



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**DARBE HASARLI FİLAMAN SARGILI
KOMPOZİT YAPI ELEMANLARININ BASMA
KUVVETİ ALTINDAKİ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE
HASAR ANALİZİ**

Zeynep Kübra GÜVEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARBE HASARLI FİLAMAN SARGILI KOMPOZİT YAPI ELEMANLARININ BASMA KUVVETİ ALTINDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE HASAR ANALİZİ

Zeynep Kübra GÜVEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Emrah MADENCİ
Eş Danışman: Doç.Dr. Lokman GEMİ

2021, 119 Sayfa

Jüri

Dr.Öğr. Üyesi Emrah MADENCİ
Prof.Dr. Hicran AÇIKEL
Dr.Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN

Kompozit malzemeler üstün özellikleri sayesinde her sektörde yerini almıştır. Teknolojik ilerlemeler ve artan ihtiyaçlar bu malzemelerden beklentileri de arttırmıştır. Çözüm arayışı içinde bulunan araştırmacılarda gelişime açık bir alan olan kompozit malzemeler üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmanın amacı kompozit malzemenin kullanım öncesinde ya da kullanım sırasında alabileceği darbe hasarlarına karşı yapısında meydana gelen enerji yutma kapasitesi ve eksenel yük kapasitesine etkilerini incelemektir. Yapılan çalışmada filaman sarım yöntemiyle üretilmiş farklı tabaka sayılarında ve elyaf oryantasyon açılarına sahip cam takviyeli polimer (CTP) kompozit silindirik borular kullanılmıştır. 1 m'lik üretilen Ø72 mm iç çapında $[\pm 30^\circ]_k$, $[\pm 45^\circ]_k$, $[\pm 55^\circ]_k$, $[\pm 75^\circ]_k$ ve $[\pm 90^\circ]_k$ elyaf konfigürasyonuna sahip ve 2,4,6 tabakalı filaman sarımlı CTP borular dairesel testereli boru kesme tezgahında deneylere uygun boyutta kesilmiştir. Yakma deneyi ile kullanılan malzemedeki ağırlıkça elyaf-matris oranı belirlenmiştir. ASTM D 7136 standardına göre uygulanan 2 m/s (metre/saniye) hızındaki düşük hızlı darbe deneyi ile numunelerde hasar meydana getirilmiştir. Düşük hızlı darbe deneyinde elde edilen verilerden kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri oluşturularak darbe kuvvetleri, deplasman değişimleri ve yutulan enerji miktarları incelenmiştir. Darbe hasarlı numunelere darbe sonrası basma (CAI) deneyi yapılmıştır. Basma Deneyi ASTM D 7137 standardına göre 4 mm/dak (milimetre/dakika) hızında uygulanmış ve elde edilen verilerden kuvvet-deplasman grafikleri oluşturulmuştur. Darbe hasarsız numunelere de yapılan basma deneyi sonuçlarına göre darbe hasarının mekanik özelliklere etkisi ve yükleme altındaki davranışları gözlenmiştir. Filaman sarım kompozitlerin tabaka sayısı ve sarım açısı incelenen parametrelerdir.

Anahtar Kelimeler: Cam takviyeli polimer (CTP), Düşük hızlı darbe, Darbe sonrası basma (CAI), Hasar davranışı, Filaman sarım

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF FILAMENT WOUND COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS UNDER COMPRESSIVE FORCE WITH IMPACT DAMAGE AND DAMAGE ANALYSIS

Zeynep Kübra GÜVEN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

**Advisor: Asst.Prof. Emrah MADENCİ
Co-visor: Assoc.Prof. Lokman GEMİ**

2021, 119 Pages

**Jury
Asst.Prof. Emrah MADENCİ
Prof.Dr. Hicran AÇIKEL
Asst.Prof. Şakir YAZMAN**

Composite materials have taken their place in every sector thanks to their superior properties. Technological advances and increasing needs have increased expectations from these materials. Researchers in search of solutions have focused on composite materials, which is an area open to development. The aim of this study is to examine the effects of the energy absorption capacity and axial load capacity of the composite material against the impact damage it may receive before or during use. In the study, glass reinforced polymer (GRP) composite cylindrical pipes with different layer numbers and fiber orientation angles produced by filament winding method were used. It has 1 m produced Ø72 mm inner diameter [$\pm 30^\circ$]_k, [$\pm 45^\circ$]_k, [$\pm 55^\circ$]_k, [$\pm 75^\circ$]_k and [$\pm 90^\circ$]_k fiber configurations and has 2, 4, 6-layer filament wound GRP pipes were cut in a suitable size for the experiments on a pipe cutting machine with a circular saw. With the combustion test, the weight of the fiber-matrix ratio in the material used was determined. The samples were damaged by the low speed impact test at 2 m/s (meter/second) speed applied according to ASTM D 7136 standard. The force-time, force-displacement and energy-time graphs were created from the data obtained in the low-speed impact experiment, and the impact forces, displacement changes and the amount of absorbed energy were examined. Post-impact compression (CAI) test was performed on impact-damaged samples. Compression Test was applied at a speed of 4 mm/min (millimeter/minute) according to ASTM D 7137 standard and force-displacement graphs were created from the obtained data. According to the results of the compression test performed on the samples without impact damage, the effect of impact damage on the mechanical properties and their behavior under loading were observed. The number of layers and the winding angle of the filament winding composites are the parameters examined.

Keywords: Damage behavior, Filament winding, Glass reinforced polymer (GRP), Low velocity impact, Post impact compression (CAI)

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmalarımın her aşamasında beni sabırla dinleyip fikirleriyle yolumu aydınlatan tez süreci boyunca gerek deneysel çalışmamda gerekse tez yazımda beni hiç yalnız bırakmayan tez danışmanım Sayın Dr.Öğr. Üyesi Emrah MADENCİ'ye, tez çalışmam boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen ikinci (eş) tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Lokman GEMİ'ye, tezimin laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını eksik etmeyen Sayın Arş.Gör.Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a şükranlarımı sunarım. Numune hazırlama ve deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı Sayın Dr.Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney malzemelerinin temin edilmesi ve deney numunelerinin incelenmesi gibi konularda 191319005 nolu tez projesi ile maddi destek veren Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP) teşekkür ederim.

Her konuda yardım ve destekleriyle yanımda olan arkadaşlarım İnş.Müh. Fatma Nur SÖZÜER'e ve İnş.Müh. Remziye CAN'a teşekkür ederim. Son olarak, hayatım boyunca bana destek olan, hiçbir koşulda desteklerini esirgemeyen ve benim her zaman yanımda olan babam Mehmet Nuri GÜVEN'e, annem Cemile GÜVEN'e, kardeşlerim Furkan GÜVEN ve Muhammet Nurullah GÜVEN'e saygı ve sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Zeynep Kübra GÜVEN
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Kompozit Malzemeler.....	4
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler.....	5
2.2.2. Polimer matrisli kompozitler.....	6
2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	7
2.3.1. Filaman sarım yöntemi.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Filaman Sarım CTP Boruların Üretimi.....	14
3.2. Dene Numunelerinin Hazırlanması.....	15
3.3. Yakma Deneyi.....	16
3.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi.....	19
3.5. CTP Borularının Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Belirlenmesi.....	21
3.5.1. Kuvvet-zaman (F-t) grafiği.....	21
3.5.2. Kuvvet-çökme (F-d) grafiği.....	22
3.5.3. Enerji-zaman (E-t) grafiği.....	23
3.6. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Oluşan Hasar Modları.....	25
3.6.1. Matris hasarı.....	26
3.6.2. Delaminasyon.....	27
3.6.3. Elyaf hasarı.....	28
3.6.4. Nüfuziyet.....	28
3.7. Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI).....	28
3.8. Eksenel Basma Deneyi Sonrası Hasar Modları.....	30
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Yakma Deneyi Sonuçları.....	33

4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları	34
4.2.1. Numunenin hasar davranışına tabaka sayısının etkisi	37
4.3. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI) Sonuçları	56
4.3.1. Darbe hasarı almamış numunelere ait basma deneyi sonuçları	56
4.3.2. Darbe hasarı almış numunelere ait basma deneyi sonuçları	82
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	109
5.1. Sonuçlar	109
5.2. Öneriler	112
KAYNAKLAR	113



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_a	Absorbe edilen enerji
E_{a-t}	Absorbe edilen enerji-zaman eğrileri
σ	Çekme dayanımı
E_i	Darbe enerjisi
E	Elastisite modülü
$F-d$	Kuvvet-çökme eğrileri
$F-t$	Kuvvet-zaman eğrileri
σ/ρ	Özgül dayanım
E/ρ	Özgül modül
ρ	Yoğunluk

Kısaltmalar

GFRP	Cam fiber takviyeli polimer
CTP	Cam takviyeli polimer
CAI	Darbe sonrası basma
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
RTM	Reçine transfer metodu
SMC	Hazır kalıplama pestili

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Filaman sarım makinesi (Gemi, 2004).....	8
Şekil 3.1. Filaman sarım yöntemiyle üretilen 1 m'lik CTP borular	15
Şekil 3.2. Kesim işlemi yapılan tezgâh.....	15
Şekil 3.3. Deneyler için hazırlanmış numuneler a) yakma deneyi numuneleri b) darbe ve basma deneyi numuneleri	16
Şekil 3.4. Yakma deneyinin yapıldığı fırın.....	17
Şekil 3.5. Yakma testi (a) öncesi ve (b) sonrası numuneler	17
Şekil 3.6. Yakma deneyinden önce ve sonra numune ağırlıkları a) $[\pm 30^\circ]$ numunesi .. b) $[\pm 45^\circ]$ numunesi c) $[\pm 55^\circ]$ numunesi d) $[\pm 75^\circ]$ numunesi e) $[\pm 90^\circ]$ numunesi	18
Şekil 3.7. Düşük hızlı darbe deney cihazı	20
Şekil 3.8. Düşük hızlı darbe deney cihazı ve veri toplama ünitesi.....	20
Şekil 3.9. Düşük hızlı darbe deneyi uygulanacak numuneler.....	21
Şekil 3.10. Kuvvet-zaman grafiği (F-t) (Sayer, 2009).....	22
Şekil 3.11. Kuvvet-çökme grafiği (F-d) (Sayer, 2009).....	22
Şekil 3.12. Enerji-zaman grafiği (E-t) (Sayer, 2009)	24
Şekil 3.13. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşabilecek hasarlar (Kara, 2006)	26
Şekil 3.14. Matris çatlaması a) çekme çatlağı b) kayma çatlağı (Abrate, 1998)	26
Şekil 3.15. Matris çatlakları a) çam ağacı b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasarlar (Kara, 2012a).....	27
Şekil 3.16. Delaminasyonun elyaf açılına göre oluşumu (Abrate, 1998).....	28
Şekil 3.17. Basma deneyi	29
Şekil 3.18. Basma deneyi öncesi darbe hasarlı ve hasarsız numuneler	30
Şekil 3.19. Kompozit malzemelerdeki kırılma modları 1) genel burkulma 2) bölgesel burkulma 3) kırılma 4) ilerleyen kırılma (Lau ve ark., 2012).....	30
Şekil 3.20. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları (Lau ve ark., 2012)	31
Şekil 3.21. Silindirik veya kare profillerde oluşabilecek hasar modları (Lau ve ark., 2012)	32
Şekil 4.1. Farklı sarım açılarının sahip a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı CTP kompozit boruların darbe sonrası hasarlı iç/dış görünüşleri.....	36
Şekil 4.2. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı $(\pm 30^\circ)$, $(\pm 45^\circ)$, $(\pm 55^\circ)$, $(\pm 75^\circ)$, $(\pm 90^\circ)$ elyaf sarım açısına sahip numunelerin zamana göre temas kuvvetindeki değişimi gösteren grafikler	39
Şekil 4.3. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde maksimum darbe kuvvetlerini gösteren sütun grafiği	41
Şekil 4.4. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren temas kuvveti-zaman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$	43
Şekil 4.5. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı $(\pm 30^\circ)$, $(\pm 45^\circ)$, $(\pm 55^\circ)$, $(\pm 75^\circ)$, $(\pm 90^\circ)$ elyaf sarım açısına sahip numunelerin temas kuvveti-deplasman grafikleri.....	45
Şekil 4.6. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde maksimum deplasmanları gösteren sütun grafiği	47
Şekil 4.7. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren temas kuvveti-deplasman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$	50
Şekil 4.8. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı $(\pm 30^\circ)$, $(\pm 45^\circ)$, $(\pm 55^\circ)$, $(\pm 75^\circ)$, $(\pm 90^\circ)$ elyaf sarım açısına sahip numunelerin enerji-zaman grafikleri.....	52

Şekil 4.9. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde yutulan enerji miktarlarını gösteren sütun grafiği.....	53
Şekil 4.10. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren enerji-zaman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$	56
Şekil 4.11. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.....	58
Şekil 4.12. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarları.....	59
Şekil 4.13. 2 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	59
Şekil 4.14. 2 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	60
Şekil 4.15. 2 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	61
Şekil 4.16. 2 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	61
Şekil 4.17. 2 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	62
Şekil 4.18. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.....	63
Şekil 4.19. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı.....	64
Şekil 4.20. 4 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	64
Şekil 4.21. 4 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	65
Şekil 4.22. 4 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	66
Şekil 4.23. 4 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	66
Şekil 4.24. 4 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	67
Şekil 4.25. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.....	68
Şekil 4.26. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı.....	69
Şekil 4.27. 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) Deney öncesi ve b) deney sonrası.....	69
Şekil 4.28. 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	70
Şekil 4.29. 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	71
Şekil 4.30. 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	71
Şekil 4.31. 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	72
Şekil 4.32. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği.....	73

