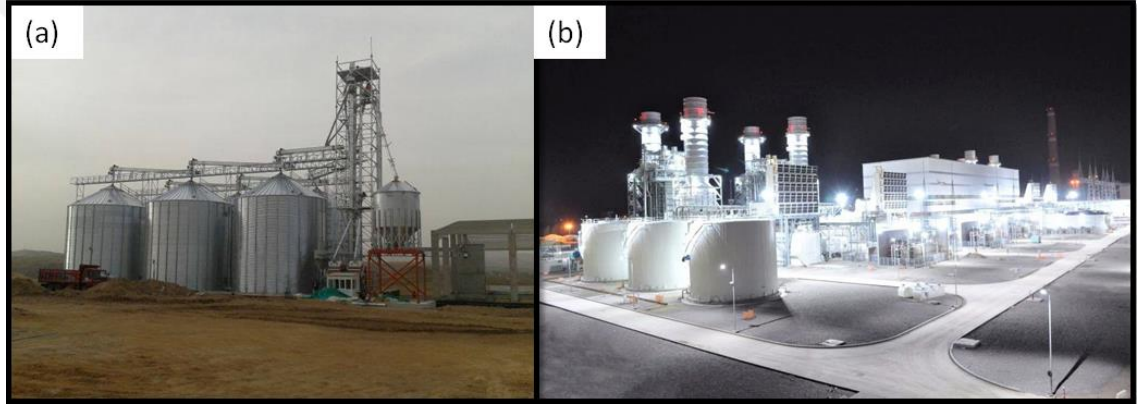
Şekil 4.45. D-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları	56
Şekil 4.46. D-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği	56
Şekil 4.47. D-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi.....	57
Şekil 4.48. Deney sonrası D-H1.600 numunesinin son hali	58
Şekil 4.49. D-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları	59
Şekil 4.50. D-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği	59
Şekil 4.51. Delta-Then membranı ile kaplanan silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 4.52. Delta-Then ile kaplanan silindirik tank numunelerinin son halleri	60
Şekil 4.53. B-H400, C-H400 ve D-H400 silindirik tank numunelerinin son halleri	62
Şekil 4.54. B-H400, C-H400 ve D-H400 numunelerinin ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.	62
Şekil 4.55. B-H800, C-H800 ve D-H800'ün son halleri.....	64
Şekil 4.56. B-H800, C-H800 ve D-H800'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.57. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200'ün son halleri.....	65
Şekil 4.58. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.....	66
Şekil 4.59. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600'ün son halleri.....	67
Şekil 4.60. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.61. Deneysel ve teorik göçme burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan CFRP kumaş ve epoksi reçinenin özellikleri.....	9
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan Delta-Thene Membran teknik özellikleri	10
Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan LVDT’lerin konum bilgileri	17
Çizelge 4.1. Silindirik tank modellerinin güçlendirme öncesi ve sonrası ağırlıkları.....	20
Çizelge 4.2. Silindirik tank numunelerinin burkulma değerleri	21
Çizelge 4.3. DeneySEL ve teorik burkulma kapasiteleri arasındaki hata oranları	69
Çizelge 4.4. Deney sonucu oluşan dalga sayısı ile teorik formüllerden elde edilen oluşabilecek dalga sayılarının karşılaştırılması	70

1. GİRİŞ

İnce cidarlı çelik tanklar; su, petrol ve gaz depoları, nükleer enerji santralleri, soğutma kuleleri, bazı endüstriyel ve kimyasal tesisler, havacılık ve uzay sanayisi, açık deniz platformları vb. mühendislik uygulamalarında geniş yer bulan modern yapılardır (Aghajari et al. 2006). Hafif ve yüksek mukavemetli olmaları, kolay kurulup sökülerek taşınmaları, tadilatları, estetik görünüş vb. avantajları sayesinde büyük miktarlardaki katı, sıvı ve gaz malzemelerin kısa veya uzun vadede depolanması için ince cidarlı çelik tanklar daha elverişlidirler. Şekil 1.1’de ince cidarlı çelik tankların örnek kullanım alanlarıyla ilgili fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 1.1. İnce cidarlı çelik tankların kullanım alanları a) silo tipi yapılar b) enerji santralleri.

İnce cidarlı çelik tankların kullanım alanlarının artmasıyla birlikte bu alanda yapılan çalışmaların sayısı da artmıştır. İnce cidarlı kabuk yapılarda cidar kalınlığı diğer boyutlara nazaran daha küçük olduğundan basınç gerilmeleri altında burkulma problemini engellemek için eğilme etkisinin daha az olduğu dairesel kesitler tercih edilir (Rotter 2001). İnce cidarlı çelik tank gibi yapıların geometrileri ve taşıyıcı sistem tasarımları, depolanması düşünülen katı, sıvı veya gaz malzemenin özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu gibi yapılarda doluluk oranı burkulmaya karşı önemli bir faktör olmaktadır (Özel 2007). İnce cidarlı çelik yapı elemanları narinliklerinden ötürü hem eğilmede hem de aksenal yük altında yerel burkulma sorununa maruz kalırlar. Ani yükleme ve deprem yüklemeleri altında narin çelik yapı elemanları buruşma (local buckling) ve burkulma davranışı gösterirler. Burkulma sonucu istikrarsız hale geçen bu elemanlar yapı güvenliği bakımından problem haline gelebilirler. Eleman

rijitliği, malzemenin elastisite modülü, eleman narinliği, mevcut doğal kusurlar burkulmayı etkileyen ana nedenlerdir (Aydın 2012). Kabuk yapıların burkulma kapasitesi, kabuk kalınlığının yeterli olmasına ve diğer geometrik özelliklere bağlıdır. Geometri, uygulanan yüke göre uygun değilse daha kalın kabuklar kullanılması gerekmektedir (Akarsu 2021). Kabuk yapıların yeterli cidar kalınlığına sahip olmamasından dolayı duvar yüzeylerinde deformasyon ve bozuklukların meydana gelmesi kuvvetle muhtemeldir (Maali et al. 2019). Başlangıçtaki geometrik kusurlar ve uygulanan yükün türü, silindirik ince cidarlı kabuk yapıların burkulmasını ve burkulma sonrası davranışını önemli oranda etkilemektedir. Burkulma kapasitesi başlangıçtaki küçük bir kusurdan dolayı farklılık gösterebileceğinden, ince cidarlı kabuk yapılarda kusur araştırmasının yapılması büyük bir öneme haizdir (Arbocz and Starnes Jr 2002). Kabuklar dış yüzeylerine etki eden yüklere uygun biçimde tasarlanırlar. Kabuklarda dış kuvvetler tarafından oluşturulan çeper kuvvetleri basınç ise kabukta burkulma tehlikesi mevcuttur. Dış basınca maruz silindirik kabukların kritik yük kapasitesi kabuk uzunluğunun kabuk yarıçapına oranı (l/r) ve kabuk yarı çapının kabuk kalınlığına oranı (r/t) gibi iki kritik narinliğe bağlıdır (Aghajari et al. 2006). Silindirik bir kabukta burkulma çeşitli faktörlere bağlıdır bunlar; geometrik özellikler (yarıçap, yükseklik, kalınlık), malzeme özellikleri ve silindire uygulanan yük çeşididir (Aydın vd 2019). Güçlendirmeye ihtiyaç duyan çelik yapılarda, standart yönetmelikler esas alınarak mevcut yapıya kaynak, civatalama veya diğer bağlantı yöntemleriyle güçlendirme yapılabilir. Bunlara ek olarak mukavemeti yüksek kompozitler yardımıyla da güçlendirme yapılabilir. Çeliğin güçlendirme malzemesi olarak kullanılması; korozyon, ölü yükün artışı, karmaşık profillerin takılmasındaki zorluk, delme veya kaynakla üretilen gerilme yığılmaları ve güçlendirme maliyeti gibi endişeleri beraberinde getirmektedir (Kabir et al. 2012; Ardalani et al. 2017; Khakimova et al. 2017; Taraghi et al. 2019; Aydın vd 2019; Wagner et al. 2020; Yang et al. 2020). Çeşitli yapısal elemanların güçlendirilmesinde karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin uygulanması, yapıların güçlendirilmesi için en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilir. CFRP'nin muadili olan FRP ve çeliğe kıyasla CFRP'nin üstün özelliği sertliği ve çekme dayanımı, daha hafif olması ve şekillendirme kolaylığıdır (Ardalani et al. 2017; Wang et al. 2018; Abu-Sena et al. 2019; Azzawi et al. 2020; Aydın vd 2021a). Silindirik kabukların CFRP ile güçlendirmesi, kabukların burkulma kapasitesini arttırmada ve burkulma sonrası meydana gelen dalgalarının sayısını azaltmada etkilidir (Maali et al. 2018; Maali et al. 2021). Burkulmanın kabuk yapılar için kritik bir göçme kriteri olduğu

göz önüne alınarak yapılan bu çalışmada; güçlendirilme veya kaplama yapılmamış, CFRP ile güçlendirilmiş ve Delta-Thene membranı ile kaplanmış ince cidarlı silindirik tankların burkulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. 400x400x0,45 mm, 800x400x0,45 mm, 1.200x400x0,45 mm, 1.600x400x0,45 mm boyutlarında toplam 12 adet numune ile kullanılmıştır. Üç grup olarak planlanması yapılan deneylerde; birinci grupta güçlendirilmemiş veya yüzeylerine herhangi bir kaplama yapılmayan numuneler, ikinci grupta CFRP ile güçlendirilen numuneler yer alırken, üçüncü grupta bulundukları ortam şartları nedeniyle meydana gelen korozyon, yoğunlaşma vb. nedenlerden dolayı Delta-Thene membranı ile kaplanarak yalıtılan numuneler yer almaktadır. Deney düzeneğine yerleştirilen numunelerin alt plakalarla birleştiği yerler ve numunelerin kapak kısmında yer alan vakum pompası hortumu girişi ile yük hücresi (loadcell) girişinin kenarlarına hava giriş çıkışını engellemek için silikon çekilerek silikonların kuruması için yeterli süre beklenilmiştir. Daha sonra vakum pompası yavaşça açılarak burkulmaların tamamlanması ve hava sızıntısı oluncaya kadar deneye devam edilmiştir. İnce cidarlı çelik tankların burkulma davranışlarının incelenmesine yönelik yapılan bu çalışmada yalıtım amacıyla kullanılan Delta-Thene membranının ve CFRP'nin ince cidarlı çelik tanklarda burkulma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Deney sonucu numunelerin burkulma kapasiteleri, teorik olarak hesaplanan burkulma kapasiteleri ile mukayese edilmiştir. Burkulma hasarı sonucu oluşan dalga sayıları ile teorik olarak hesaplanan dalga sayıları karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Teng et al. (2007) FRP kumaş sarılarak güçlendirilen dairesel kesitli çelik boruların eksenel basınç altındaki davranışlarını deneysel ve sonlu elemanlar modeli ile test etmişlerdir. Borular bir, iki ve üç kat FRP kumaş ile güçlendirilip burkulma deneyi yapılmıştır. FRP uygulaması boruların yük taşıma ve burkulma kapasitelerinde artış meydana getirmiştir (Teng et al. 2007).

Ghazijahani et al. (2015a) çalışmalarında CFRP kumaşlar ile güçlendirilen içi masif ahşap dolgu dairesel çelik kolonların eksenel basınç altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Deney sonucunda CFRP uygulamasının masif ahşap dolgu uygulamasına nazaran dayanım ve burkulma kapasitesi üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğu bildirilmiştir (Ghazijahani et al. 2015a).

M. Batikha et al. (2009) yaptıkları bu sayısal çalışmada, silindirik kabukların fil ayağı burkulmasına karşı güçlendirmesi için kabuğun kritik konumuna az miktarda FRP kullanarak güçlendirilen silindirik kabuğu doğrusal elastik eğilme teorisi kullanarak analizini yapmışlardır. Fil ayağı burkulmasına karşı güçlendirme etkisinin, kullanılan FRP levhanın; kalınlığına, yüksekliğine ve konumuna bağlı olduğunu tespit etmişlerdir (M. Batikha et al. 2009).

Vakili and Showkati (2015) eksenel yüklere ve iç basınca maruz kalan silindirik kabukların burkulma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Eksenel yük etkisiyle tanklarda fil ayağı burkulması olarak bilinen silindirik kabukların tabanına yakın elastik olmayan burkulma deformasyonu oluşmuştur. FRP kullanılarak çelik silindirik kabukların güçlendirilmesi için yeni bir yöntem sunulmuştur. Önerilen yöntem, doğrusal olmayan bir algoritma kullanılarak çalışılmış ve sonuçlar silindirik kabukların burkulmaya karşı direnci açısından değerlendirilmiştir. Silindirik kabuğun FRP ile güçlendirilmesi kabuğun burkulma direncini artırmıştır (Vakili and Showkati 2015).

Taraghi et al. (2021) CFRP ile güçlendirilen ince cidarlı silindirlerin burkulma kapasitesini yaptıkları sayısal çalışmada incelemişlerdir. CFRP kumaş silindirlere yatay ve dikey olarak silindirin üst, alt ve orta bölgesine kısmi olarak uygulanmıştır. CFRP

şeritlerin yatay ve düşey olarak uygulanması silindirin burkulma kapasitesinde artış meydana getirmiştir. Silindirlerin burkulma kapasitesindeki artışta, narinlik oranı ve CFRP'nin dokuma açısı, kalınlığı en etkili parametreler olarak bulunmuştur. CFRP'nin silindir çevresine yatay olarak uygulanmasının düşey olarak uygulanmasından daha etkili olduğu görülmüştür (Taraghi et al. 2021).

Fatemi et al. (2013) çalışmalarında farklı H/R ve R/t oranları (H:silindirik kabuğun yüksekliği, R:silindirik kabuk yarıçapı ve t: kabuk kalınlığı) ile 4t ve 8t derinliğindeki kusurlara sahip dört grup numuneyi test ederek geometrik kusurlara sahip ince cidarlı silindirik kabukların burkulma davranışını incelemişlerdir. İnce cidarlı kabukların kusur derinliği arttıkça üniform yükleme altında başlangıç ve genel burkulma kapasitelerinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Kabukların kusur derinliğindeki artışın ilk burkulma kapasitelerini azalttığı, kusurun en az etkisinin en düşük H/R ve en yüksek R/t'ye sahip ince cidarlı kabuk numuneleri üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Fatemi et al. 2013).

Aydın vd (2019) çalışmalarında cidar kalınlıkları 1 mm ve 2 mm olan 10 adet tankın tek tip dış basınç altında burkulma davranışını incelemişlerdir. Tanklarda göçük derinlikleri ve göçük şekilleri değiştirilip göçük bölgesinin CFRP ile kaplanması durumunda burkulma kapasitesindeki değişimi belirlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda silindirik kabuğun burkulmaya karşı güçlendirmesinde CFRP kullanımının, ilk burkulma kapasitesindeki artışta önemli bir etkiye sahip olduğu, tüm yüzeyine CFRP uygulanan ince cidarlı silindirik kabuklarda CFRP'nin dalga sayısı azalmasında etkili olduğu belirtilmiştir (Aydın vd 2019).

Korucuk vd (2019) çalışmalarında, hidrostatik basınca maruz kalan farklı göçük derinliği ve boylarına sahip iki grup (CFRP'li ve CFRP'siz olmak üzere) 14 adet ince cidarlı silindirik kabuk numune üzerindeki göçüklerde CFRP kullanılarak kaybedilen burkulma kapasitelerinin geri kazanılmasını araştırmışlardır. CFRP kullanımı ilk burkulma yükü kapasitesini arttırmıştır. CFRP kullanılan modellerde, burkulma sonucu oluşan dalga sayısı ve dalga genişliği azalmıştır (Korucuk vd 2019).

Ghazijahani et al. (2015b) düzgün dış basınç altında aynı cidar kalınlığına sahip beş adet oluklu ince cidarlı silindirik kabuk deney numunesini test ederek oluklu ince cidarlı silindirik kabukların burkulma davranışını araştırmışlardır. Çevresel oluklar ince cidarlı silindirik kabukların burkulma yükü kapasitesini artırmıştır. Deney numunelerinden elde edilen ilk burkulma değerleri ile teorik formüllerden elde edilen burkulma değerleri yakın çıkmıştır (Ghazijahani et al. 2015b).

Çinar (2020) çalışmasında üç grup ince cidarlı tank modeli; İlk grup karbon lifli polimer (CFRP) uygulaması yapılmayan numuneler, ikinci grup tüm yüzey karbon lifli polimer uygulaması yapılmış numuneleri ve üçüncü grupta değişken karbon lifli polimer uygulaması yapılan toplam 12 adet ince cidarlı silindirik tank modelini sülfürik asit korozyonuna maruz bırakarak burkulma davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. CFRP uygulaması yapılan modellerin burkulma yükü kapasitesinde artış olmuştur. Korozyon sonrası dayanım kayıpları CFRP uygulamasıyla büyük oranda geri kazandırılmıştır. Deney sonucu elde edilen burkulma yükleri, teorik formüllerle elde edilen burkulma yükünden farklı çıkmıştır (Çinar 2020).

Maali et al. (2019) çalışmalarında ince cidarlı çelik silindirik kabukların burkulma davranışına dent ve CFRP etkisini irdilemişlerdir. Numuneleri CFRP'li ve CFRP'siz olarak iki gruba ayırarak, düşey, yatay ve 45°'lik açı ile dentler yerleştirilerek dış basınç altında burkulma davranışlarını incelemişlerdir. Silindirlerin burkulma kapasitesinin CFRP ile güçlendirilerek arttığı fakat silindirlerin tüm yüzeyinin CFRP ile kaplanmasının ekonomik açıdan uygun olmayacağı belirtilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar teorik formüllerle mukayese edilerek formüllerle elde değerlerin belirli katsayılarla çarpılması gerektiği ifade edilmiştir (Maali et al. 2019).