Şekil 4.33. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	74
Şekil 4.34. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	75
Şekil 4.35. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	76
Şekil 4.36. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	77
Şekil 4.37. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	78
Şekil 4.38. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	79
Şekil 4.39. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	80
Şekil 4.40. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	81
Şekil 4.41. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	82
Şekil 4.42. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	84
Şekil 4.43. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı.....	85
Şekil 4.44. 2 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	85
Şekil 4.45. 2 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	86
Şekil 4.46. 2 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	87
Şekil 4.47. 2 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	87
Şekil 4.48. 2 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	88
Şekil 4.49. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	89
Şekil 4.50. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı.....	90
Şekil 4.51. 4 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	90
Şekil 4.52. 4 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	91
Şekil 4.53. 4 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	92
Şekil 4.54. 4 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	93
Şekil 4.55. 4 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	93
Şekil 4.56. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	94
Şekil 4.57. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı.....	95

Şekil 4.58. 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	96
Şekil 4.59. 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	96
Şekil 4.60. 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	97
Şekil 4.61. 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	98
Şekil 4.62. 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası.....	98
Şekil 4.63. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	99
Şekil 4.64. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	100
Şekil 4.65. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	101
Şekil 4.66. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	102
Şekil 4.67. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	103
Şekil 4.68. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	104
Şekil 4.69. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	105
Şekil 4.70. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	106
Şekil 4.71. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği	107
Şekil 4.72. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. E camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San. A.Ş. 2011, AKSA Karbon Elyaf San. A.Ş. 2011)	6
Çizelge 3.1. Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri	14
Çizelge 4.1 Yakma deneyi öncesi-sonrası tartım sonuçları.....	33
Çizelge 4.2 Düşük hızlı darbe sonrası elde edilen veriler	37
Çizelge 4.3. Darbe hasarsız CTP borularına uygulanan basma deneyinde elde edilen veriler	57
Çizelge 4.4. Darbe hasarlı CTP borularına uygulanan basma deneyinde elde edilen veriler	83



1. GİRİŞ

Yapıyı oluşturan malzemelerde hafiflik, esneklik, rijitlik, istenen tasarıma uygun ve çevre şartlarına dayanıklılık gibi özellikler aranır. Ayrıca bu malzemelerin yorulma, eğilme, çekme, basma gibi mekanik özellikleri de önemlidir. İstenilen özelliklerin tek bir malzemede bir arada bulunmaması bilimsel çalışmaları bu sorunu çözmeye yönelik olarak yönlendirmiştir. Arayışlar neticesinde yapı teknolojisinde ve tasarım uygulamalarında kompozit malzemeler çözüm olarak görülmüştür. İki ya da daha fazla malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla bir araya getirilmesiyle kompozit malzemeler meydana gelmiştir. 20. yüzyılın ortalarından itibaren mevcut malzemelerin ihtiyaçları karşılayamamasıyla hayatımıza giren ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi devam eden kompozit malzemelerden birçok alanda faydalanılmaktadır (Kaw, 2005). Kompozit malzemeler başta havacılık, uzay, savunma ve askeri donanımlar olmak üzere yapı sektöründe, ev aletleri ve iş ekipmanlarında, spor ve eğlence araç ve gereçlerinde, elektrik-elektronik malzemelerinde, denizcilik, taşımacılık ve otomotiv sanayisinde kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler sahip oldukları mükemmel karakteristik özelliklerinden dolayı geleneksel malzemelere göre daha avantajlıdır. Bu karakteristik özellikler “mukavemet/ağırlık oranlarının yüksek olmaları, korozyona karşı dayanıklılık göstermeleri, yüksek rijitlik göstermeleri, ısı ve ses yalıtımı sağlamaları, metal yorgunluğu sürelerinin uzun olması, hafiflik ve seri üretim yapılabilmesi olarak sıralanabilir (Jones, 1998).

Kompozit malzemelerde istenen özelliklerin hepsi bir arada bulunmaz. Ancak kullanım alanlarına göre özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilir. Zamanla üretim şekillerinin değişmesi de mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemiştir. Kompozitlerin üretiminde birçok yöntem uygulanmaktadır. El yatırma, püskürtme, sürekli kalıplama, elyaf sarma, santrifüj kalıplama, torba ile kalıplama ve kapalı döküm yöntemi en çok kullanılan yöntemlerdir (Mallick, 2007).

Filaman sarım yöntemi, silindirik kompozit üretmek için en uygun otomatik üretim yöntemidir. Kompozit malzemeler dönen mandrel (kalıp) üzerinde elyafın sürekli sarılmasıyla meydana getirilir. Filaman sarımlı kompozit yapılar, helislere sarılan simetrik $+\phi$ ve $-\phi$ açılı, anti simetrik $\pm \phi$ açılı laminatlar ve eksenel simetrik ince tabakalardan oluşur (Uddin ve ark., 2014). Günümüzde filaman sarım yöntemiyle kompozit malzemelerin üretiminde cam, karbon ve bazalt gibi elyaflar kullanılmaktadır.

Bunlar arasında kompozit yapıya en iyi mekanik özellik kazandıran karbon elyafıdır. Ancak iyi mekanik özelliklere sahip olsalar da üretim maliyetleri çok yüksektir. Bu sebeple daha çok üstün özellik gerektiren helikopter, otomotiv, denizcilikte kullanılan tahrik milleri, tıbbi malzemeler gibi alanlarda tercih edilirler. Cam elyaflar düşük maliyet, yüksek mukavemet ve kimyasal direnç gibi özelliklerinden dolayı kullanımı daha yaygındır (Davim ve ark., 2004; Nunes ve ark., 2016).

Filaman sargılı kompozit borular en çok inşaat, altyapı, petrol ve gaz endüstrisi gibi sektörlerde kullanılmaktadır (Hollaway, 2010). Cam takviyeli polimer (CTP) borular; yüksek mukavemet, korozyon direnci, termal dayanım, kimyasallara dayanım ve hafiflik özelliklerine sahiptir (Rafiee ve Habibagahi, 2018). Literatürde filaman sarım CTP boruların iç basınca karşı dirençleri konusunda çok sayıda çalışma vardır (Bai ve ark., 1997; Xia ve ark., 2001; Xing ve ark., 2015). Aynı zamanda, saf eksenel çekme yüklemesi ve kombine çift eksenli yükleme altında benzer borular üzerinde de çalışmalar yapılmıştır (Mertiny ve ark., 2004; Vickers, 2017). Ancak, filaman sarım CTP boruların darbe hasarı sonrası eksenel basınç yükü altında davranışına ilişkin çalışmalar oldukça azdır. Yapısal özellikleri, özellikle de açılı kat yapısından kaynaklanan doğrusal olmayan davranış, hala tam olarak tanımlanmamakta veya anlaşılmamaktadır.

Hizmet ömürleri boyunca, kompozitlerin çeşitli darbe yükleme koşullarına maruz kalması muhtemeldir. Örneğin, nakliye sırasında yabancı bir nesne çarpabilir, bakım işlemleri sırasında bir alet kompozitlerin üzerine düşebilir ve enkaz, parça veya mermilerin çarpması kompozit yapıları etkileyebilir. Bu tesadüfi etkilerin bir sonucu olarak kompozit yapılarda matris çatlaması, delaminasyon, debonding ve fiber kırılması gibi hasarlar meydana gelebilmekte ve tüm yapının mukavemeti, tokluğu ve stabilitesi önemli ölçüde azalmaktadır (Jefferson Andrew ve ark., 2015). Kompozit borulardaki hasar oluşumları genellikle çıplak gözle görülmez ve bu da mukavemetin düşmesine neden olur. Daha da önemlisi, bu hasarlar ilerleyebilir ve nihayetinde sızıntı hasarına yol açabilir. Tasarım aşamasında, kompozit borular, mükemmel darbe tepkisi elde edecek şekilde en iyi istifleme sırasını elde edecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu nedenle kompozit borular üzerinde düşük hızlı darbe nedeniyle oluşabilecek darbe hasar modlarının belirlenmesi gerekmektedir. Fiber takviyeli kompozitler de düşük hızlı darbe etkisi birçok deneysel ve analitik araştırmanın konusu olmuştur. Bazı araştırmacılar, düşük hızlı darbeden sonra hasar toleransını ve artık mukavemeti tahmin etmek için çarpma sonrası basma (CAI) ve diğer statik testleri kullanmıştır (Liu ve ark., 1998).

Bu çalışma kapsamında sarım açıları, tabaka sayıları, çap/kalınlık oranı, değişen dış kuvvet gibi parametreler göz önünde bulundurularak filaman sarım CTP borularının darbe öncesi ve darbe sonrası basınç (CAI) etkisi altında mekanik ve fiziksel değişimleri incelendi. Araştırma için $\text{Ø}72$ mm iç çaplı $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip 2,4 ve 6 tabakalı filaman sarım CTP borular üretildi. Üretilen CTP borularına 2 m/s hızında düşük hızlı darbe deneyi yapıldı. Darbe deneyi sonucu elde edilen verilerden kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve absorbe edilen enerji-zaman grafikleri oluşturuldu. Darbe hasar analizi yapıldı. Sonrasında darbe hasarı almış numunelere darbe sonrası basma deneyi yapıldı ve sonuçlar darbe hasarsız numunelerin sonuçları ile kıyaslandı.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet-ağırlık ve sertlik-ağırlık oranlarının gerekli olduğu yapısal uygulamalar için idealdir. Uçak ve uzay aracı, kompozit malzemelerin maliyet etkin olduğu tipik ağırlığa duyarlı yapılardır. Kompozit malzemelerin kullanımı ile diğer malzemelere oranla birçok avantaj sağlanmaktadır. Yapı tasarımında temel esas en az kaynak ile en iyi tasarımın yapılmasıdır. Kompozitin karakteristik özellikleri de bu amaca oldukça uygundur. Kompozitlerin; hafif olması ve yüksek mukavemete sahip olması özellikleri kolay tasarım yapılabilmesini sağlamaktadır. Ugradıkları deformasyonun daha az ve yük taşıma kapasitelerinin daha fazla olması kompozitlere gün geçtikçe önem kazandırmaktadır (Madenci, 2011; 2016).

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzeme, matris ve takviye elemanından oluşmaktadır. Matris malzemesinin görevi gelen yükü takviye elemanına (elyaflara) göndermek ve yapıyı bir arada tutmaktır. Takviye elemanı ise mukavemeti sağlar ve iletilen yükü taşır (Reddy, 2004). Matris malzeme ve takviye elemanı olan elyaflar bir araya geldiklerinde daha mukavemetli ve rijitliği yüksek bir yapı meydana getirirler. Kompozit malzemeler, matris malzemesine ve takviye elemanına göre ikiye ayrılırlar. Bunlar;

Takviye elemanına göre;

- Elyaf Takviyeli
- Partikül (Parçacık) Takviyeli
- Tabakalı (Lamine)
- Karma (Hibrit)

Matris malzemesine göre;

- Polimer Matrisli
- Metal Matrisli
- Seramik Matrisli

2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf (fiber) takviyeli polimer kompozitler (FRP), matris yapının özelliklerini iyileştirmek ve malzemeye mukavemet sağlamak için dayanımı yüksek, korozyona dirençli elyafların takviyesiyle oluşan kompozit malzemelerdir. Matris malzemesini polimer matrisli reçineler oluşturur. Takviye elemanını da elyaflar oluşturur. Yüke karşı dayanım gösteren ana yapı elyaflardır. Matris yapı elyafları bir arada tutar ve gelen yükü elyaflara iletir. Elyafın mekanik özellikleri, uzunluğu, matris içerisindeki yönelme şekli, elyaf-matris ara yüzey özellikleri kompozitin performansını etkileyen unsurlardır (Özütok ve Madenci, 2013). Elyafın matris içinde birbirine paralel şekilde yönelmeleri dik doğrultudaki kuvvetlere karşı oldukça düşük mukavemet sağlar (Özütok ve Madenci, 2017). Ancak matris içerisinde birbirlerine dik doğrultuda yönelirlerse mukavemet eşit olarak dağılır. Elyaf miktarı da mukavemet sağlamakta oldukça önemlidir. Matris yapıdaki elyafın artması belli bir orana kadar mukavemeti artırırken bu oranın daha fazla artışı matris malzeme yetersizliğine dayalı olarak mukavemeti azaltıcı yönden etki eder. Bunun sebebi, elyaf-matris ara yüz etkileşiminin yetersizliğidir (Saçak, 2002).

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan elyaf türleri şunlardır;

- Cam elyafı
- Karbon elyafı
- Bor elyafı
- Aramid (Kevlar) elyafı

Bu tez çalışmasında filaman sarım CTP borular kullanılması sebebiyle sadece cam elyaflar hakkında bilgi verilecektir.