Akarsu (2021) çalışmasında göçük sayıları ve cidar kalınlıkları değişen CFRP'li ve CFRP'siz 14 adet ince cidarlı silindirik kabuğun sayısal modellerinin burkulma kapasitelerini, göçüklerin burkulma kapasitelerine olan etkisini ve CFRP ile güçlendirmenin burkulma kapasitesine olan etkisini araştırmıştır. CFRP ince cidarlı silindirik kabukların burkulma yükü kapasitesini ve cidarların sünekliğini artırmıştır. Sayısal modellemedeki sonuçların teorik ve deneysel çalışmaların sonuçlarına çok yakın çıkması cidarların tasarım aşamalarında sonlu eleman yazılımlarının kullanımının

önemini vurgulamaktadır. Kompozit malzemelere sonlu eleman modellerinde yer verilmesinin üretim teknolojilerinde büyük bir kolaylık sağlayacağını bildirmiştir (Akarsu 2021).

Niloufari et al. (2014) kusur derinlikleri değişen silindirik ve konik kabukların panellerinin kavisli kenarları arasındaki bağlantılarda çevresel kusurları içerecek şekilde değiştirilmiş üç grupta toplam 12 adet numuneyi hidrostatik basınç altında test ederek burkulma ve burkulma sonrası davranışını incelemiştir. Farklı t/R oranlarındaki geometrik kusurların burkulma dayanımı üzerinde azaltıcı, nötr veya artan etkilere sahip olabileceğini ve kabukların yumuşamasına veya sertleşmesine sebep olabileceğini belirtmişlerdir. Sabit konik çatılı çelik depolama tanklarının silindirik ve konik gövdelerinin kavisli panel kenarları arasındaki birleşen alanlar üzerinde sürekli kaynak yapılmasından kaynaklanan çevresel kusurların etkileri bu bağlamda en önemli durum olduğu belirtilmiştir (Niloufari et al. 2014).

Maali et al. (2018) çalışmalarında dış basınç yükü altında bulunan konik ince cidarlı kabukların burkulma kapasitesine başlangıç kusurlarının etkisini sonlu elemanlar modelleri kullanılarak irdelemiştir. Modeller altı farklı büyüklükte genliğe sahip bir veya iki hatlı kusur içerecek şekilde değiştirilmiştir. Burkulma yükü kapasitesinin, ince cidarlı konik kabuğun başlangıç kusuruna ve yüksekliğine bağlı olduğu bildirilmiştir (Maali et al. 2018).

Aydın vd (2021b) çalışmalarında değişken oranda hidroklorik asit çözeltileriyle doldurulan ince cidarlı çelik tankların asit etkisi altında burkulma kapasitelerine CFRP kaplamasının etkisini araştırmıştır. Korozyonsuz tanklarda tankın tamamının CFRP ile kaplanmasıyla ilk burkulma kapasitesinin üç kata kadar artabildiği görülmüştür. Korozyonun tankların burkulma kapasitelerini azalttığı ve oluşan çevresel dalga sayısını artırdığı tespit edilmiştir (Aydın vd 2021b).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

İnce cidarlı çelik tankların burkulma davranışlarının incelendiği bu deneysel çalışmada kullanılan malzemeler, modellerin hazırlanışı, deney elemanları, deney düzeneği ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

3.1. Materyal

3.1.1. CFRP kumaş

Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), karbon fiber ve polimerden oluşan bir kompozit malzeme türüdür. Karbon fiber mukavemet ve sertlik sağlarken, polimer lifleri korumak ve bir arada tutturmak için yapışkan matris görevi görür. Hafifliği, yüksek mekanik mukavemeti ve yüksek elastikiyeti CFRP'nin en önemli avantajlarındandır. Şekil 3.1'de deneyde kullanılan CFRP kumaş görülmekte olup CFRP ve epoksi reçinenin malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan CFRP kumaş

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan CFRP kumaş ve epoksi reçinenin özellikleri

Malzeme	Karbon Fiber (CFRP)	Epoksi reçine
Elastisite Modülü (GPa)	230	> 2
Çekme dayanımı (MPa)	4.900	-
Basınç dayanımı (MPa)	-	> 30
Kesme dayanımı (MPa)	-	> 6
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0,11	-
Kumaş ağırlığı (g/m ²)	230	-
Kopmada Uzama (%)	2,10	-
Yoğunluk (kg/l)	-	1,02
Vizkozite (mPa.s)	-	1.500-2.500

3.1.2. Delta-Thene membran

Delta-Thene membran, kendinden yapışma ve kaplandığı zeminle bütünleşme özelliklerinin yanı sıra soğuk uygulanan, bütün yüzeye yapışma özelliğine sahip izolasyon membranıdır. Özel karelaj baskısı sayesinde kolayca ve net bir şekilde kesilebilir. Yapışma süresine ihtiyacı yoktur. Esnekliği sayesinde işleme sırasında geniş yüzeylerde bile engebe oluşturmaz. Şekil 3.2’de deneyde kullanılan Delta-Thene membranı görülmekte olup membranın teknik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Delta-Thene uygulamada depolama amacıyla kullanılan tanklarda yalıtım yapılması durumunda tercih edilen malzemelerden biridir.



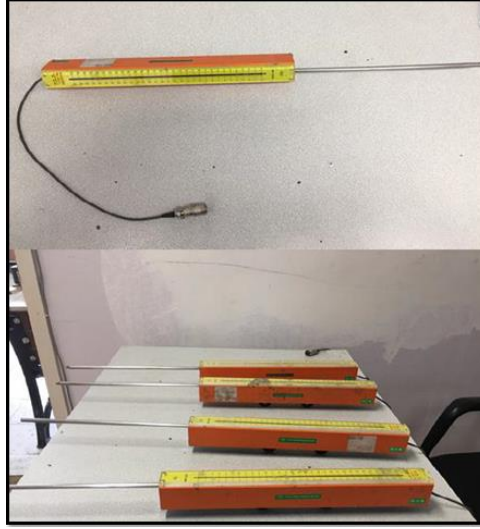
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan Delta-Tehene membranı

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan Delta-Thene Membran teknik özellikleri

Kalınlık	Ağırlık	Çekme dayanımı	Uzama	Statik yük direnci	Yırtılma direnci
Yaklaşık. 1,5 mm	Yaklaşık. 1,6 kg/m ²	MD/CMD $\geq$ 200 N/50 mm	MD/CMD $\geq$ 150 %	Method B: 5 kg	$\geq$ 100 N

3.1.3. Deformasyon ölçme aleti (LVDT)

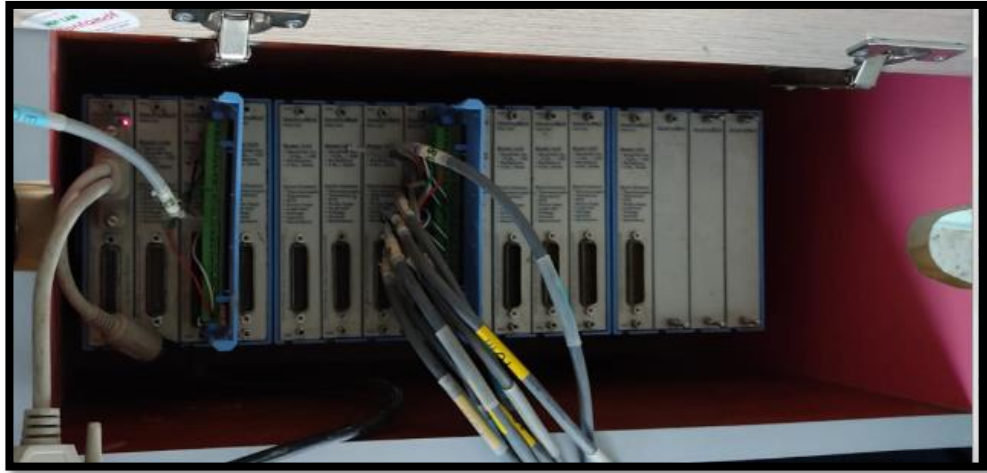
Tanklarda burkulma deneyleri süresince meydana gelecek deformasyonların ölçümü için 0,001 mm hassasiyetle 300 mm'ye kadar ölçüm yapabilen dört adet SDP-300D markalı LVDT (Linear Variable Differential Transformer) cihazlar kullanılmıştır. Şekil 3.3'te deneyde kullanılan LVDT'ler yer almaktadır. LVDT'ler veri toplama sistemine bağlanıp elde edilen ölçüm değerleri veri toplama cihazı vasıtasıyla DasyLab programına aktarılmıştır.



Şekil 3.3. Deformasyon ölçme aletleri (LVDT)

3.1.4. Veri toplama cihazı (Data Logger)

Deney süresince tank içindeki basınç değişim verilerinin ve tank çevresinde burkulma dalgaları sebebiyle oluşacak deformasyon verilerinin bilgisayara aktarılması için Şekil 3.4’te görülen 118 kanallı 13 portlu Insturinet I 420 model veri toplama cihazı (data logger) kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Veri toplama cihazı (Data Logger)

3.2. Yöntem

Çalışmanın bu bölümünde deneyde kullanılan ince cidarlı silindirik çelik tank numunelerinin hazırlanması, burkulma deney düzeneği ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

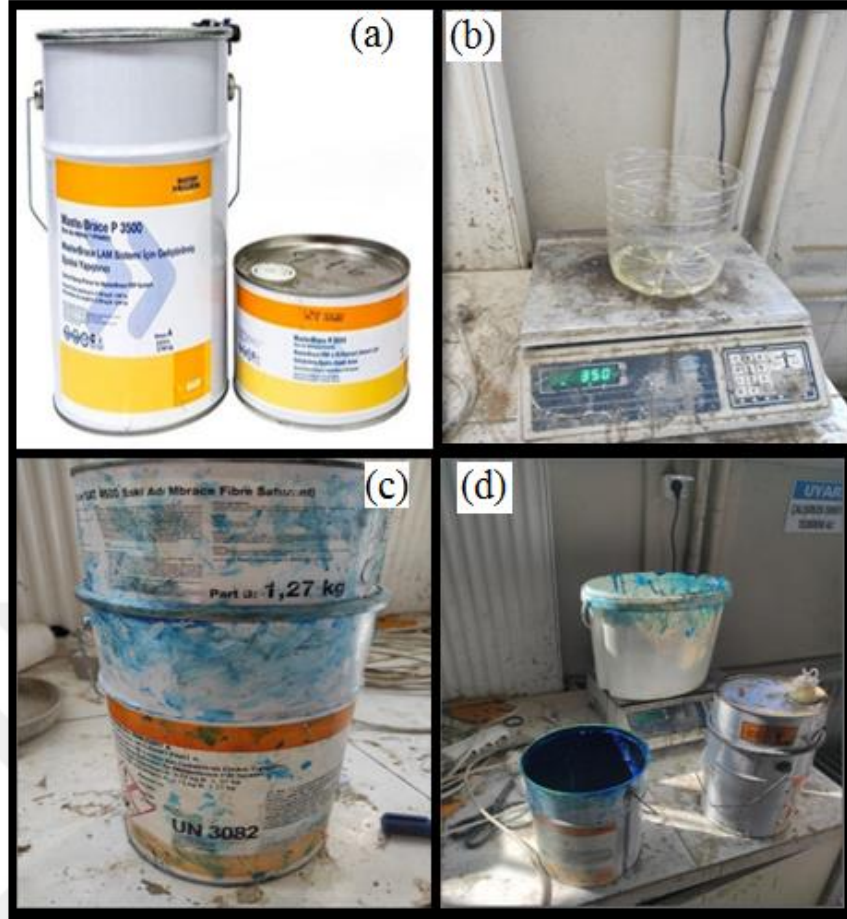
3.2.1. Silindirik tank modellerinin hazırlanışı

Çalışmada kullanılacak ince cidarlı silindirik tank modelleri için boyut seçimi oldukça önemlidir. Numune boyutlarının çok büyük olması çalışma ortamında zorluklara sebep olurken, çok küçük olması durumunda üretim esnasında problemler oluşabilmektedir. Bu nedenle silindirik tank modellerinin uygun boyutlarda seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca silindirik tankların gerçekçi bir davranış göstermesi için seçilen yarıçap/kalınlık oranlarının (R/t) uygulamada kullanılan yapılara uygun seçilmesi gerekmektedir. R/t oranı 300 ile 1.000 aralığındadır (Golzan and Showkati 2008). Bu çalışmada kullanılan tanklarda ise R/t oranı 444,44 olup uygulamadaki tanklar için geçerli olan aralıkta yer almaktadır. Deneylerde çapları 400 mm ve kalınlıkları 0,45 mm olan yükseklikleri ise 400-800-1.200 ve 1.600 mm olarak seçilen silindirik tank modelleri kullanılmıştır. Tankların üst kısımları aynı kalınlıkta sac kapak ile kapatılmıştır. Üst kapak kısmına yük hücresi ve vakum pompası hortum girişi için uygun çapta iki delik açılmıştır. Deney numunelerinin birleşim yerleri kullanılan galvaniz sacın ince olması sebebiyle lehimleme ile birleştirilmiştir. Bu sayede kaynak yapılması durumunda oluşacak malzeme kaybının önüne geçilmiştir. Lehimle birleştirme yapılarak birleşim noktalarında oluşabilecek başlangıç kusurlarının da önüne geçilmiştir. Çalışmada kullanılan 12 adet silindirik tank güçlendirme ve kaplama yöntemlerine göre üç gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki silindirik tankların yüzeylerine herhangi bir güçlendirme veya kaplama uygulaması yapılmamıştır. Şekil 3.5'te birinci gruptaki silindirik tank modellerinin fotoğrafları verilmiştir.



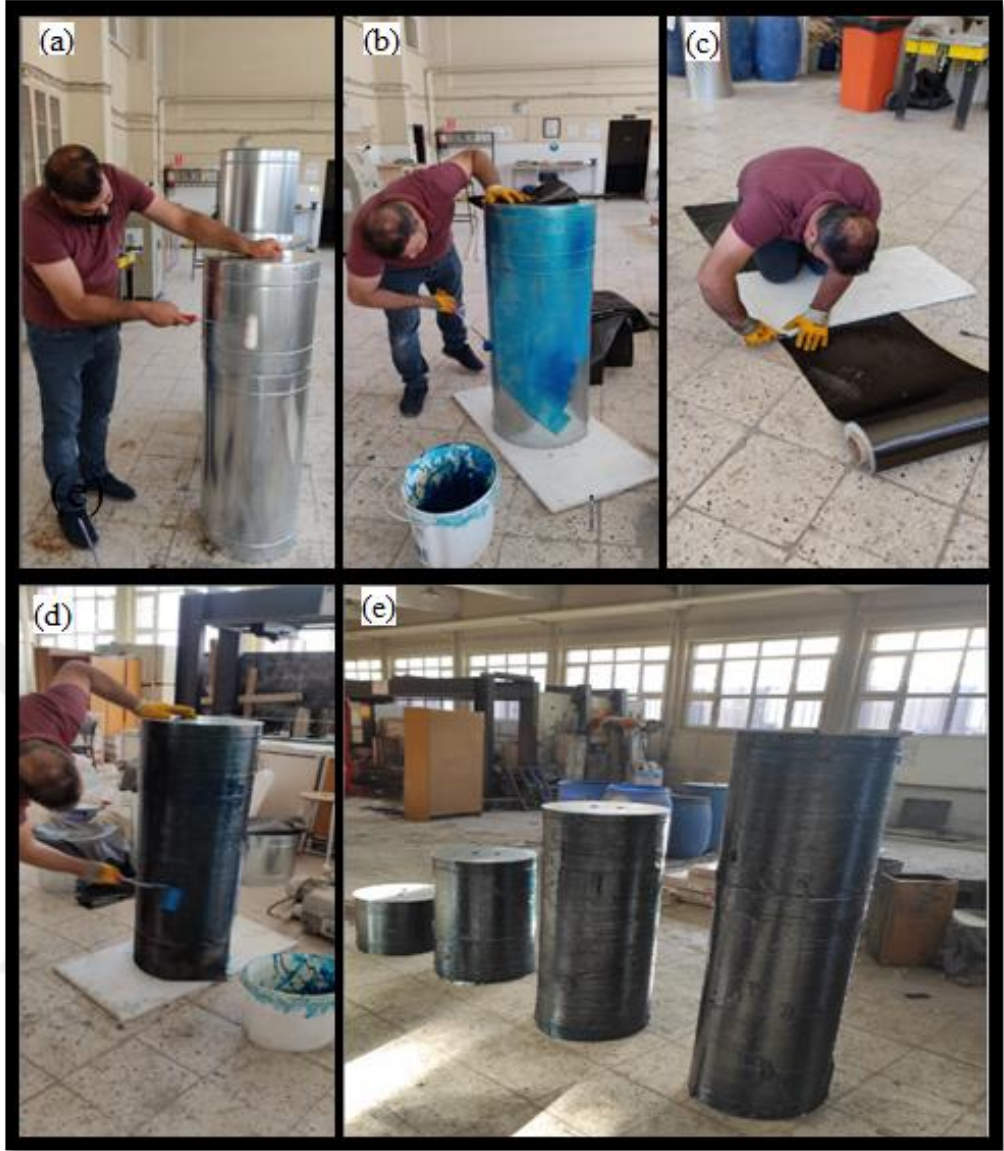
Şekil 3.5. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan silindirik tank modelleri

İkinci grup silindirik tank modellerinin dış yüzeyine silindir yüksekliği boyunca CFRP uygulaması yapılmıştır. CFRP'nin silindir yüksekliği boyunca uygulanmasının sebebi literatürde bu uygulamanın daha faydalı olduğunun belirtilmiş olmasıdır (Aydın vd 2019). CFRP kumaşın silindir yüzeyine yapıştırılması için öncelikle iki bileşenli olan MasterBrace P 3500 FRP için geliştirilmiş epoksi esaslı astar üretici firmanın önerdiği oranlarda (1/2,22) karıştırılarak hazırlanan astar parmak ruloyla silindirik tank modellerinin yüzeylerine sürülerek kuruması için yeterli süre beklenilmiştir. Epoksi astar kuruduktan sonra silindirik tank modellerin yüzeylerine iki bileşenli MasterBrace 4500 FIB (Lifli Polimer) sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcı üretici firmanın önerdiği oranlarda (1/2,94) karıştırılarak parmak ruloyla sürülerek CFRP kumaş silindirik tank modellerinin yüzeylerine uygun boyutlarda kesilerek yapıştırılmıştır. CFRP kumaş, silindirik tank yüksekliği 400 mm fazla olan numunelerde 100 mm bindirme yapılarak uygulanmıştır. Şekil 3.6'da epoksi astar ve epoksi yapıştırıcı karışımları fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 3.6. CFRP epoksi astarı ve yapıştırıcısı a) Epoksi astar birleşenleri b) Epoksi astar birleşenlerinin uygun oranlarda karıştırılması (c) Epoksi yapıştırıcı birleşenleri (d) Epoksi yapıştırıcı birleşenlerinin uygun oranda karıştırılması.