Cam elyaf:

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde, yüksek çekme mukavemetine sahip olmaları, düşük fiyatlı olmaları, kimyasal malzemelere karşı dirençli olmaları, elektriği iletmemeleri ve ısı dirençlerinin düşük olması özelliklerinden dolayı en yaygın kullanılan takviye elemanı cam elyaftır (Sayer, 2009).

Cam elyaf, eritilmiş camın, dibinde ufak deliklerin olduğu ocaktan geçirilmesiyle üretilir. Bu elyaflar soğuduktan sonra makaralara sarılır ve böylece kompozit hammaddelerinden cam elyaf elde edilmiş olur. Üretim sonrasında silis kumuna farklı

katkı malzemelerinin eklenmesiyle farklı tipte cam elyaflar elde edilir. Cam elyafların 1930'lu yıllarda ticari üretimine İngiltere'de başlanmıştır. Başlangıçta A-Camı kullanılmış sonrasında bunu E-Camının kullanımı takip etmiştir (Rosato ve Rosato, 2004). E-Camı en çok kullanılan elyafların başında gelmektedir. Bu tip camın elektrik yalıtkanlığı, mukavemet değeri, suya ve neme karşı dayanımları yüksektir. Çizelge 2.1'de E-cam elyafların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. E camı elyaflarının özellikleri (Cam Elyaf San. A.Ş. 2011, AKSA Karbon Elyaf San. A.Ş. 2011)

Özellikler	E camı
Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	2.6
Elastiklik modülü, E (GPa)	73
Çekme dayanımı, σ (GPa)	2.4
Çekme uzaması, (%)	4
Özgül modül, E/ ρ (MN/m)	28
Özgül dayanım, σ/ρ (MN/m/kg)	0.93

2.2.2. Polimer matrisli kompozitler

Matris malzeme, kompoziti oluşturan ana malzemelerdir. Matris; takviye elemanlarını (elyaf) bir arada tutar, malzemeye gelen yükü elyaflara iletir ve çevresel etkilere karşı malzemeyi korur. Elyaflarda oluşacak kopma ve çatlama en aza indirilerek tokluğu arttırmaktadır. Matris malzemenin özellikleri, kompozit malzemenin kazanacağı mekanik özellikleri bakımından büyük öneme sahiptir. Matrislerin yoğunluğu, rijitliği ve mukavemeti elyaflara göre daha düşük olduğu için elyaf takviyesiyle güçlendirilirler. Kompozit tasarımında bu özelliklere dikkat edilmelidir (Gemi, 2014). Kompozitler kullanılan matris malzemesine göre 3 tip sınıfta incelenmektedir. Bunlar; polimer matrisler, metal matrisler ve seramik matrislerdir.

Günümüzde kompozit malzeme olarak en çok tercih edilenlerin başında polimer esaslı kompozit malzemeler gelmektedir. Bunun sebebi, büyük boyutlu ve karmaşık yapıdaki parçaların üretimdeki kolaylığı, üretiminin ucuz oluşu ve üstün dayanım performansındır (Sönmez, 2009). Polimer matrisli kompozitler ikiye ayrılmaktadır. Bunlar; termoset ve termoplastik matrisli kompozitlerdir.

2.2.3. Termoset matrisler

Kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan termoset matrislerdir. Çünkü bu malzemelerle düşük maliyetle yüksek performans ürünleri elde edilmektedir. İnşaat, otomotiv sektörlerinde; deniz ürünleri, depo, boru, mobilya ve tank gibi malzemelerin üretiminde üstün özelliklerinden dolayı kullanılırlar (Akın, 2018). Termoset reçineler normalde sıvı halde bulunurlar. Isıtılarak ya da kimyasal tepkimelerle sağlam bir yapıya ulaşırlar ve bir daha ısı yoluyla eski hallerine döndürülemezler. Bu sebeple depolanırken dondurulurlar (Şahin, 2000).

Termosetlerde matris malzemesi olarak silikon, epoksi reçine, fenolik reçine ve polyester tercih edilmektedirler. Kullanılan reçinenin mekanik özellikleri oluşturulacak kompozit malzemenin de mekanik özelliklerini etkiler. Bunun için kullanılacak reçine özellikleri dikkate alınmalıdır. Epoksi, metaller, cam, porselen, taş, beton, lastik, doğal organik maddeler ve plastikler gibi malzemelerle ile kolaylıkla yapışabildikleri için kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılan bir reçine türüdür (Akın, 2018). Mekanik ve termal özellikleri gayet iyidir. Islak halde 140°C, kuru halde 220°C'ye kadar ısı dayanımına sahiptir. Yağa, suya, kimyasallara karşı direnci yüksektir. Aşınmaya ve sürtünmeye dirençli malzemeler meydana getirirler. Epoksi, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme üretiminde en çok tercih edilen reçine türüdür.

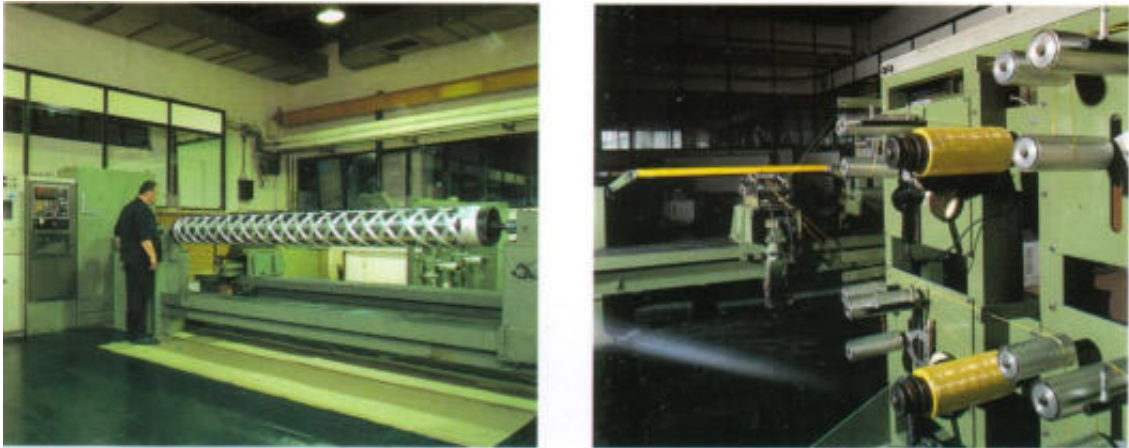
2.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren bileşenlerin özelliklerine, kompozit malzemenin tasarımına, teknik detaylarına, üretilecek malzemenin boyutlarına ve kullanım amacına uygun olarak birçok yöntemle üretilmektedir (Sinha, 2006). İmalat sektöründeki ürün çeşitliliğinin artması karmaşık ve üstün mekanik özelliklerin sağlanması amacıyla farklı üretim yöntemlerini meydana getirmiştir. Bunlar; elle yatırma, püskürtme, filaman sarım, reçine transfer kalıplama RTM/ reçine enjeksiyonu, profil çekme, hazır kalıplama, hazır kalıplama pestili (SMC), hazır kalıplama hamuru, vakumlama ve otoklav yöntemleridir (Arcasoy, 2006).

Bu tez çalışmasında filaman sarım yöntemi ile CTP kompozit boru üretimi yapıldı. Bu sebeple sadece filaman sarım yöntemi hakkında bilgi verilecektir.

2.3.1. Filaman sarım yöntemi

Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinden biri olan filaman sarım, mühendislikte yüksek dayanım ve hafiflik gerektiren sistemlerde kullanılmaktadır. Üretimi daha kolaydır ve döner bir mandrel (kalıp) üzerine birleşik dairesel tasarımlı yüksek mekanik özellikli ürünleri meydana getirmek için kullanılan yöntemdir (Pehlivan, 2017). Silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tankları, sıvı ve gaz yakıtların iletiminde kullanılan boru hatlarının üretiminde kullanılır. Filaman sarım makineleri genellikle bilgisayarla kontrol edilen döner mandrel üzerinde kompozit üretimini sağlar (Şekil 2.1). Mandreller üzerine sürekli elyafların sarılmasıyla içi boş dairesel kompozit ürünler istenilen hızda, kalınlıkta ve sarım açısında üretilirler. Takviye malzemesinin sarım açıları, mandrel boyuna doğru 25° gibi düşük açıdan başlayarak mandrel eksenine dik açığa kadar ulaşabilir. Sarım işlemi ıslak ve kuru sarım olmak üzere iki farklı yolla yapılır. Islak sarımda, üretim sırasında takviye malzemesi, matris malzemesi ile ıslatılarak kalıp üzerine sarılırken; kuru sarımda üretim öncesi matris malzeme emdirilen takviye malzemesi kalıba sarıldıktan sonra kürlenmesi ile meydana getirilir. Kullanılan matris malzemesi genellikle epoksi, polyester ve vinilester malzemeleridir.



Şekil 2.1. Filaman sarım makinesi (Gemi, 2004)

Islak sarım ile üretimde reçine düşük viskoziteye sahip olmalıdır. Bu sebeple üretimde sıcaklık, dikkate alınması gereken birincil etkidir. Bir diğeri ise takviye malzemesinin gerginliğidir. Gerginliğin fazla olması takviye malzemesinin matris malzemesini emme oranında azalmaya, takviye malzemesinin oranında artışa neden

olmaktadır. Bunun sonucunda sertliği artan kompozit malzemede elyaf-ara yüz oranı istenen miktarda oluşmaması sebebiyle matris ve elyaf arasındaki yük aktarımı yeterli olmamaktadır. Gerginliğin az olması neticesinde matris malzemenin takviye malzemeye orantısız dağılmasıyla homojen olmayan bir kompozit oluşur. Bu da matris-elyaf oranının düşmesine ve beklenen mekanik özelliklerin görülememesine neden olur (Akdemir, 1992).

Literatürdeki araştırmaların birçoğu performansından dolayı cam, karbon ve bazalt elyaflarının üzerine yapılmıştır. Bu üç elyaftan hibrit olarak oluşturulan boruların üzerinde düşük hızlı darbe, patlama gibi deneyler yaparak mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmişlerdir. Gemi ve ark. (2016), ($\pm 55^\circ$) sarım açısına sahip cam/karbon hibrit kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı iç basınçla ön gerilme oluşturulan numunelere sonrasında 5, 10, 15 ve 20 J darbe enerjisi uygulamışlardır. Araştırmalarının neticesinde artan iç basıncın numunedeki darbe hasarını azalttığını görmüşlerdir. Hibrit kompozit boruların patlama mukavemeti de oldukça yüksek bir değer çıkmıştır. Farhood ve ark. (2018), karbon/ bazalt hibrit kompozit borularda 50 J ve 100 J darbe enerjisi ile gerçekleştirdikleri çalışmada istifleme sırası ve elyaf içeriği oranı parametrelerini incelemişlerdir. Bazalt elyafın dışa geldiği numunelerde darbe dayanımının arttığı görülmüştür. Xiao ve ark. (2020), karbon, cam, bazalt elyaflarından oluşan referans ve hibrit boru numunelerinde araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. [$\pm 25_4/90_2$] sarım açılı kompozit borular darbe yüklemesiyle delaminasyon ve elyaf kırılma hasarı almıştır. İncelenen dört farklı tipteki kompozit borulardan en iyi darbe direncini CTP borular göstermiştir.

Kompozit boruların çeşitli elyaflarla ve yöntemlerle üretilebilmesi optimum tasarıma ulaşmak amacıyla farklı çalışmalara kapı aralamıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan elyafın mekanik özelliklerinin ve filaman sarım yönteminin kompozit yapıya etkisi üzerinde durulmuştur. Soykok ve ark. (2019), pre-preg ve filaman sarım yöntemi ile üretilmiş silindirik numuneler arasında kıyaslama yapmışlardır. Pre-preg numuneler [0,90], filaman sarım numuneler [$\pm 30^\circ$], [$\pm 45^\circ$], [$\pm 60^\circ$] ve [$\pm 75^\circ$] açılarında cam-epoksiden üretilmiştir. Burulma yüküne maruz bırakılan numuneler aynı zamanda sonlu eleman yöntemi analizi ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Burulmaya karşı prepreg kompozitin zayıf olduğu ve en iyi performansı [$\pm 45^\circ$] sarım açısına sahip filaman kompozitin sağladığını belirtmişlerdir. Supian ve ark. (2020), [$\pm 30^\circ$], [$\pm 45^\circ$] ve [$\pm 70^\circ$] sarım açısında üretilen kenaf/cam hibrit ve CTP borular üzerinde çalışmışlardır. Çarpma dayanımının yarı statik basma kuvveti altında etkisi gözlenmiştir. Yerel burkulma, tabaka

ayrılması ve elyaf kırılması hasarlarını gözlemlemişlerdir. Deneylere göre CTP boruların taşıma kapasitesinin ve enerji absorpsiyonunun kenaf/ cam hibrit kompozit borulara göre daha başarısız olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Yozgat (2019), ($\pm 55^\circ$) bazalt elyaf takviyeli filaman kompozit borularla çalışmıştır. Borulara İçi boş, içi yağ dolu basınçlandırılmamış (0 bar) ve içi yağ ile basınçlandırılmış (5 bar) 3 farklı kompozit boruya 15J, 20J ve 25J darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyi yapmıştır. Darbe enerjisindeki artışın; tüm kompozit boruların maksimum temas kuvvetini, temas süresini, deplasman değerlerini ve maksimum yutulan enerji değerlerini attırdığını ve kompozit borulardaki darbe hasarını arttırdığını bulmuştur. Aynı enerji seviyesindeki 3 farklı numuneden 5 bar iç basınçlandırmanın kompozit tabakaları eğilmeye karşı direncini arttırdığını ve basınçlandırmanın hasar oluşumunu azalttığını tespit etmiştir.