CFRP kumaşlar numune boyutlarına uygun kesilip yapıştırıldıktan sonra CFRP kumaş üzerine epoksi yapıştırıcı sürülerek yapıştırıcının kuruması için yeterli süre beklenilmiştir. CFRP ile güçlendirme uygulaması yapılan tüm numuneler burkulma deneylerine hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.7’de CFRP uygulamasına ait fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 3.7. CFRP uygulama aşamaları (a) Epoksi astar sürülmesi (b) Epoksi yapıştırıcı sürülmesi (c) Uygun ölçülerde CFRP kumaş kesilmesi (d) CFRP kumaş yapıştırılarak üzerine epoksi yapıştırıcı sürülmesi (e) CFRP ile güçlendirilen silindirik tank modelleri.

Üçüncü gruptaki silindirik tank numunelerinin dış yüzeyi silindirik tank yüksekliği boyunca numune ölçülerine uygun şekilde kesilen Delta-Thene membranı ile kaplanmıştır. Delta-Thene membranı silindirik tank yüksekliği 400 mm fazla olan numunelerde 100 mm bindirme yapılarak uygulanmıştır. Soğuk uygulamayla kendinden yapışkanlı membran tüm numune yüzeylerine yapıştırılmıştır. Şekil 3.8’de Delta-Thene ile kaplanan silindirik tank modellerine ait fotoğraf verilmektedir.



Şekil 3.8. Delta-Thene ile kaplanan silindirik tank modelleri

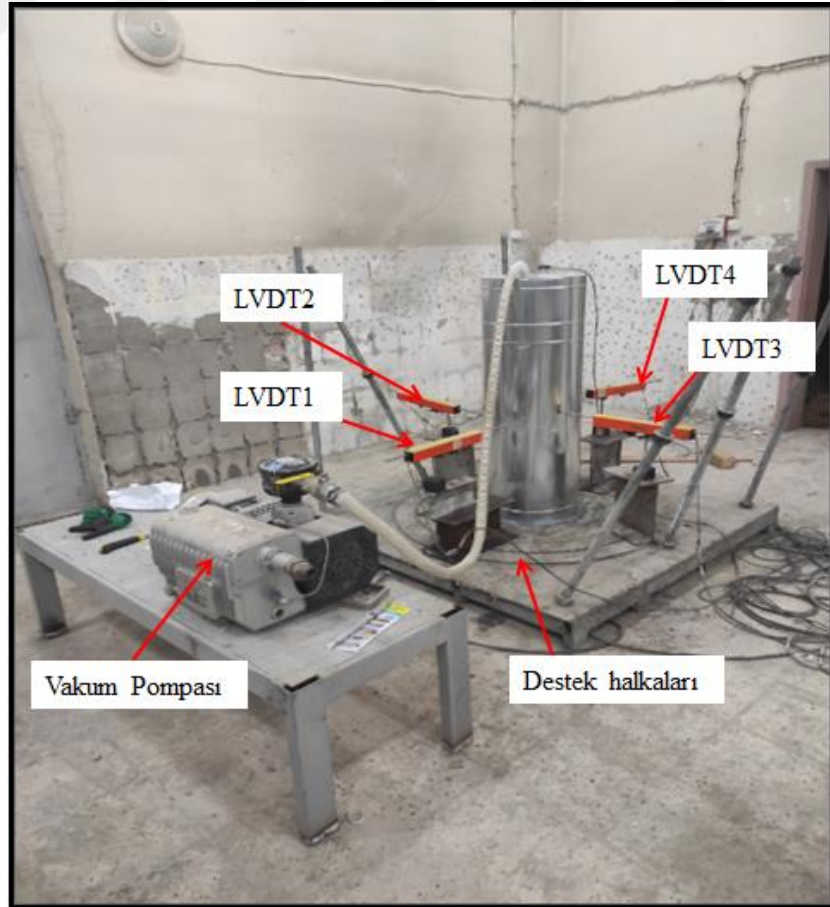
3.2.2. Burkulma deneyleri

Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği 1.500x1.500 mm ölçülerinde ve 30 mm kalınlığında destek halkalı çelik levhadan oluşmaktadır. Levha üzerinde silindirlerin tam yerleştirilebilmesi için dairesel destek halkaları bulunmaktadır. Deney düzeneğine yerleştirilen silindirik tank numunelerinin sabit mesnet sınır koşullarına sahip olması istendiğinden, yerleştirilen numunelerin etrafına ilaveten dairesel tutucular yerleştirilmiştir. Numunelerin plakaya oturan alt kenar birleşim kısımları hava sızıntısını önlemek amacıyla dıştan silikonlanmıştır. Silindirlere üniform basınç yükü uygulayabilmek amacıyla 600 kPa hidrostatik basınç kapasiteli vakum pompası kullanılmıştır. Deplasman ölçümü için 0-90-180-270° açılar ile 4 adet LVDT numune yüksekliklerinin tam orta noktasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Deneyde kullanılan LVDT'lerin konum bilgileri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan LVDT’lerin konum bilgileri

Numuneler	LVDT Yükseklikleri			
	LVDT 1 ($\theta = 0^\circ$)	LVDT 2 ($\theta = 90^\circ$)	LVDT 3 ($\theta = 180^\circ$)	LVDT 4 ($\theta = 270^\circ$)
B-H400, C-H400, D-H400	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
B-H800, C-H800, D-H800	400 mm	400 mm	400 mm	400 mm
B-H1.200, C-H1.200, D-H1.200	600 mm	600 mm	600 mm	600 mm
B-H1.600, C-H1.600, D-H1.600	800 mm	800 mm	800 mm	800 mm

LVDT’ler, vakum pompası ve yük hücresi dirençler yardımıyla veri toplama cihazına bağlandı. Deney öncesi bilgisayarda DasyLab programı çalıştırılarak deney öncesi gerekli kontroller yapıldı. Deney düzeneğine yerleştirilmiş örnek bir numuneye ait fotoğraf Şekil 3.9’da verilmektedir.



Şekil 3.9. Deney düzeneğine yerleştirilmiş örnek bir numune

Numuneler deney düzeneğine yerleştirildikten sonra vakum pompasının vanası hafiften açılarak silindir içindeki hava boşaltılmıştır. Deneyler burkulmalar tamamlanıncaya ve hava sızıntısı oluncaya kadar devam ettirilmiştir. Veri toplama cihazı vasıtasıyla elde edilen deplasman ve yük değerleri DasyLab programına aktararak veriler Excel programında düzenlenmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler için isimlendirme yapılırken silindir yüksekliği ve güçlendirme veya kaplama durumunu belirtecek etiketler seçilmiştir. Kısaltmalarda; numunelerin güçlendirme veya kaplama durumu B, C ve D harfleriyle (B: güçlendirme veya kaplama yapılmayan, C: CFRP ile güçlendirilmiş ve D: Delta-Thene ile kaplanmış) ve tank yükseklikleri ise 400, 800, 1.200, 1.600 sayılarıyla gösterilmiştir. Örneğin B-H400 numunesinde, B güçlendirme veya kaplama yapılmadığını, H400 ise tank yüksekliğinin 400 mm olduğunu belirtmektedir.

3.2.3. Teorik burkulma değerleri ve çevresel burkulma dalga sayısı

Çalışmada burkulma deneyleri sonucu elde edilecek burkulma değerlerinin kıyaslanması için tankların burkulma kapasitesini belirlemeye yönelik literatürde yer alan formüllerden yararlanılmıştır. Jawad (1994), Ventsel ve Krauthammer (2001), Ross'un (2007) teorileri ile dış basınç altındaki silindirik kabuklarda (P_{cr}) kritik burkulma yükünü elde etmişlerdir.

Jawad Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = \frac{0,92E \left(\frac{te}{R} \right)^{2,5}}{\frac{Le}{R}} \quad (3.1)$$

Ventsel ve Krauthammer' Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = 0,92 \frac{Et}{L} \left(\frac{t}{r_m} \right)^{1,5} \quad (3.2)$$

Ross' Teorisine göre kritik burkulma yükü:

$$P_{cr} = \frac{2,6E\left(\frac{t}{d}\right)^{2,5}}{\frac{H}{d} - 0,45\left(\frac{t}{d}\right)^{0,5}} \quad (3.3)$$

Bu formüllerde;

P_{cr} : Silindirik tanklara ait kritik burkulma yükünü

E: Elastisite modülü (210 GPa)

$r = r_m = R$: Silindir kabuğunun yarıçapı (200 mm)

t ve t_e : etkin kalınlığı (0,45 mm)

d: Silindirik kabuğun çapı (400 mm)

H= L_e : Silindir yüksekliğini (400-800-1200-1600 mm) belirtmektedir.

Silindirik tanklarda burkulma sonrası meydana gelebilecek çevresel dalga sayısının yaklaşık değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Teng et al. 2001; Fatemi et al. 2013)

$$n = 2,74 \sqrt{\frac{R}{L} \sqrt{\frac{R}{t}}} \quad (3.4)$$

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

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Deneylerde 12 adet ince cidarlı silindirik çelik tank numunesi üç grupta incelenmiştir. Birinci gruptaki modellerde herhangi bir güçlendirme ya da kaplama yapılmazken, ikinci gruptaki modeller CFRP ile güçlendirilmiş ve üçüncü gruptaki modeller Delta-thene membranı ile kaplanmıştır. İlk aşamada güçlendirme veya kaplama yapılmasının tankların ağırlığını ne kadar artırdığı belirlenmiştir. Silindirik tank modellerinin tümü güçlendirilme ve kaplama öncesi ve sonrası tartılarak ağırlıkları tespit edilmiştir. Tankların güçlendirme ve kaplama öncesi ve sonrası ağırlıklarına ait bilgiler Çizelge 4.1’de verilmektedir. Tablodaki veriler incelendiğinde ağırlığı en yüksek olan numunelerin Delta-Thene ile kaplanan numuneler olduğu görülmektedir. Delta-Thene grubundaki numuneler incelendiğinde, bu gruptaki numunelerin ağırlıkları güçlendirme veya kaplama yapılmayan grupta bulunan aynı boyuttaki numunelere göre %31,50 ile %45,07 arasında değişen oranda artmıştır. CFRP’li numunelerin ağırlıkları ise güçlendirme veya kaplama yapılmayan gruptaki aynı boyutlu numunelere göre %10,15 ile %15,21 oranında artmıştır. Ayrıca Delta-Thene ile kaplı silindirlerin ağırlıkları CFRP ile kaplı silindirlerin ağırlıklarına göre %18,80 ile %31,71 oranında artmıştır. Delta-Thene kaplaması tankların ölü yükünü önemli derecede arttırmıştır.

Çizelge 4.1. Silindirik tank modellerinin güçlendirme öncesi ve sonrası ağırlıkları

GRUP	Numuneler	H (mm)	R (mm)	t (mm)	R/t	H/R	Güçlendirme Öncesi Ağırlık (gram)	Güçlendirme Sonrası Ağırlık (gram)	Ağırlık Artışı (%)
1.Grup Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan	B-H400	400	200	0,45	444,44	2	2.540	-	-
	B-H800	800	200	0,45	444,44	4	4.340	-	-
	B-H1.200	1.200	200	0,45	444,44	6	6.700	-	-
	B-H1.600	1.600	200	0,45	444,44	8	8.540	-	-
2.Grup CFRP’li	C-H400	400	200	0,45	444,44	2	2.540	2.800	10,24
	C-H800	800	200	0,45	444,44	4	4.340	5.000	15,21
	C-H1.200	1.200	200	0,45	444,44	6	6.700	7.380	10,15
	C-H1.600	1.600	200	0,45	444,44	8	8.540	9.670	13,23
3.Grup Delta-Thene’li	D-H400	400	200	0,45	444,44	2	2.540	3.340	31,50
	D-H800	800	200	0,45	444,44	4	4.340	5.940	36,87
	D-H1.200	1.200	200	0,45	444,44	6	6.700	9.720	45,07
	D-H1.600	1.600	200	0,45	444,44	8	8.540	12.280	43,79

Tanklarda burkulma deneyleri süresince meydana gelen deformasyonlar yerleştirilen dört adet LVDT ile ölçülmüştür. Elde edilen deformasyon ve yük verilerine göre çizilen grafikler yardımıyla tanklara ait burkulma yükleri belirlenmiştir. Grafikler incelendiğinde, deplasman ve yük arasında ilk burkulmaya kadar lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir. İlk burkulmadan sonra yükün artmasıyla birlikte grafiğin eğimi genel burkulma noktasına kadar azalmıştır. Genel burkulmadan sonra ise yükün aniden azalmasıyla birlikte göçme burkulması oluşmuştur. Deney sonucu tankların burkulma değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Tüm deney numuneleri ilk burkulmadan sonra burkulma yükünde herhangi bir azalma olmadan direnç göstererek burkulma sonrası aşamaya kadar yük taşımaya devam etmiştir. Yük miktarının artışına bağlı olarak yanal yer değiştirmelerde artış meydana gelmiştir. Tankların genel burkulma kapasitelerinin ilk burkulma kapasitelerine oranı 1,00 ile 5,78 arasındadır. Bu oran tankların ilk burkulmadan sonra da önemli miktarda burkulma direnci gösterdiğini ifade etmektedir. İlk burkulmadan sonra gerçekleşen genel burkulma kapasitesindeki artışın en yüksek olduğu silindirik tank numunesi CFRP ile güçlendirilen C-H400 numunesidir. En düşük olduğu silindir tank numunesi ise Delta-Thene ile kaplanan D-H1.200 ve D-H1.600 numuneleridir.

Çizelge 4.2. Silindirik tank numunelerinin burkulma değerleri

GRUP	Numune	P1 İlk Burkulma (kPa)	P2 Genel Burkulma (kPa)	P3 Göçme Burkulması (kPa)	P2/P1	P3/P2
1.Grup Güçlendirilme veya Kaplama Yapılmayan Numuneler	B-H400	4,27	14,27	19,74	3,34	1,38
	B-H800	3,19	5,28	8,53	1,66	1,62
	B-H1.200	2,04	4,76	5,15	2,33	1,08
	B-H1.600	3,26	5,76	5,76	1,77	1,00
2.Grup CFRP ile Güçlendirilen Numuneler	C-H400	5,24	30,24	30,24	5,77	1,00
	C-H800	4,75	17,66	17,66	3,72	1,00
	C-H1.200	6,82	11,75	11,75	1,72	1,00
	C-H1.600	6,12	8,57	8,57	1,40	1,00
3.Grup Delta-Thene ile Kaplanan Numuneler	D-H400	4,77	14,93	19,31	3,13	1,29
	D-H800	4,92	8,50	8,92	1,73	1,05
	D-H1.200	6,58	6,58	13,86	1,00	2,11
	D-H1.600	5,81	5,81	14,78	1,00	2,54

4.1. Güçlendirme veya Kaplama Yapılmayan Silindirik Tank Modelleri

Çalışmanın ilk aşamasında güçlendirme veya kaplama yapılmayan tankların burkulma kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Tanklar deney düzeneğine yerleştirilip ölçüm aletleri ve deney düzeneği hazır olduktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H400 numunesi

Şekil 4.1’de B-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.2’de burkulma deneyi sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

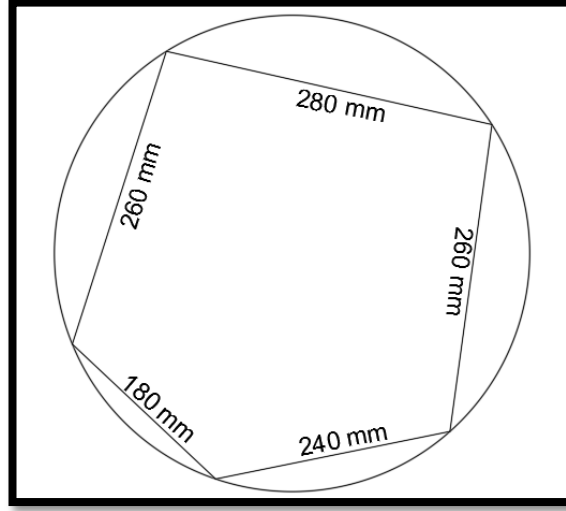


Şekil 4.1. B-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



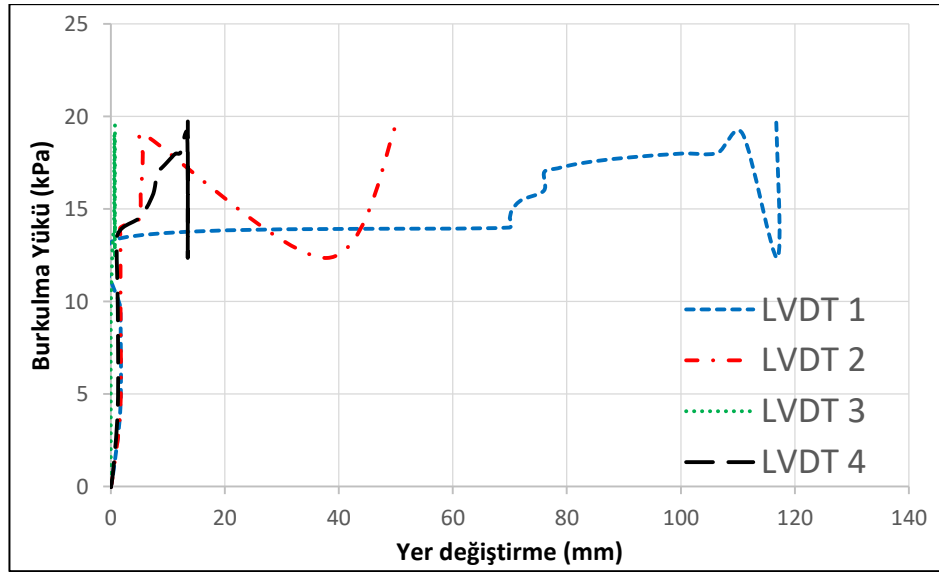
Şekil 4.2. Burkulma deneyi sonrası B-H400 numunesinin son hali

B-H400 silindirik tank numunesinde burkulma sonucu beş adet çevresel dalga oluşmuştur. Numunenin çatı kısmında tek tarafa katlanmalı şekilde deformasyon meydana gelmiştir. Deney sonrasında numune başlangıç şeklinin büyük ölçüde kaybetmiştir. B-H400 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Numunede burkulma sonucu meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.3'te verilmektedir.