CTP boruların kullanımındaki artışa bağlı olarak artan talep araştırmacıları farklı yöntem ve içeriklerdeki üretimin etkisini analiz etmeye yönlendirmiştir. Literatürdeki bazı araştırmalar deniz suyunun CTP boruların darbe davranışını etkilediğini göstermiştir. Deniz ve Karakuzu (2012), filaman sarım [$\pm 55^\circ$]₃ açısına sahip farklı çaplardaki CTP boruları 3, 6, 9 ve 12 ay deniz suyunda bekletmişlerdir. Deniz suyu emdirilen ve emdirilmeyen boruların 15, 20 ve 25 J darbe enerjilerindeki hasar sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hawa ve ark. (2016), önceki çalışmayla aynı sarım açısına sahip CTP boruya musluk suyunun etkisini araştırmışlardır. 80°C 500, 1000 ve 1500 saat aralıklarında musluk suyuna bırakılan numuneler 5, 7.5 ve 10 J darbe yüküne ardından da monotonik patlama deneyine maruz bırakılmıştır. Sonuçlar darbe enerjisi artışında numunelerdeki temas kuvvetini ve yer değiştirmeyi arttırdığı yönündedir. Ayrıca bu etkiler patlama mukavemetini de düşürdüğünü belirtmişlerdir. Arat (2017), yaptığı çalışmada farklı ortam sıcaklıklarında filaman sarım [$\pm 55^\circ$]₃ CTP borularındaki darbe hasar gelişimine etkisini incelemiştir. Düşük hızlı darbe deneyleri 5, 7.5 ve 10 J enerji seviyelerinde yapılmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre artan darbe enerjisiyle birlikte temas kuvveti, yer değiştirme miktarı ve vurucunun temas süresini arttırdığını verdiği grafiklerle sunmuştur. Kriyojenik oda koşullarında malzemelerin daha rijit davrandığını bu sebeple en uygun sıcaklığın +22°C değeri olduğu anlaşılmıştır.

Kompozit boruların mekanik özelliklerinin tahmininde malzeme kombinasyonu ve geometrik özellikleri önemli olan faktörlerdendir. Araştırmacılar, değişen çap ve sarım açısı gibi parametrelere dayalı çalışmalar yürütmüşlerdir. Rafiee ve Amini (2015), iç basınç altında CTP boruların hasar basıncını gözlemlemişlerdir. Çalışmayı 52.5°, 57.5° ve 60.19° sarım açısında beş farklı elyaf hacmine sahip borularda gerçekleştirmişlerdir.

Elde edilen sonuçlar değişen parametrelere göre değerlendirildiğinde elyaf hacmindeki artışın hasar basıncını azalttığı görülmüştür. Krishnan ve ark. (2015), 8 tabakalı $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 63^\circ$ filaman sarım CTP boruların çok eksenli döngüsel yükleme altındaki davranışını incelemişlerdir. Sonuçlara göre farklı sarım açılarından her birinin uygun olduğu yüklemenin bulunduğu ifade edilmiştir. Saf hidrostatik yüklemde $\pm 55^\circ$, çemberden eksenel yüklemeye $\pm 45^\circ$, dörtlü çember eksenel yüklemeye $\pm 63^\circ$ sarım açılı numunelerin uygun olduğu ve kırılma modlarının sarım açısına göre değiştiği görülmüştür. Ortenzi ve ark. (2017), $\pm 50^\circ$, $\pm 52.5^\circ$ ve $\pm 55^\circ$ sarım açılı filaman CTP borularında çekme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Değişen sarım açısının etkisi ve Sonlu Eleman Modellemesi ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelleme ve deney sonuçları birbirine yakın çıktığı ifade edilmiştir. Betts ve ark. (2019), 76 mm ve 203 mm çaplı $\pm 55^\circ$ filaman sarım CTP borularının farklı basınç değerlerindeki enine basma ve çekme yükü altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Numunelerin enine basma yükü altında daha fazla mukavemete sahip olduğu görülmüştür. Yine $\pm 55^\circ$ filaman sarım CTP borularında Betts ve ark. (2021) dört noktalı basma deneylerini yapmıştır. Borular; 76 ve 203 mm iç çaplı, boru kalınlığı 1.7 ve 6.7 mm arasında değişmektedir. Deney sonuçları çap ve basınç değerindeki artışın boruların moment kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Dil (2016), 40 kat sarımlı $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ sarım açılı CTP boruların sarım açısının etkisini incelemiştir. Numunelere yanal basma deneyi uygulamış ve sonuç olarak sarım açısının mukavemeti arttırdığını ancak sünekliğini azalttığını belirtmiştir.

CTP kompozit borular, enine darbeye karşı zayıftır. Borular üretim, montaj ve hizmet aşamalarında malzemeye zarar verip mekanik özelliklerini etkileyecek darbeler alabilirler. Böyle bir durumda hasar gözle görülemeyebilir. Aynı zamanda darbe enerji miktarı, boruların boyutları, boruların sarım açıları gibi etkenler CTP kompozit borularının darbe davranışını değiştirir (Deniz ve ark., 2013). Literatürde CTP borularının darbe davranışını inceleyen birçok araştırma bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda, malzeme kombinasyonu, korozyon direnci, fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle genellikle $\pm 55^\circ$ filaman sarımlı CTP borular tercih edilmiştir (Harris ve ark., 2020).

Uyaner ve ark. (2014), $\pm 55^\circ$ filaman sarımlı CTP borularda 5J ve 10 J enerji değerlerinde darbe deneyi yapmışlardır. Deney sonucunda elde edilen verilerden oluşturulmuş kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman grafiklerinden enerji absorpsiyonu hakkında yorumlar yapmışlardır. Darbe hasarlı ve hasarsız numuneleri iç basınç yorulma ve patlama deneyleri ile darbenin hasar gelişimindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç

olarak CTP borularda artan darbe enerjisinin yorulma ömrünü ve patlama mukavemetini azalttığını belirlemişlerdir.

Kara ve ark. (2014), 32 bar iç basınç ile ön gerilme oluşturulmuş CTP borularının kırılma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Ön gerilmeli ve gerilmemiş $\pm 55^\circ$ filaman sarımlı CTP borulara 5 J, 10 J ve 15 J düşük enerji seviyelerinde darbe deneyleri yapmışlardır. Deneylerde numunelerdeki hasar gelişimleri incelenmiş ve elde edilen verilerle kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, iç basınç grafikleri oluşturulmuştur. Darbe hasarı almış numunelerin patlama mukavemet değerleri incelenmiştir.

Sebaey ve Mahdi (2016), $\pm 56^\circ$ filaman sarım CTP boruların önce darbe deneyini sonrasında yanal basma deneyini gerçekleştirmişlerdir. Darbe deneyini 41 J ve 71 J arasında yapılmış ve hasar davranışları incelenmiştir. Darbe hasarı almış ve almamış numuneler karşılaştırıldıklarında darbe hasarsız numunelerin özelliklerinin daha iyi olduğu görülmektedir. Yanal basmadaki hasar başlangıcının darbe hasarlı bölgeler olduğu belirtilmiştir.

Kara ve Kırıcı (2017), $[\pm 55^\circ]_3$ sarım açısına sahip CTP boruların hasar oluşumlarını incelemişler ve hasarın basınç değişimine etkisini araştırmışlardır. Numunelere 0.05 gerilme hızında ve 0.42 Hz frekansında yorulma deneyleri yapmışlar ve sonrasında 32 bar iç basınçla ön gerilmeli numuneler meydana getirmişlerdir. 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde darbe uyguladıkları numunelerden elde ettikleri verilerle temas kuvveti-zaman grafiği oluşturmuşlar ve absorbe edilen enerji miktarını hesaplamışlardır. Patlama deneyleri gerçekleştirilen numuneler incelendiğinde yorulma döngüsü sayısı az olanların boru sertliğinin azaldığı sonucuna varmışlardır.

Gemi ve ark. (2018), filaman sarım yöntemiyle üretilmiş $[\pm 55^\circ]_3$ CTP boruların düşük hızlı darbe davranışları üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. Farklı darbe enerjileri uygulayarak elde edilen sonuçlarla oluşturdukları kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman grafiklerini incelemişlerdir. Aynı zamanda deneysel sonuçları Weibull yaklaşımı ile değerlendirmişlerdir. Darbe hasarı bölgesinde hasar analizi yaparak hasar modlarını belirtmişlerdir.

Harris ve ark. (2020), ince cidarlı $\pm 55^\circ$ sarım açılı CTP borularda, darbe ve yarı statik yükleme ile hasar oluşturmuşlar ve bunun iç basıncına etkisini araştırmışlardır. 5 J ve 150 J arasında değişen darbe enerjisi yüklenerek hasar mekanizmaları gözlenmiştir. Çeşitli deneylere tabi tutulan boruların kalan kullanım ömrü hesabı yapılmıştır.

Kompozit malzemelerde darbe sonrası alınan hasarla kalan basınç dayanımını bilmek büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasındaki gibi filaman sarım CTP

borularda darbe sonrası yapılan basma (CAI) deneyi ile ilgili literatürde çok az çalışma bulunmaktadır.

Gemi (2019), filaman sarım tekniği ile üretilen $[\pm 55^\circ]_3$ konfigürasyonuna sahip $\emptyset 54$, $\emptyset 72$ ve $\emptyset 96$ mm çaplarındaki CTP borular üzerinde düşük hızlı darbe deneyi ve ardından CAI deneylerini gerçekleştirmiştir. Düşük hızlı darbe deneylerini 1.5, 2, 2.5 ve 3 m/s hızlarında uygulamıştır. Darbe hasarı almış ve almamış numunelere CAI deneyi yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Bu sonuçlara göre artan darbe enerjisi ile numunelerdeki temas kuvveti değerleri ve temas sürelerinde artış olmuştur. Numunedeki çap artışı temas kuvvet değerlerinde azalma ve temas sürelerinde artış göstermiştir. Numunelerdeki darbe hasarı miktarının basma hasarını etkilediği görülmüştür. Hasar analizinin daha verimli olması için deney sonrası numunelerini mikroskop ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri ile incelemiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, Ø72 mm iç çapa ve $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ elyaf açıların sahip, 1 m uzunluğunda filaman sarım CTP boruları üretildi. Bu borulardan, yapılacak olan yakma testi, darbe ve darbe öncesi ve sonrası basma (CAI) deneyleri için uygun boyutlarda numuneler kesildi.

3.1. Filaman Sarım CTP Boruların Üretimi

Bu çalışmada kullanılan iç çapı Ø72 mm olan $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf/epoksi CTP boruları üretilmiştir. CTP borularının yapımında, elyaf malzemesi olarak Cam Elyaf San. A.Ş. 1200 teks (17 μm çapında) E camı, matris malzemesi olarak da Momentive, Bisphenol A, Epikote 828 reçine kullanılmıştır. Sertleştirici madde olarak Epikure 875 (Curing agent, Modified Carboxylic Acid Anhydride) kullanılmıştır. 1 metrelik borular filaman sarım yöntemi ile üretilmiştir. Üretim, yaş sarım metodu kullanılarak yapılmıştır. Reçine karışımı mekanik bir karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra cam elyaflar bobinlerden çekilerek silindirler üzerinden belli bir gerginlikte reçine banyosundan geçirilmiştir. Reçine banyosunda reçine karışımının sıcaklığı 60 °C 'ye sabitlenmiştir. Üretimden sonra kompozit borunun rahat çıkabilmesi için QZ-13 kalıp ayırıcı malzeme mandrellerin yüzeyine uygulanmıştır. Reçine emdirilmiş olan cam elyaflar $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ 'lik sarma açılarıyla dönen mandrellerin üzerine sarılmıştır. Kullanılan malafa çapı 72 mm'dir. Filaman sarım işleminden sonra özel bir fırında 2 saat 135 °C ve 2 saat 150 °C de reçine birikimini önlemek amacıyla sabit bir hızda dönen bir sistemle kürlenmeye bırakılmıştır. CTP boruların üretimi ve kürlenmesi işlemleri, İzmir İzoreel Komp. Malz. San. ve Tic. Ltd. Şti. imkanlarından yararlanılarak yapılmıştır. Üretimde kullanılan elyafların ve matrisin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan elyaf ve matrisin özellikleri

	E(GPa)	$\sigma_{\text{çek}}$ (MPa)	ρ (g/cm ³)	ϵ_{kop} (%)
Elyaf: E-camı	73	2400	2.6	1.5-2
Matris: Epoksi Reçine	3.4	50-60	1.2	4-6

Toplamda; 1m uzunluğunda, $\text{Ø}72$ mm iç çapında, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$, $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip ve 2,4,6 tabakalı CTP borular üretilmiştir. Üretilen kompozit borular Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Filaman sarım yöntemiyle üretilen 1 m’lik CTP borular

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Standartlara uygun olarak yakma deneyi, darbe deneyi ve eksenel basma deneyi için 1 m’lik numuneler Şekil 3.2’de verilmiş olan dairesel testereli boru kesme tezgâhı kullanılarak kesilmiştir. Kesim yüzeyleri zımparalanıp çapakları alınarak deneye hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan numuneler (Şekil 3.3) etiket üzerine bilgisi yazılarak işaretlenmiştir.



Şekil 3.2. Kesim işlemi yapılan tezgâh



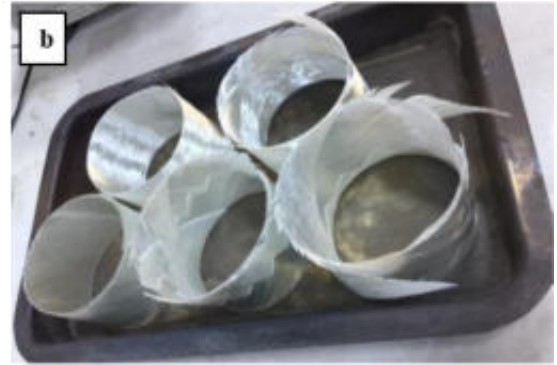
Şekil 3.3. Deneyler için hazırlanmış numuneler a) yakma deneyi numuneleri b) darbe ve basma deneyi numuneleri

3.3. Yakma Deneyi

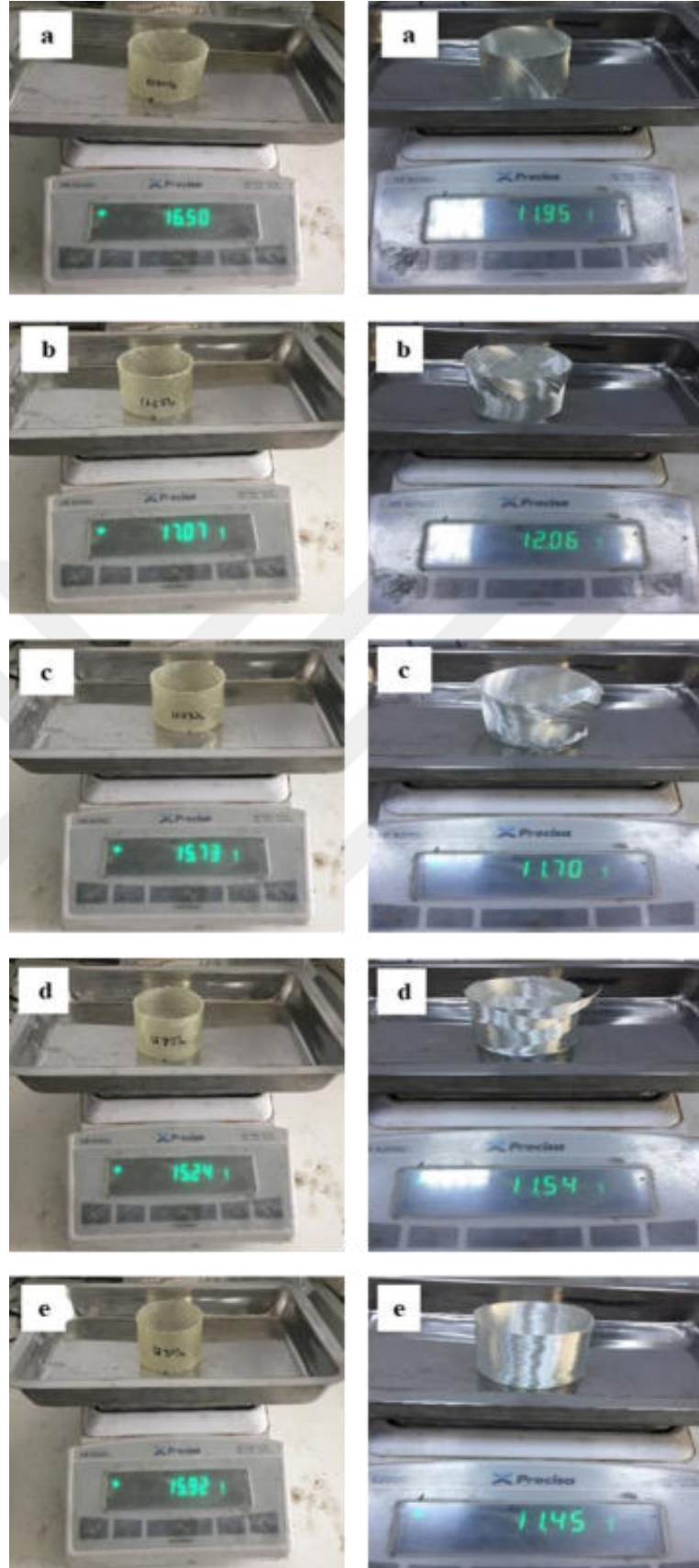
Elyaf yakma deneyinin amacı bu çalışmada kullanılan CTP kompozit boru numunelerindeki elyaf-matris oranının belirlenmesidir. Matris malzemeye takviye edilmiş olan malzemenin kütle oranı belirlenir. Yakma deneyi ASTM D-2584 standardına uygun olarak Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarındaki “Protherm Furnaces” marka kül fırınında gerçekleştirildi (Şekil 3.4). Tez kapsamında yapılan yakma deneyinde $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ açılarında filaman sarım yöntemi ile üretilmiş 1m’lik 2 tabakalı borulardan 50 mm boyunda birer adet yakma numunesi kesildi. Kesilen yakma deneyi numuneleri elektronik hassas terazide tartılarak ağırlıkları tespit edildi. Daha sonra 600°C ’lik fırında matrisin tamamen yanıp sadece numunedeki cam elyaflar kalana kadar ısıtıldı. Fırınlanan numunelerin öncesi ve sonrası Şekil 3.5’te verilmiştir. Yakma sonrasında kalan cam elyafların ağırlığı tekrar elektronik hassas terazide tartılarak tespit edildi. Yakma öncesi ve sonrası tartılan numuneler Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.4. Yakma deneyinin yapıldığı fırın



Şekil 3.5. Yakma testi (a) öncesi ve (b) sonrası numuneler



Şekil 3.6. Yakma deneyinden önce ve sonra numune ağırlıkları a) $[\pm 30^\circ]$ numunesi b) $[\pm 45^\circ]$ numunesi c) $[\pm 55^\circ]$ numunesi d) $[\pm 75^\circ]$ numunesi e) $[\pm 90^\circ]$ numunesi

3.4. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Kompozit malzemeler, üretim aşamasından işlevsel kullanım aşamasına kadar birçok darbe etkisine maruz kalabilirler. Bu darbe etkisi kompozit malzemede görülen ya da görülmeyen hasar oluşumuna neden olabilir. Oluşan hasarların kompozit malzemenin performansını nasıl etkilediğini öğrenmek ve mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmek için numuneler üzerinde darbe deneyi yapılır. Darbe deneyleri; düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bu konu üzerine yapılmış bazı çalışmalarda, düşük hızlı darbenin hızının 1 ile 10 m/s arasında olduğu kabul edilmiştir (Ceyhun ve Turan, 2003).

Darbe uygulanan malzemede oluşacak tepki kendisini meydana getiren elyaf ve matris özelliklerine göre farklılık gösterebilir. Buna ilaveten kompozitin tabaka sayısı, boyutu, sarım açısı, darbe hızı da kompozit malzemenin hasar davranışını etkilemektedir. Kompozit malzemelerde, darbe hasarı çarpmanın türüne bağlı olarak darbe uygulanan yüzeyde olduğu gibi darbe uygulanmayan yüzeyde de iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabaka arasında ayrılma) meydana getirebilir (Gemi, 2014).

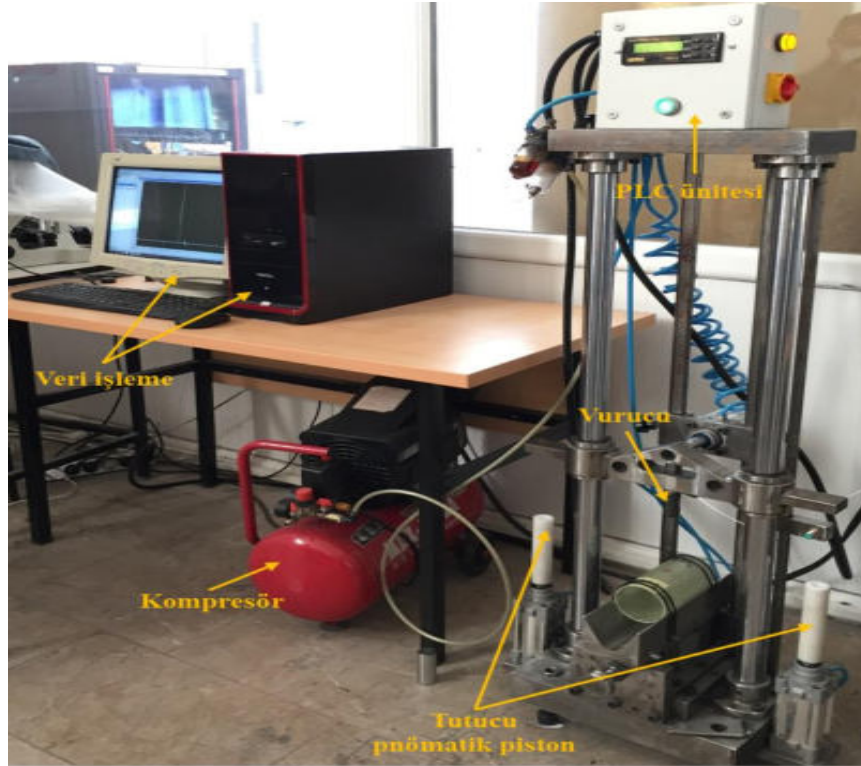
Kompozit malzemelerin darbeye karşı gösterdikleri tepkiyi inceleyebilmek için standart bir deney tekniği mevcut değildir. Ancak düşük hızlı darbe karşısındaki davranışlarını incelemek için bazı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar; sarkaç deneyleri (Izod, Charpy ve Pendulum), ankastre edilmiş kiriş darbe deney metodu, yüksek hızlı darbe deneyleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson) ve ağırlık düşürme deneyleridir (Kara, 2012a). Bu tezdeki darbe deneyleri ağırlık düşürme metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Ağırlık düşürme darbe deneyi, malzemenin dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılan yaygın bir metottur. Bu metodun diğer Izod ve Charpy deney metodlarından farkı vurucu yüksekliğinin, darbe hızının ve darbe enerjisinin isteğe bağlı olarak değiştirilebilir olmasıdır. Cihazda; vurucu, pnömatik geri sekme frenleri, pnömatik bir sabitleyici ve veri yazılım sistemi bulunmaktadır. Şekil 3.7’de deney düzeneği üzerinde gösterilmiştir.

Bu çalışmada CTP boru numunelerinin düşük hızlı darbe deneyleri, Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında gerçekleştirildi. Ağırlık düşürme metodu ile yapılan darbe deneylerinde Şekil 3.8’de verilmiş olan cihaz kullanıldı. Deney sırasında elde edilen veriler sistem tarafından cihazdan bilgisayara aktarılarak kayıt edildi. Deney düzeneğindeki vurucu kütlesi toplam 5.6 kg olup, vurucunun ucu 24 mm çapa sahip ve yarım küre şeklindedir. Vurucunun en

az sürtünmeyle serbest debilmesi için krom kaplı miller bulunmaktadır. Darbenin geri sekmemesi için fren sistemine ve numunenin yerleştirildiği V-yatağına sahiptir.