Şekil 4.3. B-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları

B-H400 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 3,34 katı, göçme burkulması yükü genel burkulma yükünün 1,38 katıdır. Numunenin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %234,19 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %38,33 artmıştır. İlk burkulmadan sonraki bu artışlar numunenin direnç göstererek burkulmaya devam ettiğini göstermektedir. B-H400 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.4’de verilmektedir.



Şekil 4.4. B-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

B-H400 numunesinin burkulma yükü-yer değıştirme grafiği incelendiğinde numune çevresine deplasman ölçümü için dört farklı noktaya yerleştirilen LVDT'lerin bulundukları noktalarda farklı dalgalanmaların olması yer değıştirmelerinde farklı olmasına neden olmuştur. Deney numunesinde burkulmalar içe katlanır şekilde meydana gelmiştir. Numunenin çatı kısmında deformasyon oluşmuştur. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir.

4.1.2. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H800 numunesi

şekil 4.5'te B-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, şekil 4.6'da deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

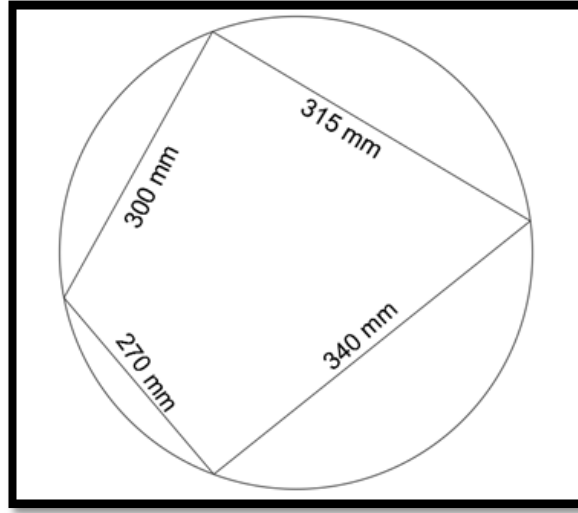


şekil 4.5 B-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



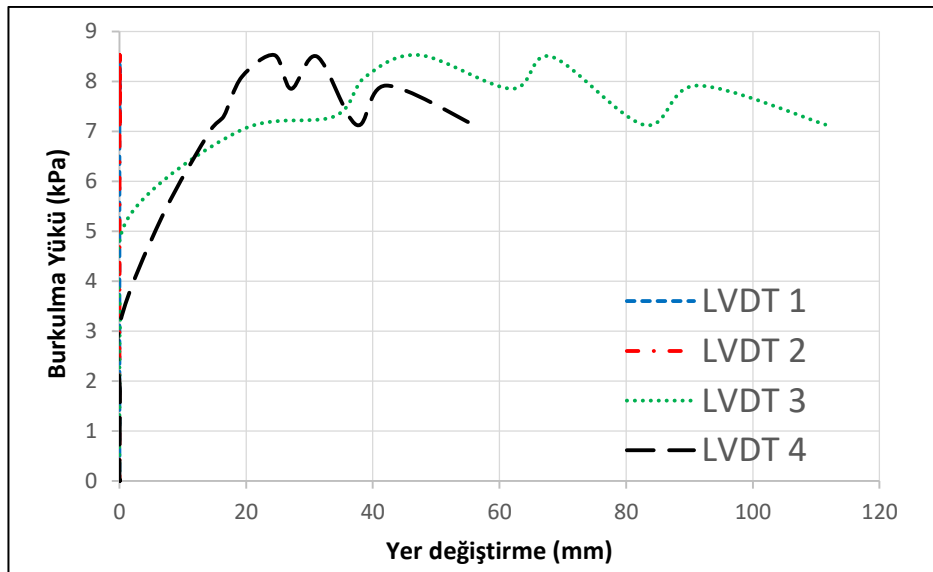
Şekil 4.6. Burkulma deneyi sonrası B-H800 numunesinin son hali

B-H800 numunesinde burkulma sonucu dört adet çevresel dalga oluşmuştur. Burkulmalar silindirik tank numunesinin orta yüksekliğine yakın kısımda içe katlanmalı olarak gerçekleşmiştir. Çatı kısmında deformasyon tek taraflı yukarı doğru şişkinlik şeklinde meydana gelmiştir. Numune burkulma sonucunda başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir. B-H800’numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.7’de verilmektedir.



Şekil 4.7. B-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları

B-H800 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,66 katı, göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 1,62 katıdır. B-H800 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %65,52 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında %61,55 artmıştır. B-H800 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasiteleri B-H400 numunesi kapasitesine nazaran sırasıyla %25,29, %63,00, %56,79 azalmıştır. B-H800 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8. B-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

B-H800 numunesinde B-H400 numunesine nazaran daha az deformasyon görülmüştür. Burkulma sonucu oluşan çevresel dalga sayısı B-H400 numunesinden azdır.

4.1.3. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan B-H1.200 numunesi

Şekil 4.9’da B-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.10’da deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

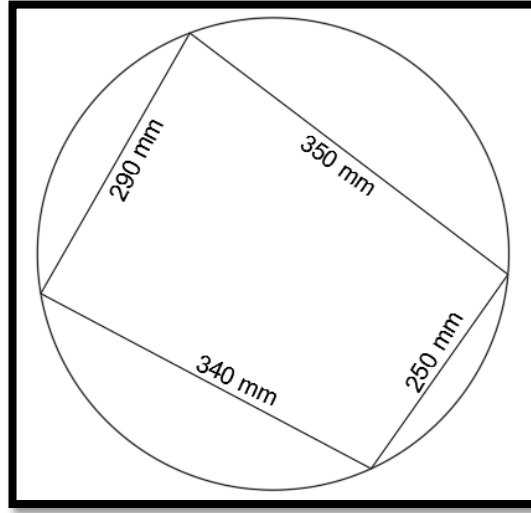


Şekil 4.9. B-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



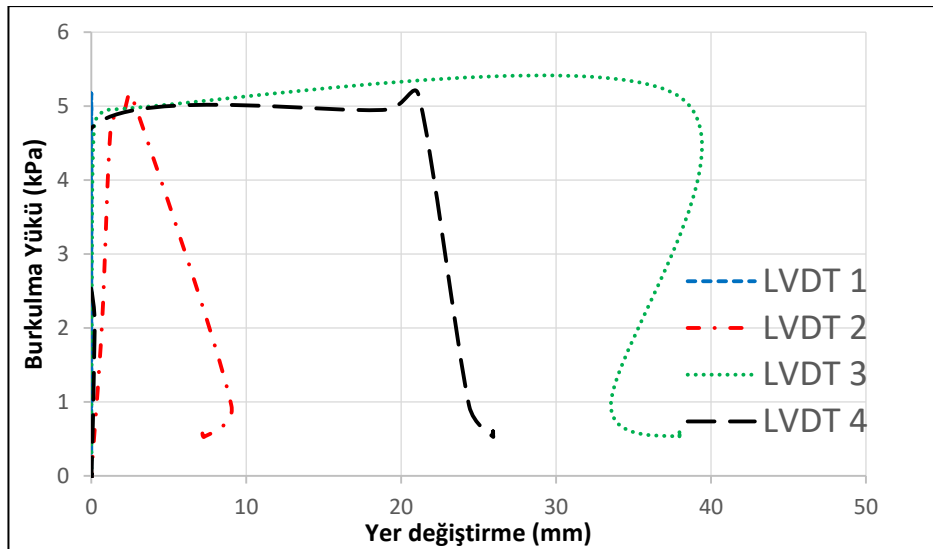
Şekil 4.10. Burkulma deneyi sonrası B-H1.200 numunesinin son hali

B-H1.200 numunesinde burkulma sonucunda dört adet çevresel dalga oluşmuş olup çatı kısmında deformasyon oluşmamıştır. Burkulmalar silindirik tank numunesinin orta yüksekliğine yakın kısmında gerçekleşmiştir. Numunenin birleşim yerinde ayrılma meydana gelmiştir. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde korumuştur. B-H1.200 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. B-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları

B-H1.200 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 2,33 katı, göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 1,08 katıdır. B-H1.200 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %133,33 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında %8,19 artmıştır. B-H1.200 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasiteleri B-H800 numunesi ilk, genel ve göçme burkulması kapasitesine nazaran sırasıyla %36,05, %9,85 ve %39,62 azalmıştır. B-H1.200 numunesinde B-H800 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur. B-H1.200 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.12’de verilmektedir.



Şekil 4.12 B-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

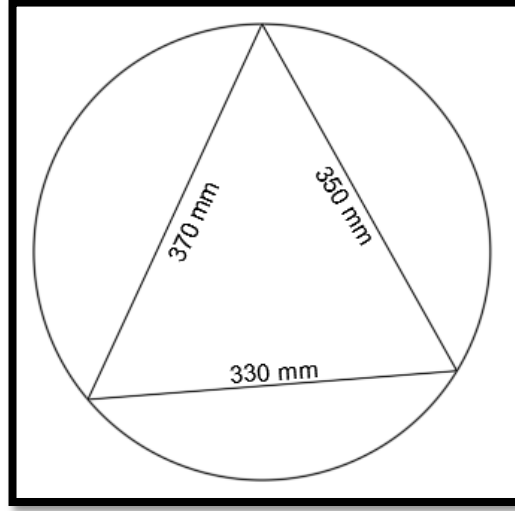
4.1.4. Güçlendirme veya kaplama yapılmayan B-H1.600 numunesi

Şekil 4.13'te B-H1.600 numunesinin deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.



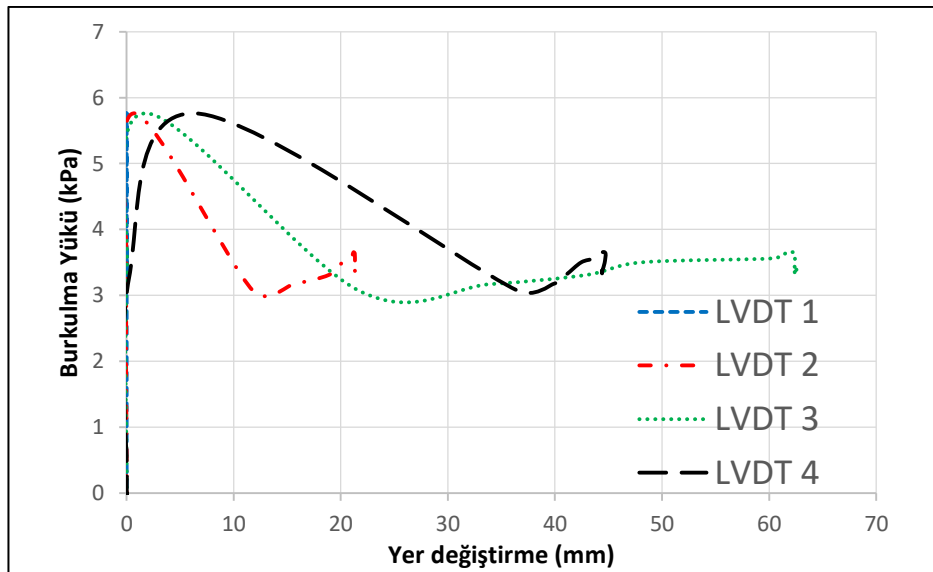
Şekil 4.13. Burkulma deneyi sonrası B-H1.600 numunesinin son hali

B-H1.600 numunesinde burkulma sonucunda üç adet çevresel dalga oluşmuş olup çatı kısmında deformasyon meydana gelmemiştir. Burkulmalar silindirik tank numunesinin orta yüksekliğinde meydana gelmiştir. Numunenin birleşim yerinde ayrılma meydana gelmiştir. B-H1.600 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.14'de gösterilmektedir.



Şekil 4.14. B-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları

B-H1.600 numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,77 katı, göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 1,00 katıdır. B-H1.600 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %76,69 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında herhangi değişim meydana gelmemiştir. B-H1.600 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasiteleri B-H1.200 numunesinin ilk, genel ve göçme burkulma kapasitesine nazaran sırasıyla %59,80, %21,01 ve %11,84 artmıştır. Şekil 4.15'te B-H1.600 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği verilmektedir.

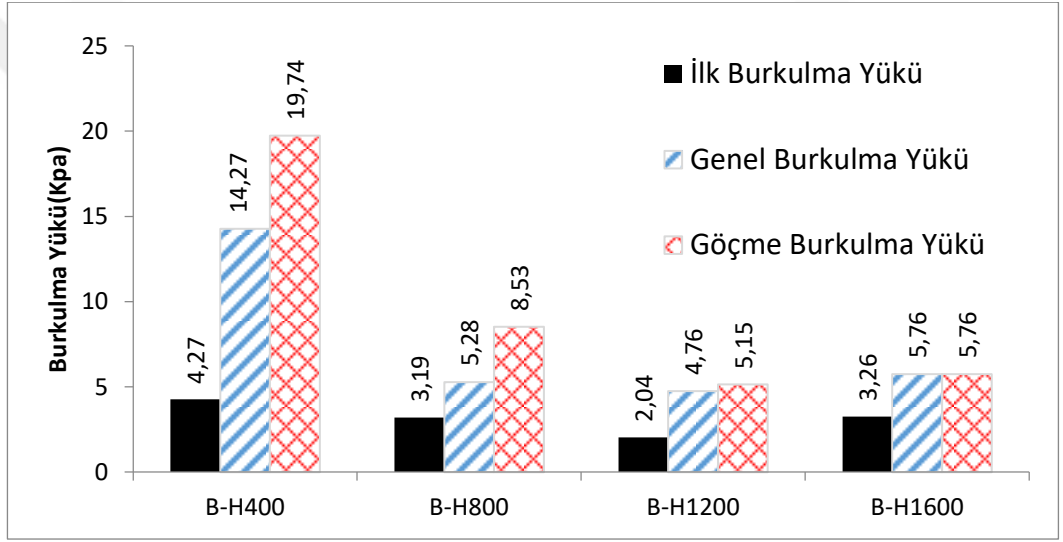


Şekil 4.15. B-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

Burkulma sonucunda B-H1.600 numunesinde B-H1.200 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur. B-H1.600 numunesinde oluşan dalga sayısı B-H1.200 numunesinden azdır.

4.1.5. Deney sonrası güçlendirme veya kaplama yapılmayan numunelerin karşılaştırılması

Güçlendirme veya kaplama yapılmayan birinci gruptaki silindirik tank numunelerinin ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.17’de burkulma deneyi sonrası güçlendirilmeyen silindirik tank numunelerinin son hallerine ait fotoğraflar verilmektedir.



Şekil 4.17. Güçlendirilme veya kaplama yapılmayan silindirik tank numunelerinin son halleri.

- Burkulma deneyi sonrası en fazla burkulma hasarı B-H400 ile B-H800 numunelerinde görülmüştür. Bu iki silindirik tank numunesinde burkulmalar silindir yüksekliği boyunca gerçekleşmiştir. İki numunede başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybetmiştir. Tek tarafa doğru şiddetli burkulmalar meydana geldiğinden iki numunede de çatı kısmında deformasyon meydana gelmiştir.
- B-H1.200 ve B-H1.600 silindirik tank numuneleri burkulma sonrası başlangıç şekillerini büyük ölçüde korumuşlardır. B-H1.200 numunesinde burkulmalar orta bölgeye yakın alt kısımda, B-H1.600 numunesinde ise orta bölge yakın üst kısımda meydana gelmiştir. İki silindirde alt bölgede ve çatıda deformasyon görülmemiştir. Tank yüksekliği arttıkça oluşan deformasyon azalmıştır.
- Silindirik tank numunelerinin yükseklik/yarıçap (H/R) oranı arttıkça genel burkulma kapasiteleri azalmıştır.