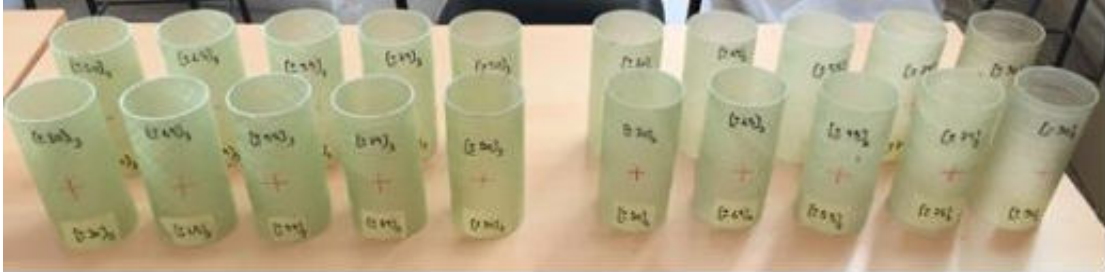


Şekil 3.7. Düşük hızlı darbe deney cihazı



Şekil 3.8. Düşük hızlı darbe deney cihazı ve veri toplama nitesi

Deney düzeneğinde, vurucunun hızı 2 m/sn (metre/saniye) ve vurucu yüksekliği 20.5 cm olacak şekilde ayarlandı. 2, 4 ve 6 tabakalı herbir açılı konfigürasyonuna sahip numuneden ikişer tekrar yapıldı (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Düşük hızlı darbe deneyi uygulanacak numuneler

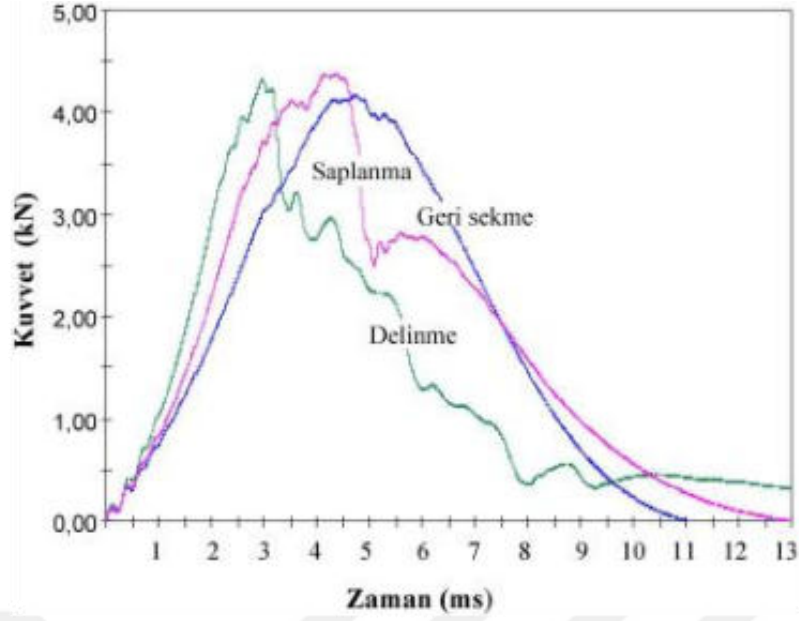
3.5. CTP Borularının Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Darbe numunelerine uygulanan darbe kuvveti ile kompozitin darbe davranışını gösteren birçok veri elde edilir. Bu veriler neticesinde numunenin darbe etkisindeki karakteristik özellikleri gösteren kuvvet-çökme (F-d), kuvvet-zaman (F-t), absorbe edilen enerji-zaman (Ea-t) grafikleri elde edilir. Oluşturulan grafikler kompozit numunenin darbe davranışında vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delmesi gibi üç özel durumun anlaşılmasını sağlar (Sayer, 2009).

3.5.1. Kuvvet-zaman (F-t) grafiği

Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi (rebounding), vurucunun ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delmesi (perforation) gibi üç özel duruma ait kuvvet-zaman (F-t) eğrileri Şekil 3.10'daki grafikte verilmiştir.

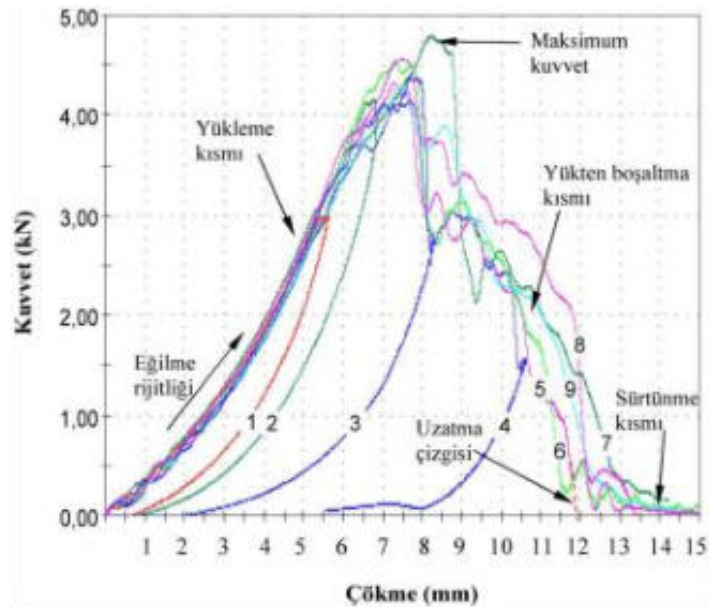
Düşük hızlı darbelerde Şekil 3.10'da görüldüğü üzere eğriler paraboliktir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmış ve saplanma-delinme eğrilerinde de görüldüğü gibi maksimum kuvvet değeri de hemen hemen sabit bir değer almıştır. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması öngörülür ama şekilden de görüleceği üzere vurucu ve numune arasında sürtünme meydana geldiğinden eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel ilerlemiştir (Sayer, 2009).



Şekil 3.10. Kuvvet-zaman grafiği (F-t) (Sayer, 2009)

3.5.2. Kuvvet-çökme (F-d) grafiği

Kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri de kuvvet-çökme (yer değiştirme) (F-d) eğrileridir. Şekil 3.11’de artan darbe enerjisi ile kuvvet değişimindeki çökme değerlerini gösteren bir F-d grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11. Kuvvet-çökme grafiği (F-d) (Sayer, 2009)

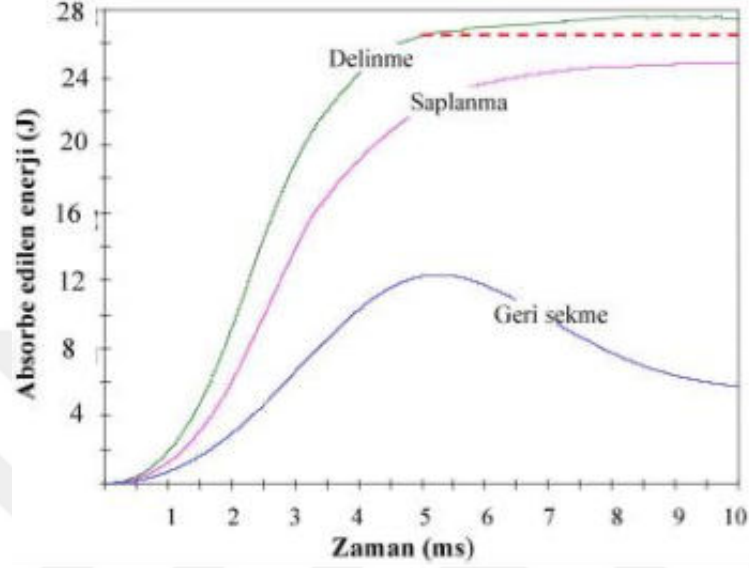
Her eğri iki kısımdan oluşur. Bir tarafı darbe enerjisinin artışıyla artan kuvveti, maksimum kuvvet değerine ulaştıktan sonrada yük boşaltılması sonucu ikinci kısımdaki azalma görülür. Darbe yükü ile numune bir direnç gösterir ve kuvvet-çökme eğrisindeki artan kısım “eğilme rijitliği” olarak isimlendirilir. Kuvvet-çökme eğrileri iki farklı tipte oluşmaktadır. Bunlar; kapalı tip eğri ve açık tip eğridir. Kapalı tip eğri, vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani numune, darbe enerjisinin büyük bir kısmını yutmuş, yutulmayan enerji de vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Şekil 3.11’deki ilk üç numunenin kapalı tip eğri oluşturduğu görülmektedir. Darbe enerjisi arttırıldıkça vurucunun geri sekmesi için harcanacak enerji azalacağı için kapalı tip eğri genişlemeye başlar ve çökme değeri artar. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere kapalı tip eğriye sahip numunedeki darbe enerjisindeki artış açık tip eğriye dönüşmesine neden olmuştur. Eğer bir eğri açık tip oluşmuşsa bunun iki anlamı vardır. Biri vurucunun numuneye saplanması diğeri ise numunenin delinmesidir. Yani vurucu, numunenin yüzeyine doğru harekete devam ederek saplanır ve geri sekmez. Numunenin saplanmasına örnek olarak Şekil 3.11’deki 5 numaralı numune gösterilebilir. Vurucunun numuneye saplanması darbe enerjisinin daha da artmasıyla meydana gelir. Numune kalınlığı boyunca hareketine devam eden vurucu, numuneye saplanarak alt yüzeyinden çıkar. Delinme olayına örnek olarak Şekil 3.11’de gösterilen 6, 7, 8 ve 9 numaralı numuneler gösterilebilir. Kuvvet-çökme eğrilerinin uç kısımlarında oluşan yatay eksenin sonuna doğru kapanan kısım, numune ve vurucu arasında oluşan sürtünmeyi belirtir. Yani numunenin daha fazla darbe enerjisini yutamayacağı anlamına gelmektedir (Sayer, 2009).

3.5.3. Enerji-zaman (E-t) grafiği

Şekil 3.12’de numune yüzeyinden geri sekme (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç duruma ait enerji-zaman (E-t) grafiği verilmiştir.

Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme (F-d) eğrisinin altında kalan alanın hesabıyla elde edilir. Şekil 3.12’deki geri sekme durumunda vurucunun darbe enerjisinin tamamı numune tarafından absorbe edilmez, absorbe edilmeyen enerji vurucunun geri sekmesi için kullanılır. Saplanma durumunda vurucunun darbe enerjisinin tamamını numune absorbe eder. Saplanma eğrisi grafiğinden de görüldüğü üzere eğrinin son kısmı yataya yakın bir şekilde devam etmektedir. Delip geçmesi durumunda ise kuvvet-zaman

grafiginde oluşan uç kısımdaki sirtünme alanının altında kalan alanın eklenmesiyle Şekil 3.12’de de görüldüğü gibi eğri yukarıya doğru artış göstermektedir. Bu tür grafiklerden toplam absorbe edilen enerjiyi hesaplamak için sirtünmenin altında kalan alanın çıkarılması gerekir. Bu da hemen hemen kesikli çizginin denk geldiği değerdir.



Şekil 3.12. Enerji-zaman grafiği (E-t) (Sayer, 2009)

Kompozitlerin darbe davranışlarının belirlenmesinde darbe enerjisi (E_i) ve absorbe edilen enerji (E_a) parametreleri önemlidir. Darbe enerjisi (E_i), vurucunun sahip olduğu darbe enerjisini darbe sırasında numuneye aktardığı enerji olarak ifade edilir. Vurucunun darbe enerjisi, çıkarıldığı yükseklikten kazanacağı potansiyel enerjidir. Vurucunun darbe enerjisi Denklem (3.1)’deki gibi ifade edilir. Buradaki ‘ m ’ vurucunun kütlesini, ‘ h ’ vurucunun darbe cihazında çıkarıldığı yüksekliği ve ‘ d_{max} ’ darbeden sonra numunenin maksimum çökmesini ifade etmektedir.

$$E_i = mgh + mgd_{max} \quad (3.1)$$

Darbe deneyi sırasında serbest bırakılarak düşürülen vurucunun sahip olduğu potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşür. Bu dönüşüm Denklem (3.2)’deki gibi ifade edilir.

$$mgh + mgd_{max} = \frac{1}{2}mV^2 \quad (3.2)$$

Buradaki “V” vurucunun hızıdır. Vurucu ile numunenin temasından önce numunedeki çökme sıfır olduğu için $d_{max}=0$ olarak alınır. Bu değer yerine koyularak Denklem (3.3) elde edilir (Sayer, 2009).

$$mgh = \frac{1}{2} mV^2 \quad (3.3)$$

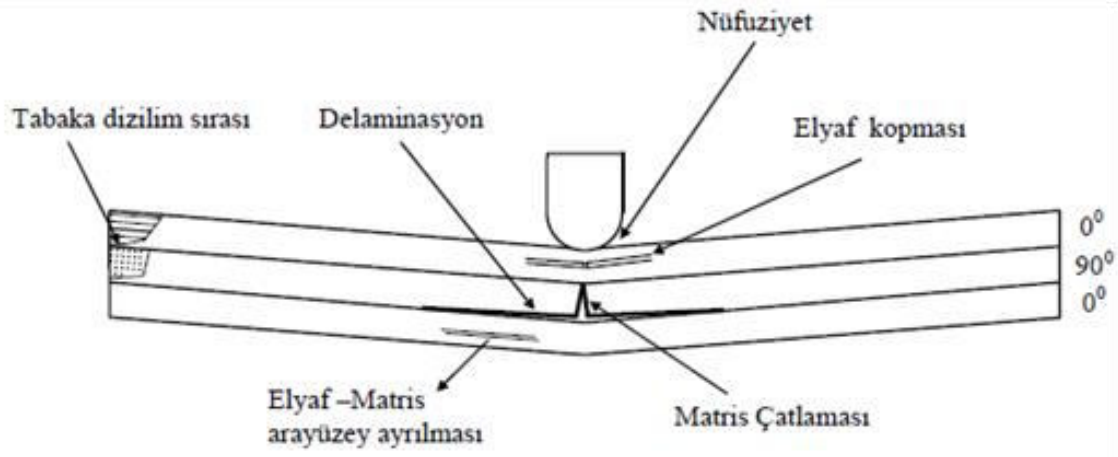
Denklem (3.3)’de, uygulanmak istenen darbe enerjisi yerine yazılarak vurucunun yüksekliği belirlenmiştir. Bu çalışmada, Ø72 mm iç çaplı, ±30°, ±45°, ±55°, ±75° ve ±90° açılarındaki 2, 4 ve 6 tabakalı CTP borularına düşük hızlı darbe deneyi uygulandı. CTP borularından ikişer tekrar yapılarak toplam 30 adet numuneye ASTM D 7136 standardına uygun olarak 2 m/s hızında darbe deneyi yapılarak ön hasar oluşturuldu. Vurucunun yüksekliği Denklem (3.1) ve Denklem (3.3)’ten hesaplanarak 20.5 cm olarak belirlendi. Darbe deneyinde tekrarlı darbe etkisi tutucularla engellendi.

Absorbe edilen enerji (E_a), darbe sonunda numune tarafından absorbe edilebilen tüm enerji olarak ifade edilir. Absorbe edilen enerji, vurucunun numuneye saplanmadığı ya da numuneyi delip geçmediği yani açık tip eğri olmayan, kapalı tip olan kuvvet-çökme (F-d) eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır.

3.6. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Oluşan Hasar Modları

Darbe sonucu kompozit malzemenin yüzeyinde gözle görülebilir ya da görülemez hasarlar oluşur. Gözle görülemeyen hasarlar, mikro boyuttadır ve bunlar mikroskop ile incelenir. Gözle görülebilir hasarlar, makro boyuttadır ve bunlar malzemeye yapısal anlamda büyük zarara yol açarlar(Gemi ve ark., 2020).

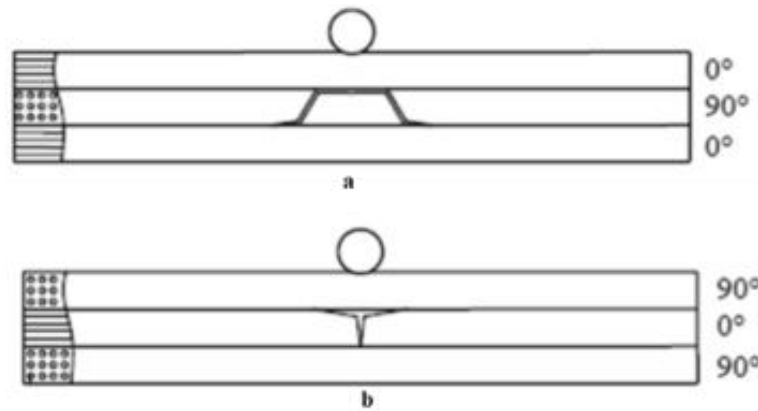
Darbe sonrası hasar, vurucunun temas ettiği yüzeyde ya da tersindeki yüzeyde matris malzemesinde çatlak oluşumu ile başlar. Delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşumu ile devam eder. Uygulanan darbe enerjisindeki artışın devam etmesi halinde sırasıyla elyaf hasarı, vurucunun saplanması veya malzemeyi delip geçmesi şeklinde hasar meydana gelmektedir(Gemi ve ark., 2017; Maziz ve ark., 2021). Şekil 3.13’te hasar aşamalarına ait şematik bir görüntü verilmektedir.



Şekil 3.13. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşabilecek hasarlar (Kara, 2006)

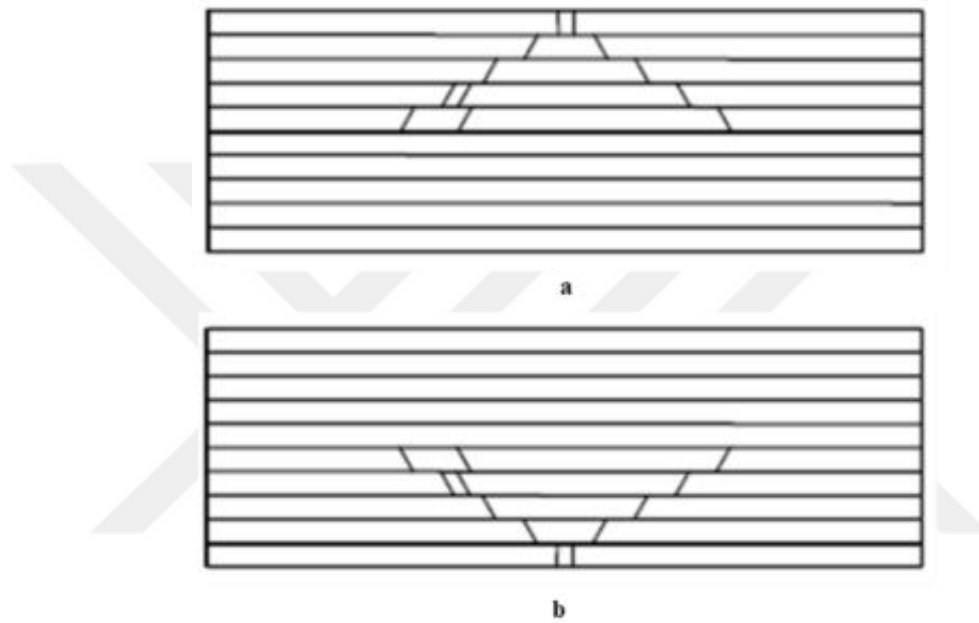
3.6.1. Matris hasarı

Matris hasarı, düşük hızlı darbeye oluşan ilk hasar türüdür. Epoksinin deformasyon özelliği elyafinkinden daha düşüktür. Bu sebeple darbe yükü altında ilk hasar epoksi yapıdaki çatlamlarla başlar. Malzeme yüzeyindeki gerilmelerin etkisiyle matris çatlakları, tabaka ara yüzeylerinde delaminasyonlara sebep olur. Tek yönlü elyaf tabakalarında matris çatlakları genellikle elyaf yönüne paralel şekilde oluşmaktadır. Delaminasyona göre iki tip matris çatlağı oluşmaktadır. Bunlar çekme ve kayma matris çatlağıdır (Şekil 3.14) (Metin, 2008). Kayma çatlaklarının oluşumunda enine kayma gerilmeleri etkilidir ve tabakalı yapının ortasında belirli bir açıda oluşur. Çekme çatlakları ise düzlemin normal gerilmelerinin tabakanın enine kayma mukavemetini aştığı durumda meydana gelir.



Şekil 3.14. Matris çatlama a) çekme çatlağı b) kayma çatlağı (Abrate, 1998)

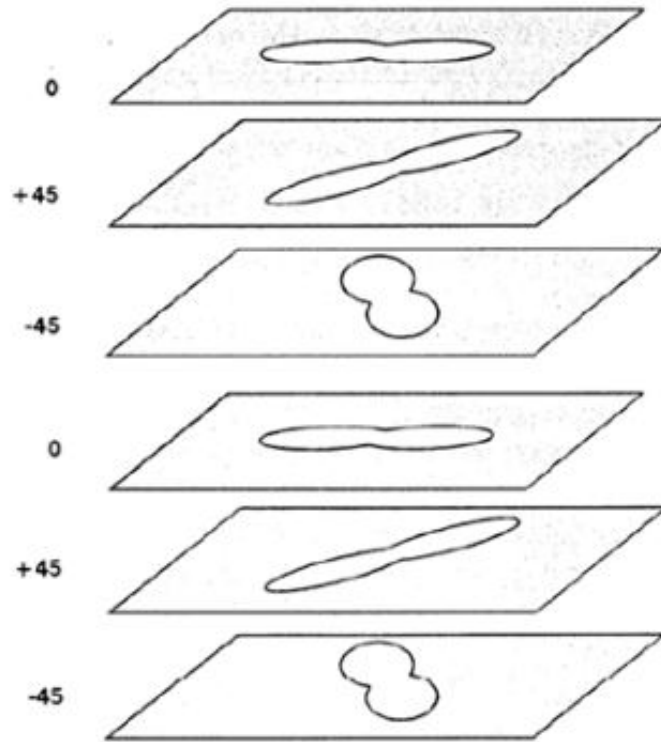
Gerilmenin yüksek olduğu kalın tabakalı kompozitlerde matris çatlakları vurucunun temas ettiği ilk tabakada meydana gelir. Şekil 3.15a’da verildiği gibi çatlaklar çam ağacı şeklinde yukarıdan aşağıya doğru bir yol alır. İnce tabakalı kompozitlerde ise eğilme gerilmeleri kompozitin arka yüzünde matris çatlamlarına neden olur. Şekil 3.15b’de verildiği gibi çatlaklar bu sefer ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde aşağıdan yukarıya doğru bir yol alır. Matris çatlamları devamında delaminasyon meydana getirir (Abrate, 1998).



Şekil 3.15. Matris çatlakları a) çam ağacı b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümülü hasarlar (Kara, 2012a)

3.6.2. Delaminasyon

Matris çatlama sonucu oluşan delaminasyon, farklı elyaf oryantasyonlarının bulunduğu bitişik tabakalar arasındaki bağ kuvvetlerinin azalması ile birbirinden ayrılması anlamına gelmektedir. Delaminasyonun sebebi; tabakalar arasındaki eğilme rijitliklerindeki farklılıklar ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Bu da tabakalar arasındaki elyaf yönlenmelerinin farklılığından kaynaklıdır. Bitişik iki tabakalının yönlenmesinin aynı olması delaminasyona sebep olmaz (Abrate, 1998). Delaminasyonlar elyaf açısı yönünde meydana gelir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Delaminasyonun elyaf açlarına göre oluşumu (Abrate, 1998)

3.6.3. Elyaf hasarı

Matris çatlaması ve delaminasyonun ardından meydana gelen hasar türüdür. Darbe enerjisi ile oluşan gerilmeler elyaf mukavemet değerini aşarsa malzemede elyaf çatlaması ve kopması meydana gelir. Bu hasar vurucunun temas ettiği yüzeyde veya eğilme nedeniyle temas yüzeyi dışında da oluşabilir.

3.6.4. Nüfuziyet

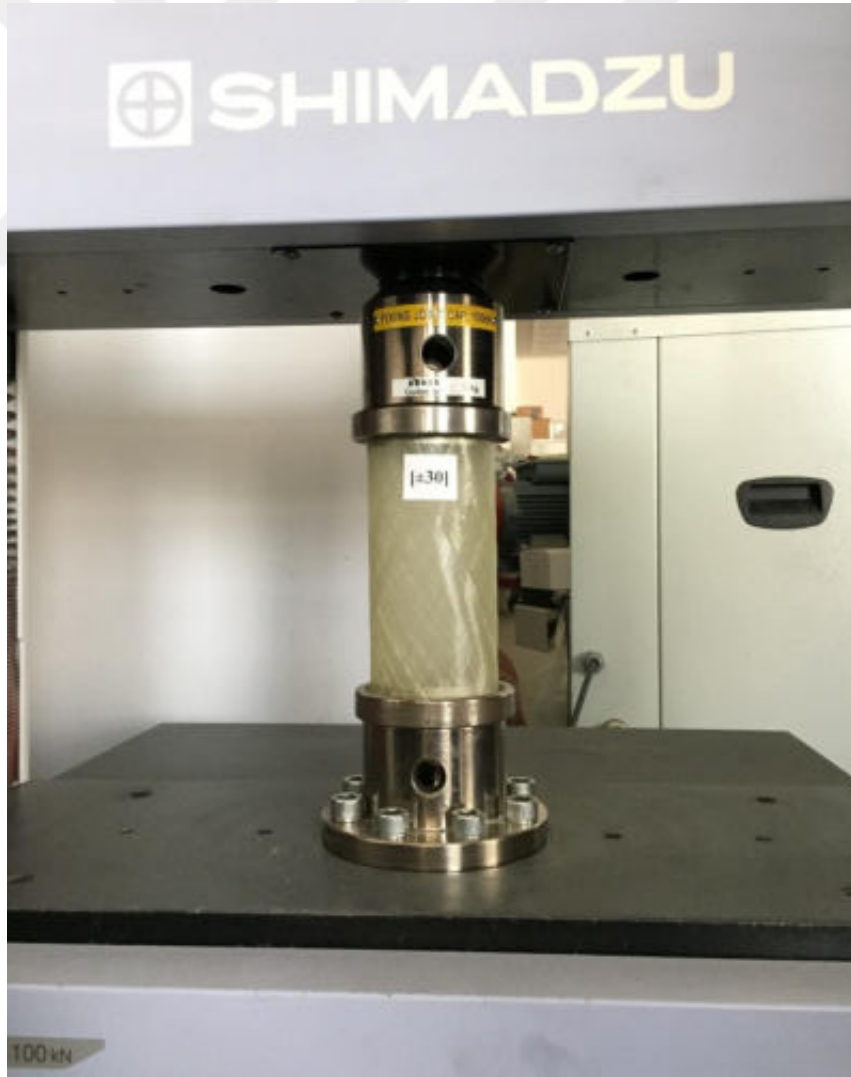
Nüfuziyet, kompozite çarpan vurucunun tamamının veya sadece ucunun numuneye saplanması olarak tanımlanır. Elyaf ve hacim oranları aynı olan, farklı boyutlardaki malzemelere çarpan vurucunun nüfuziyet alanı hemen hemen aynıdır (Kara, 2012a).