4.2. CFRP Kumaşla Güçlendirilen İnce Cidarlı Silindirik Tank Modelleri

Bu gruptaki silindirik tanklar yükseklikleri boyunca CFRP ile güçlendirilerek CFRP'nin burkulma kapasitesine etkisi araştırılmıştır.

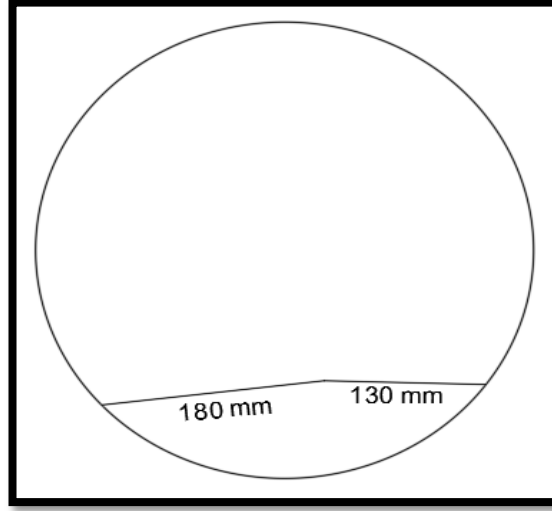
4.2.1. CFRP ile güçlendirilen C-H400 numunesi

Şekil 4.18’de C-H400 numunesinin burkulma deneyi sonrası son halinin fotoğrafları verilmektedir.



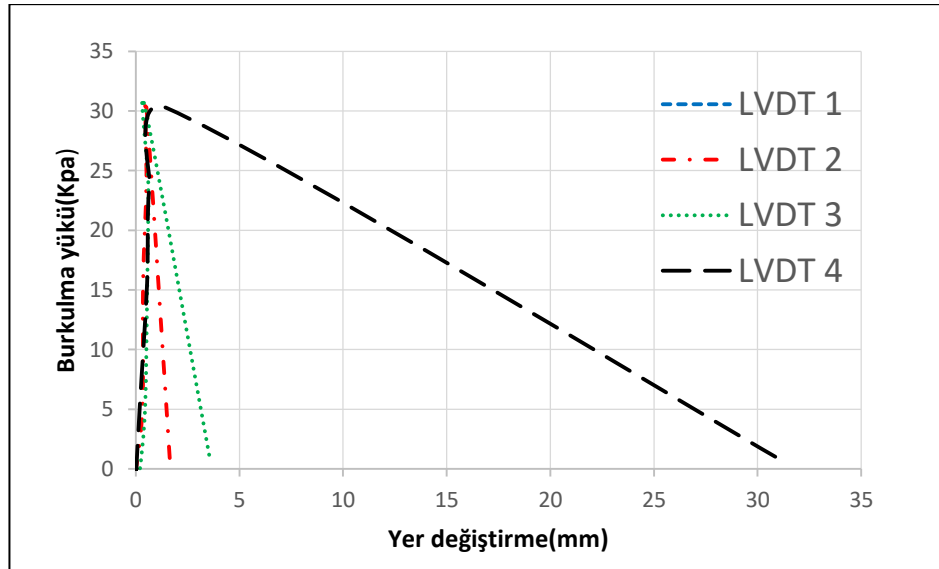
Şekil 4.18. Burkulma deneyi sonrası C-H400 numunesinin son hali

C-H400 numunesinde burkulma sonucu iki adet çevresel dalga oluşmuştur. Çatı kısmında içeri doğru deformasyon oluşmuştur. Numunede ilk burkulma aniden gürültülü bir şekilde tek tarafa doğru numune yüksekliği boyunca meydana gelmiştir. C-H400 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.19. C-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları

C-H400 tankının genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 5,77 katıdır. Göçme burkulması yükü ise genel burkulma yüküyle aynıdır. CFRP güçlendirmesinin etkisiyle tankın genel burkulma kapasitesi artmıştır. C-H400 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %477,10 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştığında herhangi bir değişim olmamıştır. C-H400 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.20’de verilmektedir.



Şekil 4.20. C-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

CFRP ile güçlendirme en fazla genel burkulma kapasitesinde artış meydana getirmiştir. CFRP numunenin burkulma kapasitesini artırarak burkulma sonrası oluşan deformasyonları ve dalga sayısını azaltmıştır.

4.2.2. CFRP ile güçlendirilen C-H800 numunesi

Şekil 4.21’de C-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.22’de burkulma deneyi sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

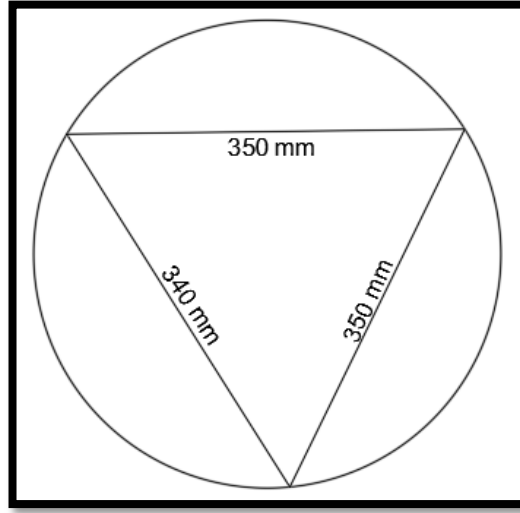


Şekil 4.21. C-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



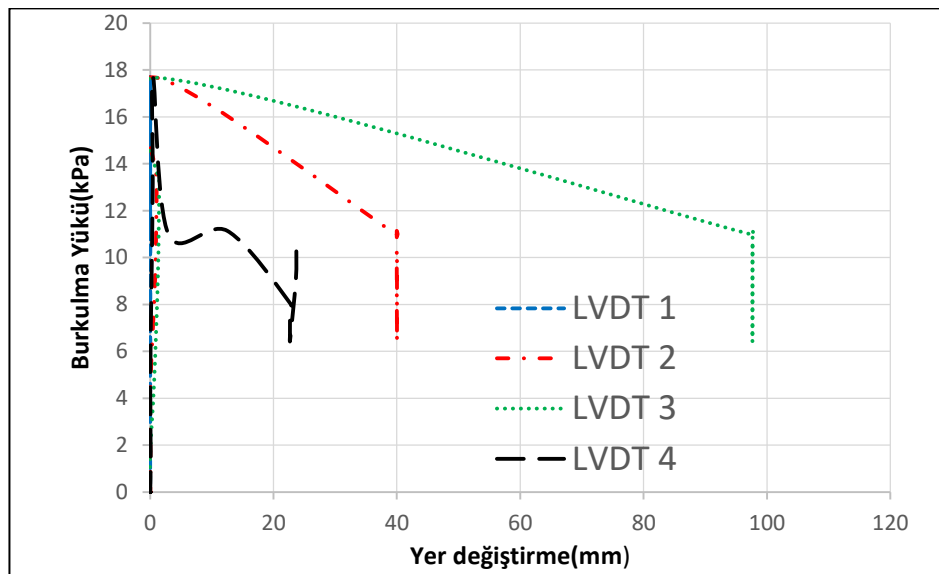
Şekil 4.22. Burkulma deneyi sonrası C-H800 numunesinin son hali

C-H800 numunesinde burkulma sonucunda üç adet çevresel dalga oluşmuştur. Çatı kısmında deformasyon meydana gelmemiştir. Numunede üst kısma yakın bölgede şiddetli burkulma meydana gelmesinden dolayı CFRP’de yırtılma meydana gelmiştir. Burkulma numune yüksekliği boyunca meydana gelmiştir. Birleşim bölgesinde ayrılma meydana gelmiştir. C-H800 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



Şekil 4.23. C-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları

C-H800 numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 3,72 katıdır. Göçme burkulması yükü ise genel burkulma yüküyle aynıdır. C-H800 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %271,79 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında herhangi değişim olmamıştır. C-H800 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasitesi, C-H400 numunesi ilk, genel ve göçme burkulması kapasitesine nazaran sırasıyla %9,35, %41,60, %41,60 azalmıştır. C-H800 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.24’de verilmektedir.



Şekil 4.24. C-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

C-H800 numunesinde C-H400 numunesine nazaran daha fazla deformasyon oluşmuştur. C-H800 numunesinde oluşan dalga sayısı C-H400 numunesinden fazladır.

4.2.3. CFRP ile güçlendirilen C-H1.200 numunesi

şekil 4.25'te C-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, şekil 4.26'da burkulma deneyi sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

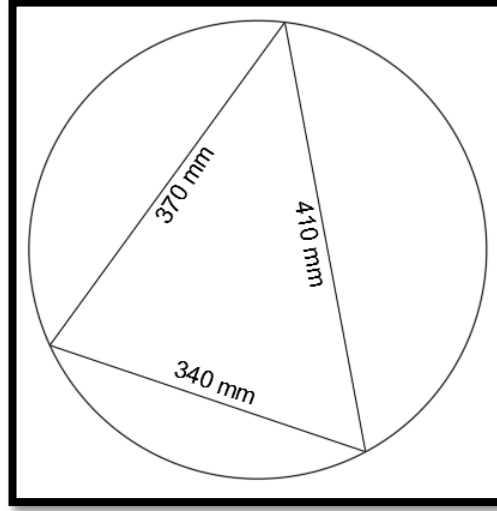


şekil 4.25. C-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



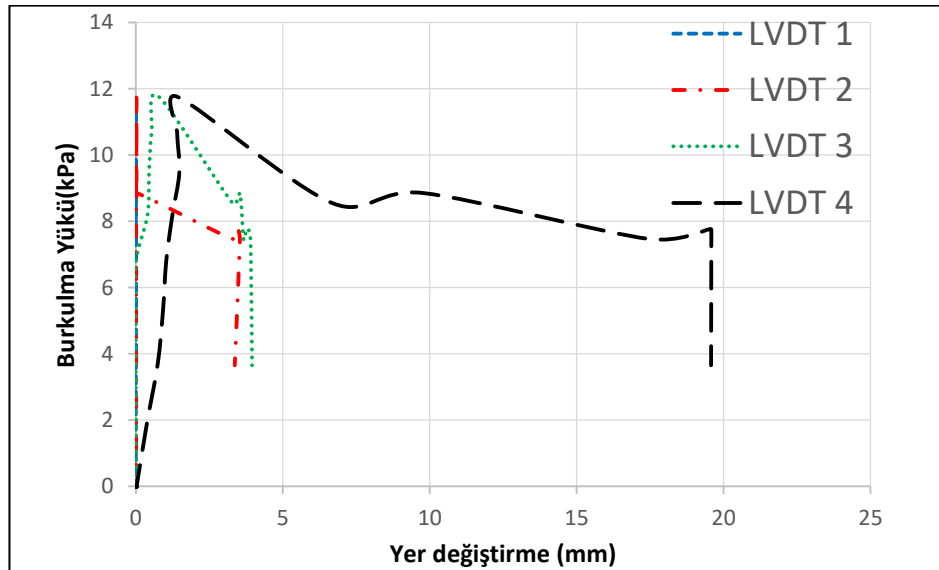
Şekil 4.26. Burkulma deneyi sonrası C-H1.200 numunesinin son hali

C-H1.200 numunesinde burkulma deneyi sonucunda üç adet çevresel dalga oluşmuştur. Burkulmalar numunenin orta bölgesinde meydana gelmiştir. Çatı kısmında deformasyon oluşmamıştır. C-H1.200 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. C-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları

C-H1.200 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,72 katıdır. Göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükü ile aynıdır. C-H1.200 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %72,29 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında herhangi bir değişim olmamıştır. C-H1.200 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasitesi C-H800 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasiteleri ile karşılaştırıldığında, C-H1.200'ün ilk burkulma kapasitesi %43,58 artmış, genel ve göçme burkulma kapasiteleri %33,47 azalmıştır. C-H1.200 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.28'de verilmektedir.



Şekil 4.28. C-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

C-H1.200 numunesinde C-H800 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur.

4.2.4. CFRP ile güçlendirilen C-H1.600 numunesi

Şekil 4.29’da C-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.30’da burkulma deneyi sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

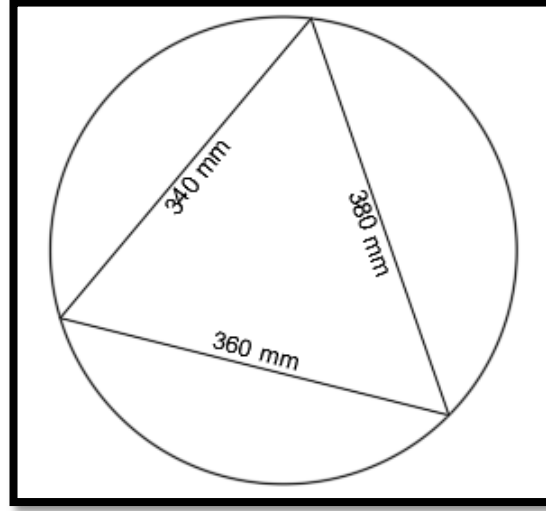


Şekil 4.29. C-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



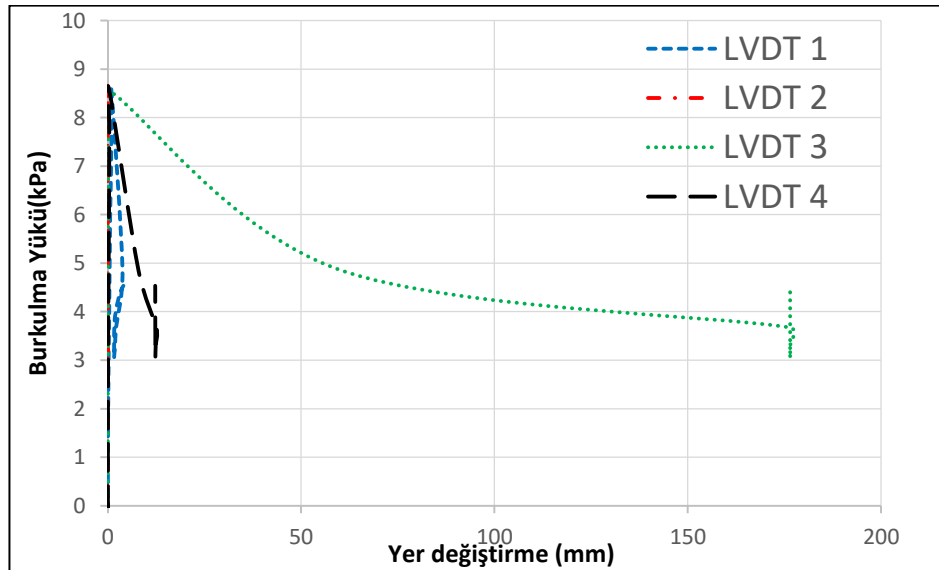
Şekil 4.30. Burkulma deneyi sonrası C-H1.600 numunesinin son hali

C-H1.600 numunesinde burkulma deneyi sonucunda üç adet çevresel dalga oluşmuştur. Çatı kısmında deformasyon meydana gelmemiştir. Burkulmalar numunenin orta bölgesinin üst kısmında meydana gelmiştir. C-H1.200 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.31’de gösterilmektedir.



Şekil 4.31. C-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları

C-H1.600 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,40 katıdır. Göçme burkulması yükü ise genel burkulma yüküyle aynıdır. C-H1.600 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %40,03 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında herhangi bir değişim olmamıştır. C-H1.600 numunesinin ilk, genel, göçme burkulma kapasiteleri C-H1.200 numunesinin ilk, genel ve göçme burkulma kapasitesine göre sırasıyla %10,26, %27,06, %27,06 azalmıştır. C-H1.600 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.32’de verilmektedir.

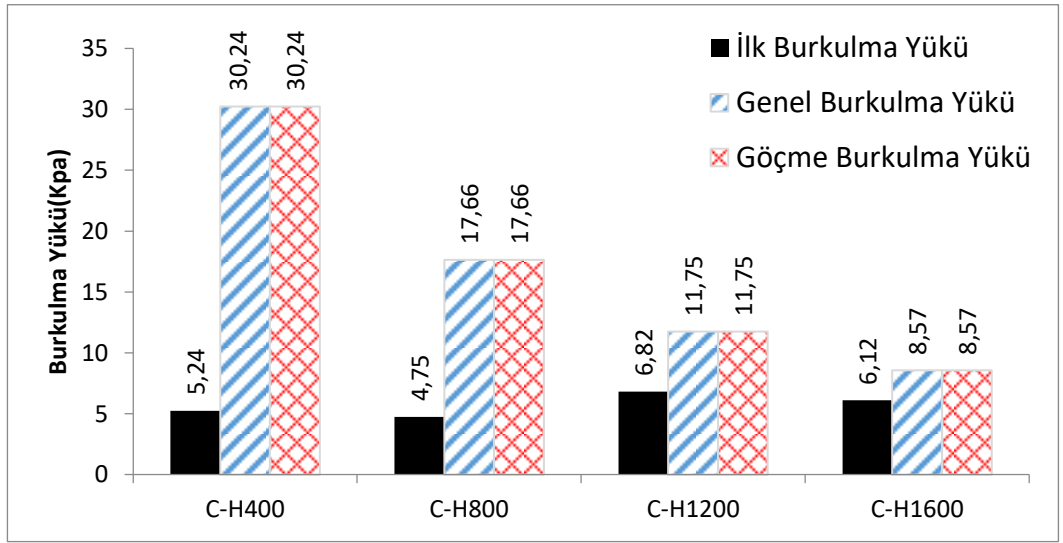


Şekil 4.32. C-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

C-H1.600 numunesinde C-H1.200 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur.

4.2.5. Deney sonrası CFRP ile güçlendirilen numunelerin karşılaştırılması

CFRP ile güçlendirilen ikinci gruptaki silindirik tank numunelerinin ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Şekil 4.33'te gösterilmektedir.



Şekil 4.33. CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.34'te CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinin burkulma deneyi sonrası fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.34. CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinin son halleri

- Tank yüzeyine CFRP uygulanması ile birlikte tankın cidar kalınlığı ve dolayısıyla burkulma kapasitesi artmıştır.
- CFRP'nin yırtıldığı veya tank yüzeyinden ayrıldığı durumlarda ise tanklar kapasitelerinin üstünde dış basınç yüküne maruz kalmıştır. Bu sebeple tankların göçme burkulması CFRP deformasyonunun olduğu an meydana gelmiştir. Bu nedenle CFRP'li tankların genel burkulma ve göçme burkulması yükleri aynıdır.
- CFRP yırtılmasından dolayı en fazla deformasyon C-H800 numunesinde meydana gelmiştir.
- C-H800 numunesinde tek taraflı şiddetli burkulmadan dolayı üst kısma yakın bölgede yırtılma meydana gelmiştir.
- C-H400 numunesinde burkulma nedeniyle çatı kısmında deformasyon oluşmuştur.
- C-H1.200 numunesinde burkulmalar alt kısma yakın bölgede meydana gelmiştir.
- C-H1.600 numunesinde gözle görülür hasar meydana gelmemiştir.
- C-H1.200-1.600 numuneleri başlangıç şeklini büyük ölçüde korumuşlardır.
- Silindirik tank numunelerinin yükseklikleri arttıkça, ilk, genel ve göçme burkulma kapasiteleri azalmıştır.

4.3. Delta-Thene Membranı ile Kaplanan İnce Cidarlı Silindirik Tank Modelleri

Bu bölümde Delta-thene yalıtım malzemesi ile kaplanan tankların burkulma davranışları incelenmiştir. Tank yüzeyi boyunca Delta-thene kaplaması yapılarak yalıtım malzemesinin burkulma kapasitesini ne derecede etkilediğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

4.3.1. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H400 numunesi

Şekil 4.35'te D-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.36'da deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

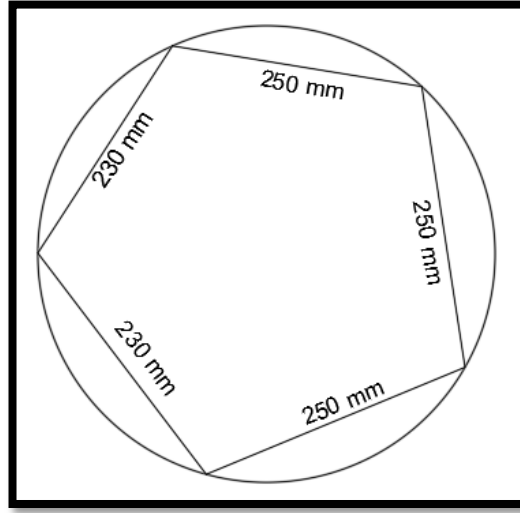


Şekil 4.35. D-H400 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



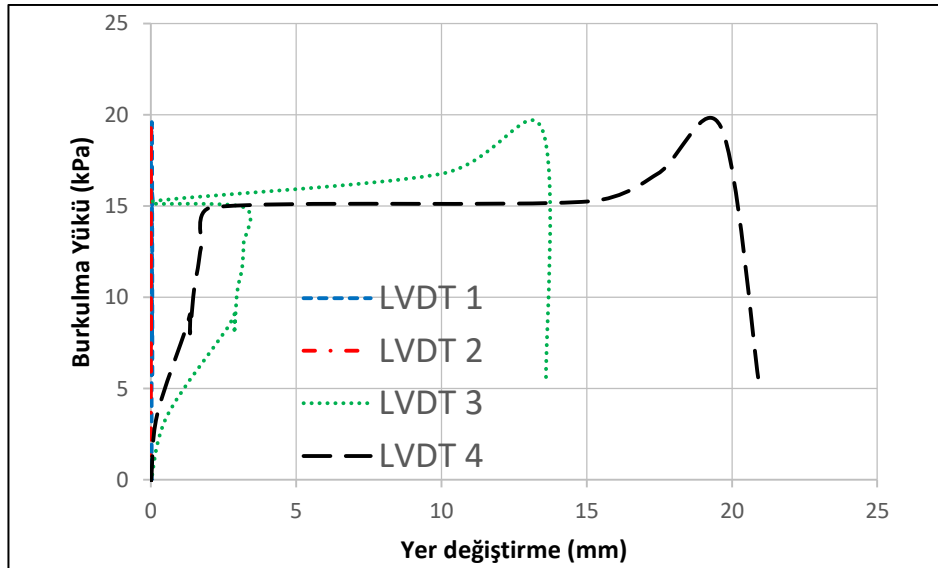
Şekil 4.36. Burkulma deneyi sonrası D-H400 numunesinin son hali

D-H400 numunesinde burkulma deneyi sonucunda beş adet dalga oluşmuştur. Çatı kısmında şiddetli burkulmalar nedeniyle yırtılma meydana gelmiştir. Numunede burkulmalar ve dalgalanmalar numune yüksekliği boyunca meydana gelmiştir. D-H400 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.37’de gösterilmektedir.



Şekil 4.37. D-H400 numunesinde oluşan dalga boyutları

D-H400 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 3,13 katı; göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 1,29 katıdır. D-H400 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %213,00 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştığında %29,34 artmıştır. D-H400 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.38’de verilmektedir.



Şekil 4.38. D-H400 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

Delta-Thene ile güçlendirme en fazla ilk burkulma kapasitesinde artış meydana getirmiştir. D-H400 numunesinin burkulma yükü-yer değiştirme grafiği incelendiğinde

deney süresince numune etrafında oluşan deplasmanların farklı olması dalga boyutlarını etkilemiştir. Deney numunesi başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir. Numunenin çatı kısmında yırtılma olmuştur.

4.3.2. Delta-Thenne membranı ile kaplanan D-H800 numunesi

Şekil 4.39’da D-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi, Şekil 4.40’da deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

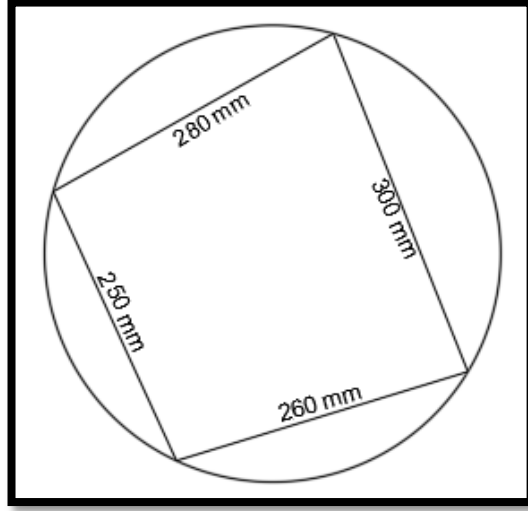


Şekil 4.39. D-H800 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



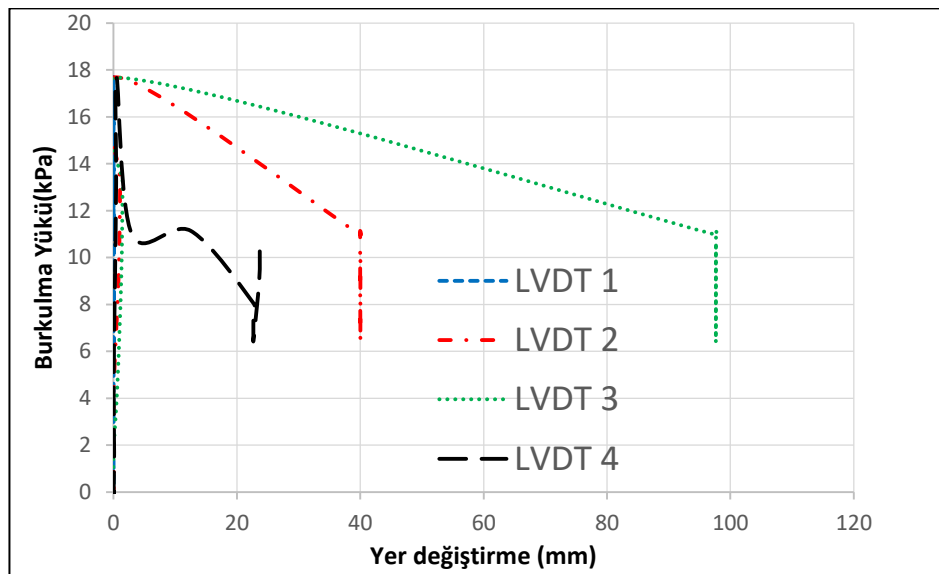
Şekil 4.40. Deney sonrası D-H800 numunesinin son hali

D-H800 numunesinde burkulma deneyi sonucunda dört adet çevresel dalga oluşmuştur. Burkulmalar numunenin orta bölgesi boyunca üst kısma yakın kısımlarda meydana gelmiştir. Numunede burkulmadan dolayı tek taraflı eğilme oluşmuştur. Çatı kısmında deformasyon oluşmamıştır. D-H800 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.41’de gösterilmektedir.



Şekil 4.41. D-H800 numunesinde oluşan dalga boyutları

D-H800 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yükünün 1,73 katı, göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 1,05 katıdır. D-H800 numunesinin genel burkulma kapasitesi, ilk burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %72,76 artmıştır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %4,94 artmıştır. D-H800 numunesinin ilk burkulma kapasitesi, D-H400'e göre %3,14 artarken, genel ve göçme burkulma kapasitesi ise sırasıyla %43,07, %53,81 azalmıştır. D-H800 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.42'de verilmektedir.



Şekil 4.42. D-H800 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

D-H800 numunesinin burkulma yükü-yer değişirme grafiği incelendiğinde farklı dalgalanmalardan ve numunenin tek tarafa doğru eğilmesinden dolayı farklı yer değiştirmeler meydana gelmiştir. D-H800 numunesinde D-H400 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur.

4.3.3. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H1.200 numunesi

Şekil 4.43'te D-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirildiği, Şekil 4.44'te deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

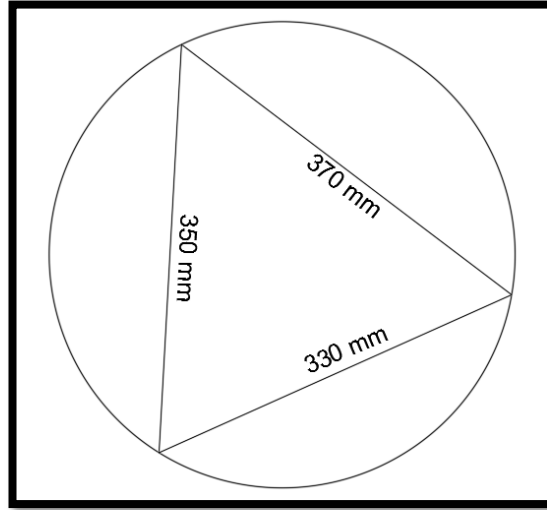


Şekil 4.43. D-H1.200 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



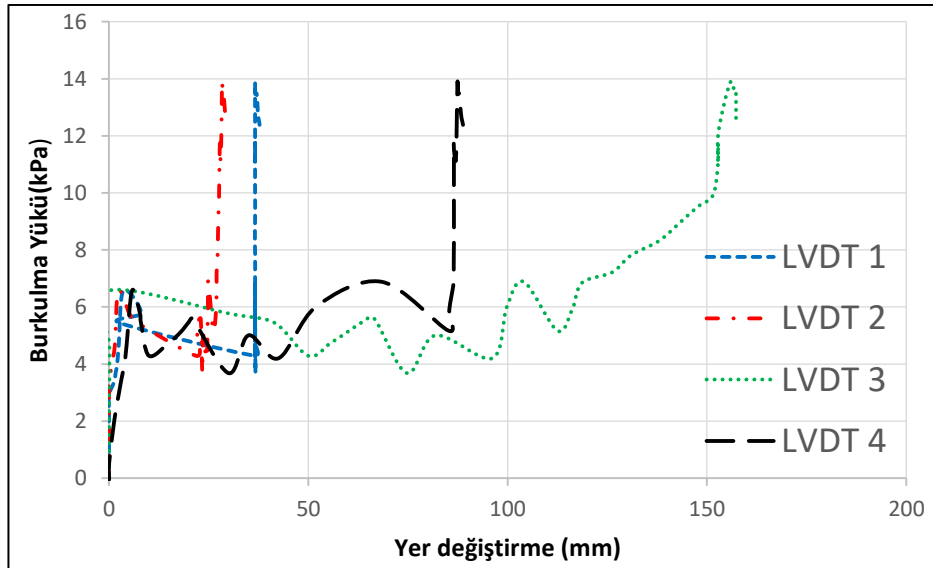
Şekil 4.44. Deney sonrası D-H1.200 numunesinin son hali

D-H1.200 numunede burkulma sonucunda üç adet çevresel burkulma dalgası oluşmuştur. Çatı kısmında deformasyon meydana gelmiştir. Burkulmaların çok büyük olmasından dolayı numunede içe katlanma şeklinde numune yüksekliği boyunca deformasyonlar meydana gelmiştir. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir. D-H1.200 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.45’te gösterilmektedir.



Şekil 4.45. D-H1.200 numunesinde oluşan dalga boyutları

D-H1.200 numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yüküyle aynıdır. Göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 2,11 katıdır. Göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesi ile karşılaştırıldığında %110,64 artmıştır. D-H1.200 numunesinin ilk burkulma ve göçme burkulma kapasitesi D-H800'e göre sırasıyla %33,74 ve %55,38 artarken, genel burkulma kapasitesi %22,59 azalmıştır. D-H1.200 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.46'da verilmektedir.



Şekil 4.46. D-H1.200 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

D-H1.200 numunesinin burkulma yükü-yer değiştirme grafiği incelendiğinde içe doğru katlanmalı şekilde meydana gelen dalgalanmalardan dolayı farklı noktalarda aynı

yük altında aynı yer değiştirmeler meydana gelmiştir. D-H1.200 numunesinde D-H800 numunesine nazaran daha fazla deformasyon oluşmuştur.

4.3.4. Delta-Thene membranı ile kaplanan D-H1.600 numunesi

Şekil 4.47’de D-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirildiği, Şekil 4.48’de deney sonrası numunenin son halinin fotoğrafları verilmektedir.

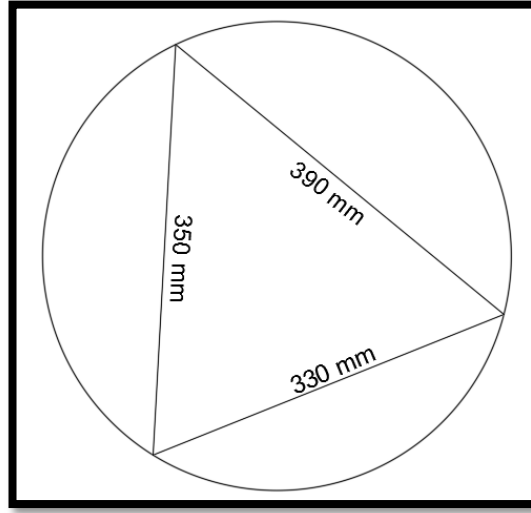


Şekil 4.47. D-H1.600 numunesinin deney düzeneğine yerleştirilmesi



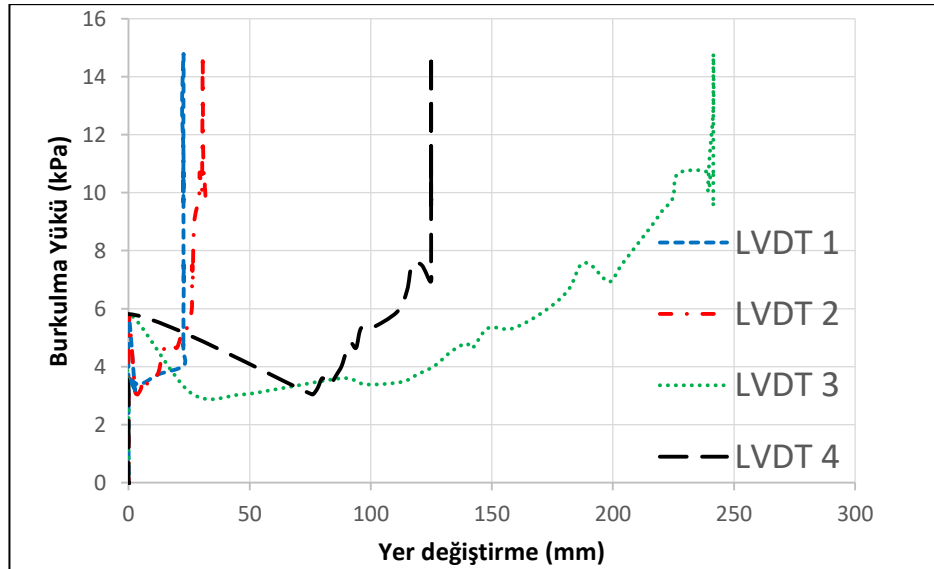
Şekil 4.48. Deney sonrası D-H1.600 numunesinin son hali

D-H1.600 numunesinde burkulma sonucunda üç adet çevresel burkulma dalgası oluşmuştur. Çatı kısmında deformasyon meydana gelmiştir. Numune yüksekliği boyunca deformasyonlar ve dalgalanmalar meydana gelmiştir. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir. D-H1.600 numunesine ait ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Numunede meydana gelen dalgaların boyutları Şekil 4.49’da gösterilmektedir.



Şekil 4.49. D-H1.600 numunesinde oluşan dalga boyutları

D-H1.600 silindirik tank numunesinin genel burkulma yükü, ilk burkulma yüküyle aynı olup göçme burkulması yükü ise genel burkulma yükünün 2,54 katıdır. D-H1.600 numunesinin göçme burkulma kapasitesi, genel burkulma kapasitesine nazaran %154,39 artmıştır. D-H1.600 numunesinin burkulma kapasiteleri D-H1.200 numunesi burkulma kapasitelerine nazaran ilk ve genel burkulma kapasitesi %11,70 azalırken, göçme burkulma kapasitesi %6,64 artmıştır. D-H1.600 numunesine ait burkulma yükü-yer değiştirme grafiği Şekil 4.50’de verilmektedir.

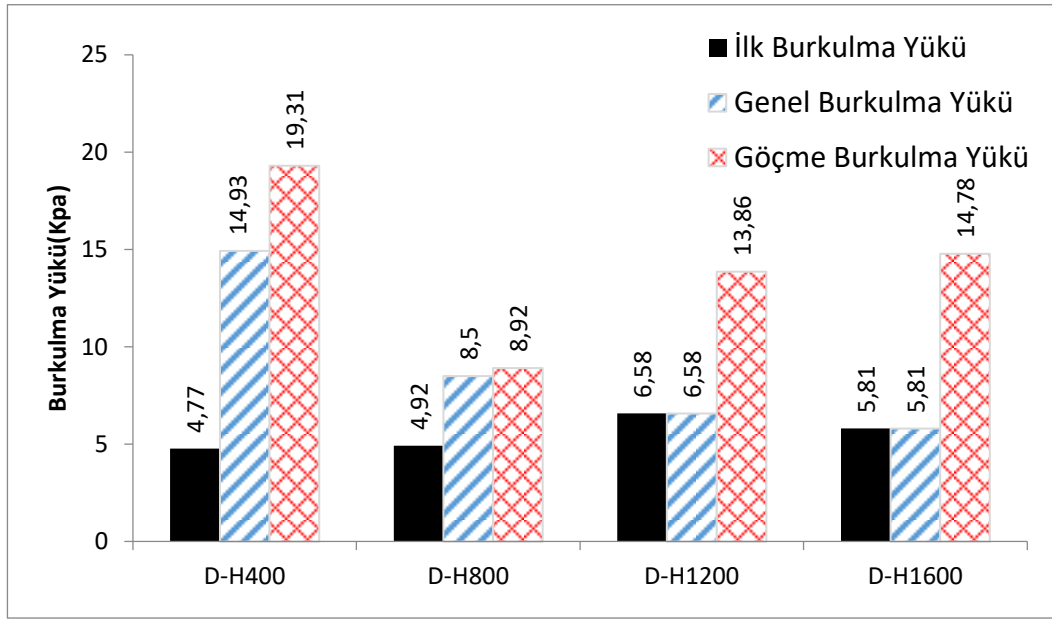


Şekil 4.50. D-H1.600 numunesi burkulma yükü-yer değiştirme grafiği

D-H1.600 numunesinde D-H1.200 numunesine nazaran daha az deformasyon oluşmuştur.

4.3.5. Delta-Thene membranı ile kaplanan numunelerin karşılaştırılması

Delta-Thene membranı ile kaplanan üçüncü gruptaki silindirik tank numunelerinin ilk, genel ve göçme burkulma değerleri Şekil 4.51’de gösterilmektedir.



Şekil 4.51. Delta-Then membranı ile kaplanan silindirik tank numunelerinin burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.52. Delta-Thene ile kaplanan silindirik tank numunelerinin son halleri

- Delta-thene kaplaması tankların ilk burkulma kapasitesini arttırmada etkili olurken, genel burkulma kapasitesini arttırmada yetersiz kalmıştır. Bunun sebebi Delta-thene malzemesinin sahip olduğu düşük elastisite modülüdür.
- En fazla deformasyon D-H1.200 ve D-H1.600 numunelerinde meydana gelmiştir.
- Dört numunede de numune yüksekliği boyunca deformasyon oluşmuştur.
- D-H400-1200-1.600 numunelerinin çatı kısmında deformasyon gözlemlenmiştir.
- Numunelerin hepsinde içeri göçme şeklinde burkulma hasarı görülmüştür.
- Numune yüksekliği arttıkça burkulma hasarının etkisinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Numunelerin yüksekliği arttıkça genel burkulma kapasitesi azalmıştır.

4.4. Aynı Boyutlardaki İnce Cidarlı Silindirik Tank Modellerinin Karşılaştırılması

Aynı boyutlara sahip üç gruptaki numuneler karşılaştırılarak ilk, genel ve göçme burkulma kapasiteleri ile numunelerde meydana gelen deformasyonların karşılaştırılması yapılmıştır.

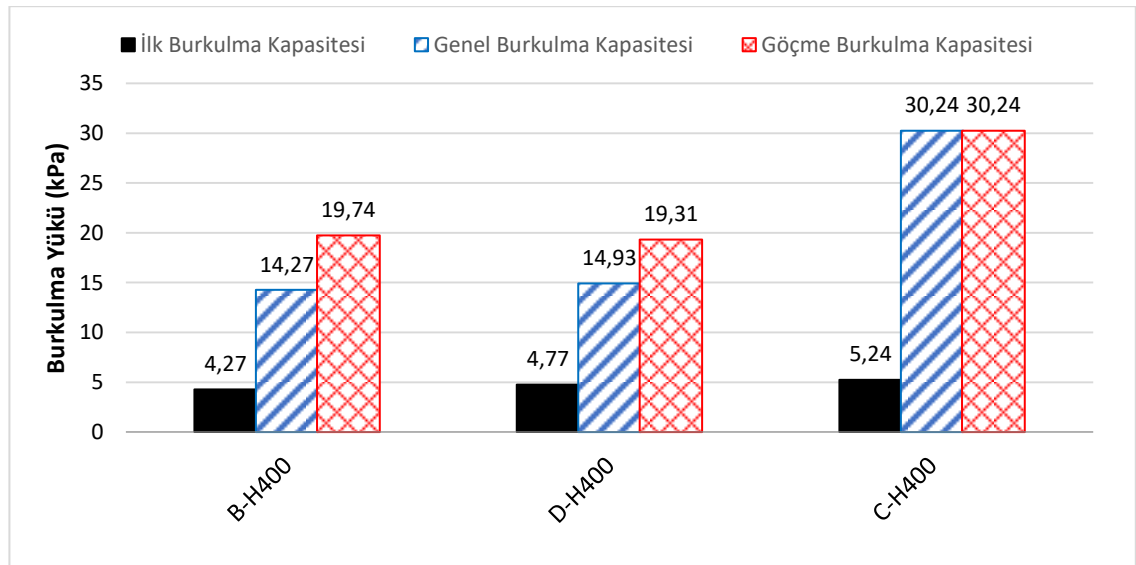
4.4.1. B-H400, C-H400 ve D-H400 numunelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.53'te üç grup olarak tasarlanıp yapılan deneyimizde yüksekliği 400 mm olan silindirik tank numunelerinin burkulma deneyi sonrası fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.53. B-H400, C-H400 ve D-H400 silindirik tank numunelerinin son halleri

B-H400, C-H400 ve D-H400 numunelerine ait ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasiteleri grafiği Şekil 4.54’te verilmektedir.



Şekil 4.54. B-H400, C-H400 ve D-H400 numunelerinin ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.

- En fazla burkulma hasarı B-H400 numunesinde meydana gelmiş olmasına rağmen D-H400 numunesinde çatı kısmında yırtılma meydana gelmiştir.
- Üç numunede de burkulma numune yüksekliği boyunca görülmüştür.
- Burkulmalar üç numunede de içeri doğru göçme şeklinde meydana gelmiştir.
- Üç numunenin çatı kısmında deformasyon meydana gelmiş olup en fazla deformasyon B-H400’de en az deformasyon C-H400’de meydana gelmiştir.
- CFRP ile güçlendirme numunenin ilk, genel ve göçme burkulması kapasitesinde artış meydana getirmiştir. En fazla artış genel burkulma kapasitesinde görülmüştür.
- Delta-Thene ile kaplama numunenin ilk burkulma kapasitesinde artış meydana getirmiştir.
- CFRP ile güçlendirme numunede meydana gelen çevresel burkulma dalga sayısının azalmasında ve numunede daha az deformasyon meydana gelmesinde etkili olmuştur.

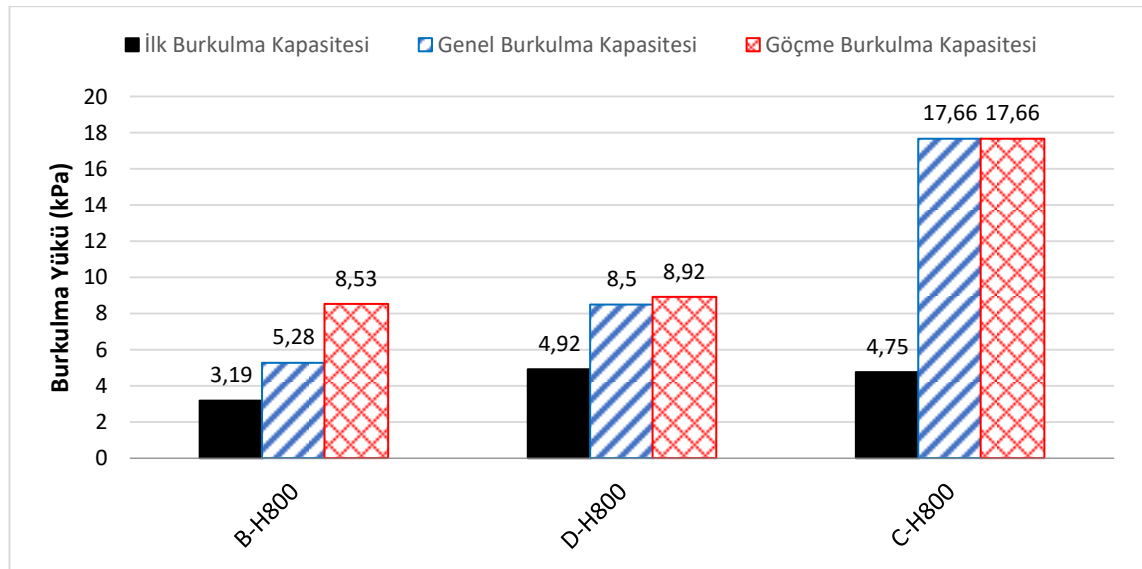
4.4.2. B-H800, C-H800 ve D-H800 numunelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.55’te numune yüksekliği 800 mm olan silindirik tank modellerinin burkulma deneyi sonrası fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.55. B-H800, C-H800 ve D-H800'ün son halleri

B-H800, C-H800 ve D-H800 numunelerine ait ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasiteleri grafiği Şekil 4.56'da verilmektedir.



Şekil 4.56. B-H800, C-H800 ve D-H800'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.

- En fazla burkulma hasarı B-H800 numunesinde görülmüştür.
- C-H800 numunesinde CFRP kumaşta ve birleşim bölgesinde de yırtılma meydana gelmiştir.
- Üç numunede de burkulmalar silindirik yüksekliği boyunca meydana gelmiştir.
- Üç numunenin çatı kısmında hasar meydana gelmemiştir.
- Üç numunede burkulmadan dolayı tek tarafa eğilme söz konusu olduğundan yükseklik farkı oluşmuştur.
- CFRP ile güçlendirme numunenin ilk, genel ve göçme burkulma kapasitelerini artırmıştır. En fazla kapasite artışını genel burkulma kapasitesinde meydana getirmiştir.
- Delta-Thene ile kaplama numunenin ilk burkulma kapasitesini artırmıştır.

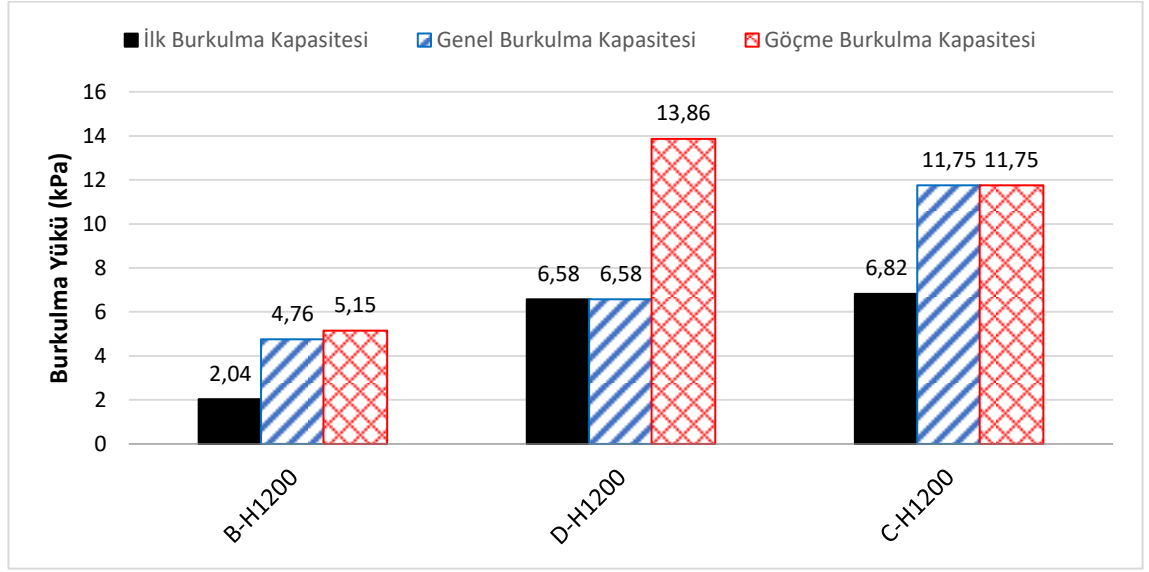
4.4.3. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200 numunelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.57’de numune yüksekliği 1.200 mm olan silindirik tank modellerinin burkulma deneyi sonrası fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.57. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200’ün son halleri

B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200 numunelerine ait ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasiteleri grafiği Şekil 4.58’de verilmektedir.



Şekil 4.58. B-H1.200, C-H1.200 ve D-H1.200'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.

- Burkulma sonrası en fazla deformasyon D-H1.200 numunesinde görülmüştür. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek kullanılamaz hale gelmiştir.
- Burkulma sonrası B-H1.200 ile C-H1.200 numunelerinde fazla deformasyon meydana gelmediğinden numuneler başlangıç şekillerini büyük ölçüde korumuşlardır.
- Burkulmalar, B-H1.200 ile C-H1.200 numunelerinde alt kısma yakın bölgede, D-H1.200 numunesinde orta kısma yakın bölgede meydana gelmiştir.
- D-H1.200 numunesinde çatı kısmında içeri doğru göçme şeklinde deformasyon oluşmuştur.
- CFRP ile güçlendirme numunenin ilk, genel ve göçme burkulma kapasitelerini artırmıştır. En fazla burkulma kapasite artışını ilk burkulma kapasitesinde meydana getirmiştir.
- Delta-Thene ile kaplama numunenin ilk burkulma kapasitesini artırmıştır.

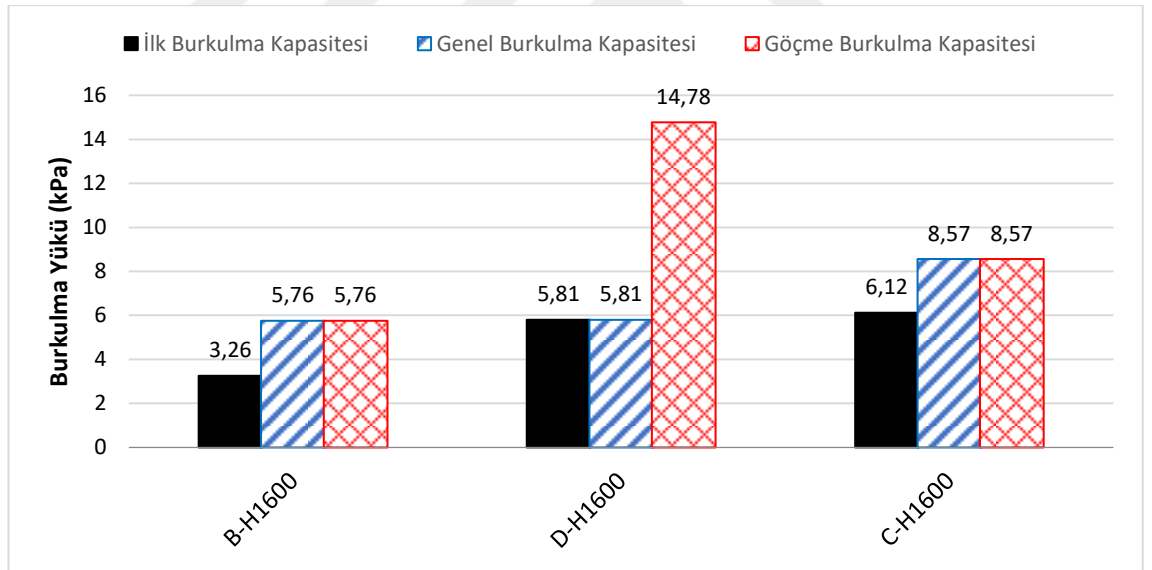
4.4.4. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600 numunelerinin karşılaştırılması

Şekil 4.59'da numune yüksekliği 1.600 mm olan silindirik tank modellerinin burkulma deneyi sonrası fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 4.59. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600'ün son halleri

B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600 numunelerine ait ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasiteleri grafiği Şekil 4.60'da verilmektedir.



Şekil 4.60. B-H1.600, C-H1.600 ve D-H1.600'ün ilk, genel ve göçme burkulma yükü kapasitelerinin karşılaştırılması.

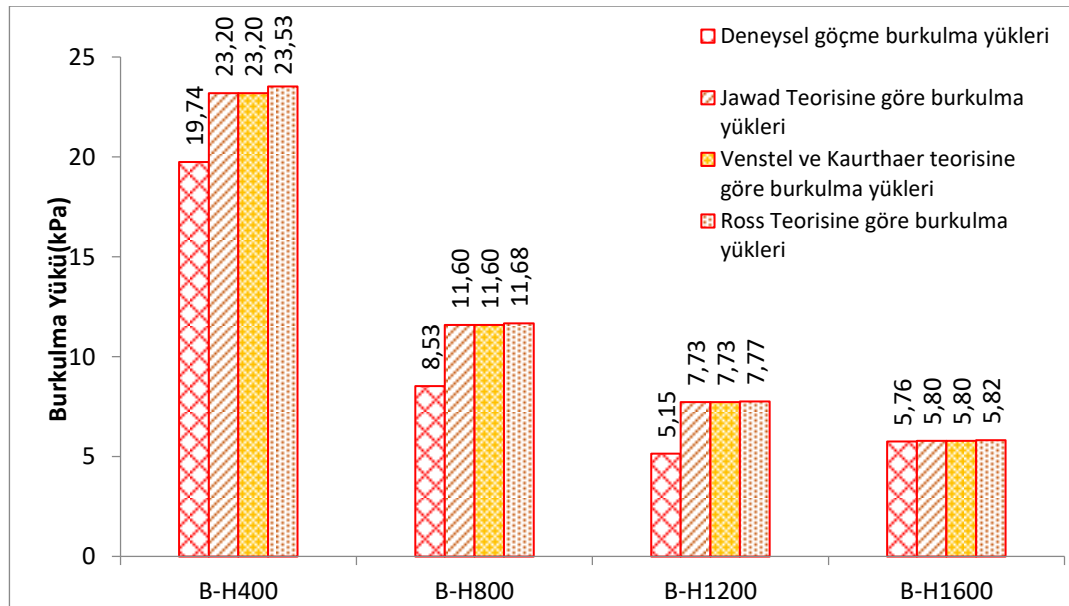
- Burkulma sonrası en fazla deformasyon D-H1.600 numunesinde görülmüştür.
- D-H1.600 numunesinde burkulma sonucu oluşan deformasyon numune yüksekliği boyunca meydana gelmiştir. Numune başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybederek numune kullanılamaz hale gelmiştir.
- C-H1.600 numunesi başlangıç şeklini büyük ölçüde korumuştur.

- B-H1.600 numunesinde numunenin orta bölgesinde deformasyon oluşmuştur.
- Çatı kısmında deformasyon D-H1.600 numunesi haricinde diğer numunelerde görülmemiştir.
- CFRP ile güçlendirme numunenin ilk, genel ve göçme burkulma kapasitelerini artırmıştır. En fazla burkulma kapasite artışını ilk burkulma kapasitesinde meydana getirmiştir.
- Delta-Thene ile kaplama numunenin ilk burkulma kapasitesini artırmıştır.

4.5. Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Burkulma Yükleri İle Oluşan Hasarların Mukayesesi

Çalışmanın bu bölümünde deneylerden elde edilen burkulma verileri ile literatürde yer alan formüllerden elde edilen burkulma verileri karşılaştırılmıştır. Tankların teorik olarak burkulma yüklerinin hesabında 3.1, 3.2 ve 3.3 formülleri kullanılmıştır.

Şekil 4.61’de numunelere ait deneysel ve teorik göçme burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 4.61. Deneysel ve teorik göçme burkulma yükü değerlerinin karşılaştırılması

Deneyssel ve teorik burkulma kapasiteleri arasındaki hata oranları Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Deneyssel ve teorik burkulma kapasiteleri arasındaki hata oranları

Numune	Deneylerden Elde Edilen Göçme Burkulması Yükü (kPa)	Jawad formülü		Ross formülü		Ventsel ve Krauthammer formülü	
		Burkulma Kapasitesi (kPa)	Hata	Burkulma Kapasitesi (kPa)	Hata	Burkulma Kapasitesi (kPa)	Hata
B-H400	19,74	23,20	%15	23,53	%16	23,20	%15
B-H800	8,53	11,60	%26	11,68	%27	11,60	%26
B- H1.200	5,15	7,73	%33	7,77	%34	7,73	%33
B- H1.600	5,76	5,80	%1	5,82	%1	5,80	%1

Jawad, Ross ve Ventsel ve Krauthammer'in formüllerinden elde edilen burkulma değerleri birbirine yakın bulunmuştur. Fakat Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere formüllerden elde edilen değerler, en büyük fark %34 olmak üzere deneyler sonucunda elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bu farklılığın temel sebebi tankların geometrik kusurlarıdır. Formüllerde geometrik kusurların etkisi dikkate alınmamıştır. Bu sebeple formüllerin güçlendirme veya yalıtım durumunu hem de geometrik kusurları içerecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

Tanklarda oluşabilecek çevresel burkulma dalgalarının sayısı formül 3.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

Deney sonucu oluşan burkulma dalgalarının sayısı ve formül 3.4'ten elde edilen dalga sayıları Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.4. Deney sonucu oluşan dalga sayısı ile teorik formüllerden elde edilen oluşabilecek dalga sayılarının karşılaştırılması.

GRUPLAR	Numune No	Deneyde Oluşan Dalga Sayısı	Formülden Elde Edilen Yaklaşık Dalga sayısı
1.Grup Güçlendirilmeyen numuneler	B-H400	5	8-9
	B-H800	4	6-7
	B-H1.200	3	5-6
	B-H1.600	3	4-5
2.Grup CFRP ile Güçlendirilen numuneler	C-H400	2	8-9
	C-H800	3	6-7
	C-H1.200	3	5-6
	C-H1.600	3	4-5
3.Grup Delta-Thene İle Güçlendirilen numuneler	D-H400	5	8-9
	D-H800	4	6-7
	D-H1.200	3	5-6
	D-H1.600	3	4-5

Burkulma deneyi sonucunda numunelerde meydana gelen dalga sayılarının teorik formül sonucu elde edilen yaklaşık değerden daha az olduğu gözükmemektedir. Dalga sayısının hesaplanmasında teorik formüller yetersiz kalmıştır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı yüksekliklerde 12 adet ince cidarlı silindirik çelik tank numunesi üç grupta incelenmiştir. İlk gruptaki tanklara herhangi bir güçlendirme veya kaplama yapılmazken, ikinci gruptaki tanklara tank yüksekliği boyunca CFRP güçlendirmesi, üçüncü gruptaki tanklara ise tank yüksekliği boyunca Delta-Thene kaplaması yapılmıştır. Her grupta dört farklı yükseklikte tank incelenerek, ince cidarlı çelik tankların burkulma kapasitesine yükseklik ve güçlendirme veya kaplamanın etkisi araştırılmıştır. Tanklar üniform dış basınca maruz kalarak burkulma deneylerine tabii tutulmuş ve deneylerden elde edilen burkulma verileri literatürde yer alan formüllerden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Tankların ilk burkulmadan sonra büyük ölçüde burkulma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Tanklarda genel burkulma yükünün ilk burkulma yüküne oranı 1,00 ile 5,78 arasındadır.
- Tankların ilk burkulma, genel burkulma ve göçme burkulması yükleri yükseklik arttıkça azalmıştır. Tankların yüksekliğinin artmasına bağlı olarak narinlik oranının artması burkulma kapasitelerinin düşmesine neden olmuştur
- Güçlendirilmiş veya kaplama yapılmış tankların burkulma değerleri, güçlendirilmemiş tankların burkulma değerlerinden daha fazla çıkmıştır. Hem CFRP güçlendirmesi hem de Delta-Thene ile kaplama, tankların burkulma kapasitesini artırmıştır. Delta-Thene ile kaplama ilk burkulma kapasitesini arttırmada daha etkili olmuştur. CFRP ile güçlendirmenin hem ilk burkulma hem de genel burkulma kapasitesini önemli ölçüde arttırmada çok etkili olmuştur.
- Göçme burkulma yükünün genel burkulma yüküne oranı, güçlendirilmemiş veya kaplama yapılmamış tanklar için 1,00 ile 1,62 arasında, Delta-Thene ile kaplanan tanklar için 1,05 ile 2,54 arasında değişmektedir. CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numunelerinde CFRP kompozitlerinin yırtılma ve numune yüzeyinden ayrışması nedeniyle numuneler maksimum kapasitelerinin ötesinde dış yüklere maruz kalmıştır. Bu nedenle, CFRP ile

güçlendirilen numunelerin genel burkulma yükleri ve göçme burkulma yükleri aynı bulunmuştur.

- Güçlendirme veya kaplama yapılmayan ve Delta-thene ile kaplanan tanklarda tank yüksekliği arttıkça oluşan burkulma dalgalarının sayısı azalmıştır.
- CFRP ile güçlendirilen tanklarda oluşan dalga sayıları, güçlendirme veya kaplama yapılmayan ile Delta-Thene ile kaplanan gruptaki tanklarda oluşan dalga sayılarından daha azdır. Ayrıca CFRP'li tanklarda tank yüksekliği artmasına rağmen burkulma dalgalarının sayısı aynı kalmıştır.
- Silindirik tankların güçlendirilmesi ağırlıklarının artmasına neden olmuştur. Delta-Thene ile güçlendirilmiş tankların ağırlıkları güçlendirilmemiş gruptaki tanklara göre %31,5 ile %45,07 arasında artmıştır. CFRP ile kaplanmış tanklar için bu artış %10,15 ile %15,21 arasındadır. Delta-Thene ile güçlendirme yöntemi, tankların ağırlıklarını büyük ölçüde artırmıştır.
- CFRP ile güçlendirilen silindirik tank numuneleri fazla deforme olmadan başlangıç şeklini önemli ölçüde korumuştur. Delta-Thene yalıtım malzemesi olduğundan tanklarda hava sızıntılarını büyük ölçüde engellemiştir. Bu sebeple tanklar daha fazla deforme olmuştur. Delta-Thene ile kaplanan tanklar başlangıç şeklini büyük ölçüde kaybetmiştir.

DeneySEL ve teorik burkulma yükleri karşılaştırıldığında, formüllerden elde edilen burkulma değerleri daha yüksek bulunmuştur. Bunun sebebi formüllerin geometrik kusurların dikkate alınmamasıdır. Bu nedenle mevcut formüllerin geometrik kusurların etkisini de içerecek şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abu-Sena, A. B. B., Said, M., Zaki, M.A., Dokmak, M. 2019. Behavior of hollow steel sections strengthened with CFRP. *Construction and Building Materials*, 205, 306-320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.237>.
- Aghajari, S., Abedi, K., Showkati, H. 2006. Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 44, 904–909.
- Akarsu, O. 2021. İnce cidarlı silindirik tankların burkulma performanslarının sayısal modellenmesi. Yüksek Lisans tezi Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 74, Erzurum.
- Al-Azzawi, Z., Stratford, T., Rotter, M., Bisby, L. 2020. A new design method for a novel FRP strengthening technique against shear buckling of steel plate girders. *Thin-Walled Structures*, 148, 106611. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106611>.
- Anonim, 2022a. Web Sitesi: <http://cukurovasilo.com/>, Erişim Tarihi: 15.02.2022.
- Anonim, 2022b. Web Sitesi: <http://dehatech.com.tr>, Erişim Tarihi: 15.02.2022.
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: <https://www.doerken.com>, Erişim Tarihi: 15.02.2022.
- Arbocz, J. and J. H. Starnes Jr. 2002. Future directions and challenges in shell stability analysis. *Thin-Walled Structures*, 40(9), 729-754.
- Ardalani, G. T., Showkati, H., Teymourlouei, H. E., Firouzsalar, S. E. 2017. The performance of plate girders reinforced with CFRP plates of various lengths. *Thin-Walled Structures*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.015>.
- Korucuk, F. M., Maali, M., Kılıç, M., Aydın, A. C. 2019. Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106259>.
- Aydın, A. C., Yaman, Z., Ağcakoca, E., Kılıç, M., Maali, M. Dizaji, A. A. 2019. CFRP effect on the buckling behavior of dented cylindrical shells. *International Journal of Steel Structures*, 20(2), 425-435.
- Aydın, A.C., Kılıç, M., Maali, M., Bayrak, B., Tunç, E. 2021a. The torsional and shear behavior of steel fiber reinforced rc members. *Architecture Civil Engineering Environ*, 14. <https://doi.org/10.21307/acee-2021-015>.
- Aydın, E. 2012. Isıl işlem görmüş hasarlı artı kesitli çelik basınç elemanlarının FRP ile güçlendirmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 141, Sakarya.
- Aydın, A. C., Bilen, M. B., Maali, M. 2021b. Effect of hydrochloric acid corrosion and cfrp coating on the buckling behavior of cylindrical shells under external pressure. *Scientia Iranica*, <https://doi.org/10.24200/sci.2021.57618.5332>.

- Batikha, M. X., Chen, J. F., Rotter, J. M., Teng, J. G. 2009. Strengthening metallic cylindrical shells against elephant's foot buckling with FRP. *Thin-Walled Structures*, 47, 1078–1091.
- Çinar, M. 2020. Sülfürik asit korozyonuna uğramış ince cidarlı çelik tankların burkulma davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 105, Erzurum.
- Fatemi, S. M., Showkati, H., Maali, M. 2013. Experiments on imperfect cylindrical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 65, 14-25.
- Ghazijahani, G. T., Jiao, H., Holloway, D. 2015. Timber filled CFRP jacketed circular steel tubes under axial compression. *Construction and Building Materials*, 94, 791–799. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07
- Ghazijahani, G. T., Sadighi Dizaji, H., Nozohor, J., Zirakian, T. 2015. Experiments on corrugated thin cylindrical shells under uniform external pressure. *Ocean Engineering*, 106, 68–76. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.06.057
- Golzan, B. S., Showkati, H. 2008. Buckling of thin-walled conical shells under uniform external pressure. *Thin-Walled Structures*, 46, 516–529.
- Jawad, M. H. 1994. *Theory and Design of Plate and Shell Structures*. Chapman & Hall, 438p, UK.
- Kabir, M. Z., Nazari, A. 2012. Experimental and numerical study on the nonlinear response of notched cylinders under compressive loading. *Scientia Iranica*, 19. https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.02.022.
- Khakimova, R., Castro, S. G. P., Wilckens, D., Rohwer, K., Degenhardt, R. 2017. Buckling of axially compressed CFRP cylinders with and without additional lateral load: Experimental and numerical investigation. *Thin-Walled Structures*, 119, 178-189. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.002.
- Korucuk, F. M. A., Maali, M., Kılıç, M., Aydın, A.C. 2019. Experimental analysis of the effect of dent variation on the buckling capacity of thin-walled cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 143, 106259.
- Maali, M., Aydın, A. C., Showkati, H., Sağıroğlu, M., Kılıç, M. 2018a. The effect of longitudinal imperfections on thin-walled conical shells. *Journal of Building Engineering*, 20, 424–441.
- Maali, M., Bayrak, B., Kılıç, M., Sağıroğlu, M., Cüneyt Aydın, A. 2021. Buckling behavior of double-layered composite cylindrical shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104328. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104328.
- Maali, M., Kılıç, M., Yaman, Z., Ağcakoca, E., Aydın, A. C. 2019. Buckling and post-buckling behavior of various dented cylindrical shells using CFRP strips subjected to uniform external pressure: Comparison of theoretical and experimental data. *Thin-Walled Structures*, 137, 29-39. https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.042.

- Niloufari, A., Showkati, H., Maali, M. Fatemi, S. M. 2014. Experimental investigation on the effect of geometric imperfections on the buckling and post-buckling behavior of steel tanks under hydrostatic pressure. *Thin-Walled Structures*, 74, 59–69.
- Özen, K. 2007. Çelik hububat silolarının tasarım esasları. Yüksek lisans tezi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Anabilim Dalı, 170, Konya.
- Ross, C. T. F. 2007. A proposed design chart to predict the inelastic buckling pressures for conical shells under uniform external pressure. *Marine Technology*, 44(2), 77–81.
- Rotter, J. M., 2001. Guide for Economic Design of Circular Metal Silos. Spon Press, 254, London.
- Taraghi, P., Showkati, H., Firouzsalar, S.E. 2019. The performance of steel conical shells reinforced with CFRP laminates subjected to uniform external pressure. *Construction and Building Materials*, 214, 484-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.015>.
- Taraghi, P., Zirakian T. 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., Hu, Y.M. 2007. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression. *Construction and Building Materials*, 21, 827–838. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.016>
- Teng, J.G., Zhao, Y., Lam, L. 2001. Techniques for buckling experiments on steel silo transition junctions. *Thin-Walled Structures*, 39, 685–707.
- Vakili, M., Showkati, H. 2016. Experimental and Numerical Investigation of Elephant Foot Buckling and Retrofitting of Cylindrical Shells by FRP. *Journal of Composites for Construction*, 20(4), 04015087. Doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000640.
- Ventsel, E., Krauthammer, T. 2001. *Thin Plates and Shells: Theory: Analysis, and Applications*. Marcel and Dekker, 688, USA.
- Wagner, H. N. R., Hühne, C., Janssen, M. 2020. Buckling of cylindrical shells under axial compression with loading imperfections: An experimental and numerical campaign on low knockdown factors. *Thin-Walled Structures*, 151, 106764. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106764>.
- Wang, J., Shen, Q., Wang, F., Wang, W. 2018. Experimental and analytical studies on CFRP strengthened circular thin-walled CFST stub columns under eccentric compression. *Thin-Walled Structures*, 127, 102-119. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.01.039>.
- Yang, L., Luo, Y., Qiu, T., Qiu, Y., Zheng, H. 2020. An analytical solution to the buckling of cylindrical shells under arbitrarily distributed axial loads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 187, 104169. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104169>.