3.7. Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI)

Basma deneyinin amacı, malzemelerin aksenal yükleme altında; basma mukavemeti, şekil değişimi ve kesit değişim yüzdesi gibi mekanik özelliklerini

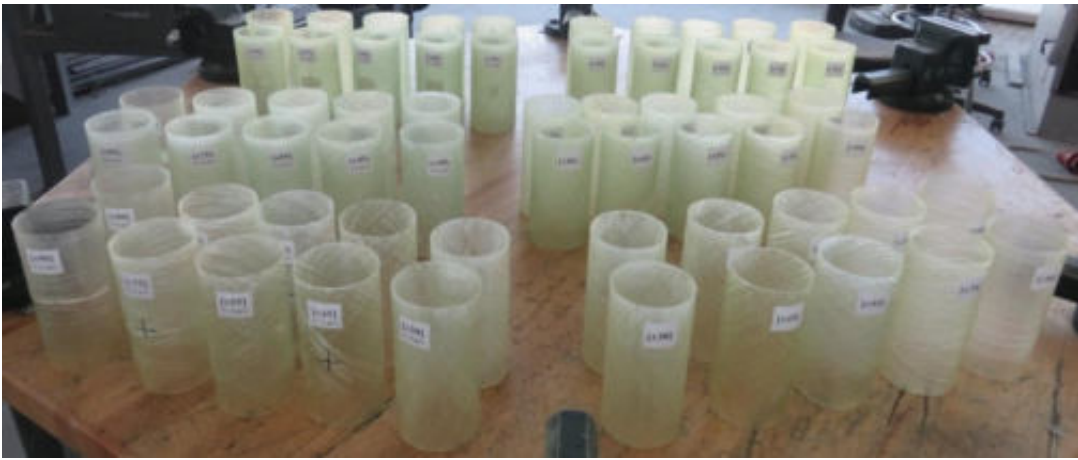
belirlemektir. Basma deneyi numunelerinin h_0/d_0 (numune yüksekliği/numune çapı) oranı önemlidir. Çünkü numunenin h_0/d_0 oranının çok büyük olması halinde deney esnasında numunede bükülme ve homojen olmayan gerilim dağılımı meydana gelir. h_0/d_0 oranı küçüldükçe ise numune ile basma plakaları arasındaki sürtünmeden dolayı deney sonuçları etkilenir (Kayalı, 1996). Yapılan bu çalışmada numune yüksekliği $h_0=150$ mm, numune çapı $d_0=72$ mm boyutlarında ve $h_0/d_0=2.08$ oranında seçildi.

Bu alışmadaki CAI deneyi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN kapasiteli SHIMADZU deney cihazında gerçekleştirildi. Deneyde $\text{Ø}72$ mm iç çap ve $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$, $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip 2, 4 ve 6 tabakalı filaman CTP borularına özel üretilmiş flanş başlıklar kullanıldı. ASTM D 7137 standardına göre ayarlamaları yapılan cihaza numuneler Şekil 3.17'de verildiği gibi yerleştirildi.



Şekil 3.17. Basma deneyi

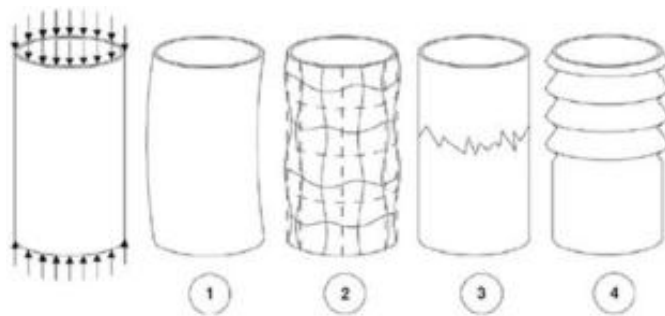
Darbe hasarının CTP borunun mekanik özelliklerine etkisini görebilmek amacıyla darbe hasarlı ve hasarsız tüm numuneler deneye tabi tutuldu. Her bir konfigürasyona ait CTP boru numunelerinden deneysel güvenilirlik için ikişer tekrardan toplam 60 numunenin basma deneyi yapıldı (Şekil 3.18). Basma deneylerinin tamamı oda sıcaklığında ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 4 mm/dak (milimetre/dakika) yükleme hızı ile gerçekleştirildi. Uygulanan yük karşılığında alınan veriler otomatik veri toplama sistemi tarafından kaydedildi. Deney süresince basma numuneleri kayıt altına alınarak hasar gelişimleri incelendi. Deneyden sonra numunelerin hasarlarının daha iyi görülebilmesi için stüdyo ortamında fotoğraf çekimleri yapıldı.



Şekil 3.18. Basma deneyi öncesi darbe hasarlı ve hasarsız numuneler

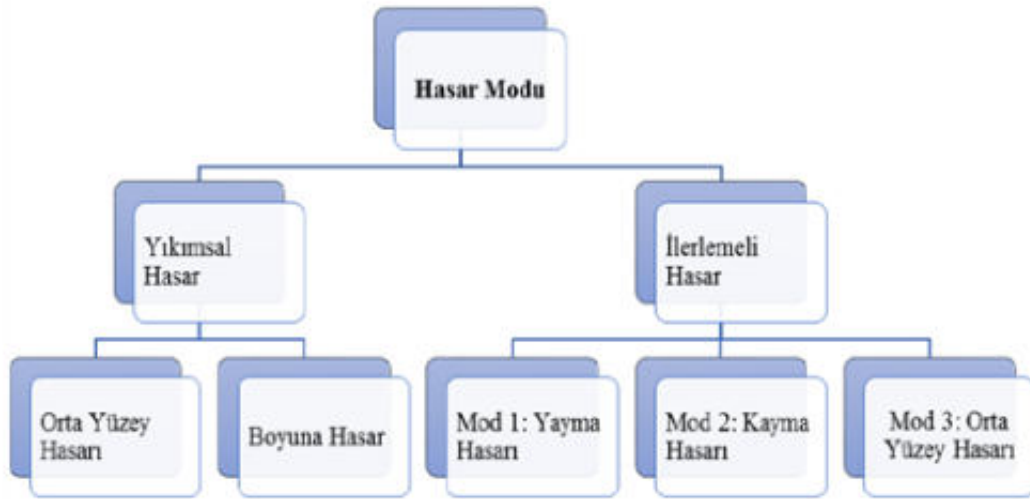
3.8. Aksenal Basma Deneyi Sonrası Hasar Modları

Eksenel basma deneyi sonucunda kompozit numunelerde 4 farklı hasar modu meydana gelmektedir. Bunlar; genel burkulma, bölgesel burkulma, kırılma (çatlama) ve ilerleyen kırılmadır (Lau ve ark., 2012). Şekil 3.19'da kırılma modları gösterilmiştir.



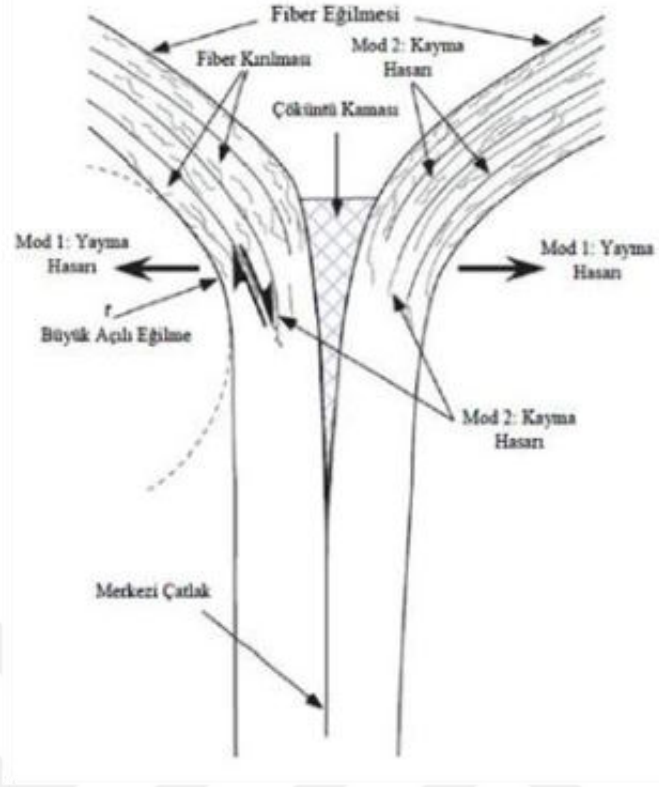
Şekil 3.19. Kompozit malzemelerdeki kırılma modları 1) genel burkulma 2) bölgesel burkulma 3) kırılma 4) ilerleyen kırılma (Lau ve ark., 2012)

Cam elyaf kompozit malzemelerde, yıkımsal hasar (catastrophic) ve ilerlemeli hasar (progressive) kırılma türleri meydana gelir. Yıkımsal hasar modu, orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlaklar olarak 2'ye ayrılır. İlerlemeli hasar modu, matristeki kırılmalardan ve tabakalar arasındaki ayrılmalardan meydana gelir ve yayma, kayma ve orta yüzey çatlakları olarak 3'e ayrılır. Hasar modları Şekil 3.20'de sınıflandırılmıştır.



Şekil 3.20. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları (Lau ve ark., 2012)

Bu hasar modlarının meydana gelmesinde; matris malzemesinin, takviye elemanının, elyaf sarım açısının ve numune geometrisinin etkisi fazladır. Yıkımsal hasar, genel burkulma sonucunda meydana gelmektedir. Orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlaklar ise kuvvetin en yüksek olduğu yerde oluşmaktadır. Yıkımsal hasarda ani kırılma şeklinde bir hasar meydana gelir. Bu sebeple absorbe edilen enerji miktarı düşüktür. İlerlemeli hasarlar, bölgesel burkulmalardan kaynaklı oluşurlar. İlerlemeli hasar; silindirik veya kare profil kompozitlerde oluşan hasar modları yayma ve kayma şeklinde kendini gösterirken, eliptiklik oranı 2 olan eliptik geometrideki parçalarda orta yüzey çatlakları şeklinde oluşur. Yayma çatlaklarının oluşumunda enerji absorpsiyonu kayma çatlaklarına göre daha fazladır (Lau ve ark., 2012). Bunun nedeni bölgesel burkulma sonucu oluşan yayma ve kayma çatlakları yavaş bir kırılma oluşturur ve enerji absorpsiyonu kırılma gerçekleşene kadar devam eder. Silindirik veya kare profillerde oluşan ilerlemeli hasar modları Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Silindirik veya kare profillerde oluşabilecek hasar modları (Lau ve ark., 2012)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

CTP boruları ile gerçekleştirilen yakma, düşük hızlı darbe ve düşük hızlı darbe sonrası basma (CAI) deneyleri sonuçları ve elde edilen veriler ile oluşturulan grafikler üzerinden genel yorumlamalar yapılmıştır. Deney esnasında alınan kayıtlar ve deney sonrasında numuneler üzerinde gerçekleşen hasarlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu incelemeler eşliğinde deney grafikleri ile oluşan hasar modları gelişim sırasına göre ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

4.1. Yakma Deneyi Sonuçları

Yakma deney sonrası numunelerin ağırlıkça elyaf ve matris oranları hesaplanarak belirlenmiştir. Ağırlıkça elyaf hacimsel oran hesaplamalar, Denklem 4.1 kullanılarak yapılmıştır. Deney öncesi ve sonrası tartım sonuçları ve elde edilen ağırlıklar Çizelge 4.1 de toplu olarak verilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, kullanılan elyaf ve matris malzemeler aynı olmasına rağmen her numunede sarım açısına bağlı olarak ağırlıkça elyaf oranlarının farklı çıktığı görülmüştür. Tabaka sayıları aynı olan numunelerin sarım açısına bağlı olarak fazla reçine tuttuğu ve reçinece zengin olan numunelerin elyaf oranlarının düşük olduğu görülmüştür.

$$\text{Ağırlıkça yüzde (\%)} = \frac{mx}{mT} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Çizelge 4.1 Yakma deneyi öncesi-sonrası tartım sonuçları

Numune	Yakma Öncesi Ağırlık (g)	Yakma Sonrası Ağırlık (g)	Reçine Ağırlığı (g)	Elyaf Ağırlığı (g)	Ağırlıkça Elyaf Oranı (%)
[±30°]	16.50	11.95	4.55	11.95	72.42
[±45°]	17.07	12.06	5.01	12.06	70.65
[±55°]	15.73	11.70	4.03	11.70	74.38
[±75°]	15.24	11.54	3.70	11.54	75.72
[±90°]	15.92	11.45	4.47	11.45	71.92

[±30°] numunesinin ağırlıkça yüzde oranlarının hesabı;

$$\% \text{ Epoksi} = \frac{4.55}{16.50} \times 100 = \%27.58 \quad (4.2a)$$

$$\% \text{ Elyaf} = \frac{11.95}{16.50} \times 100 = \%72.42 \quad (4.2b)$$

[±45°] numunesinin ağırlıkça yüzde oranlarının hesabı;

$$\% \text{ Epoksi} = \frac{5.01}{17.07} \times 100 = \%29.35 \quad (4.3a)$$

$$\% \text{ Elyaf} = \frac{12.06}{17.07} \times 100 = \%70.65 \quad (4.3b)$$

[±55°] numunesinin ağırlıkça yüzde oranlarının hesabı;

$$\% \text{ Epoksi} = \frac{4.03}{15.73} \times 100 = \%25.62 \quad (4.4a)$$

$$\% \text{ Elyaf} = \frac{11.70}{15.73} \times 100 = \%74.38 \quad (4.4b)$$

[±75°] numunesinin ağırlıkça yüzde oranlarının hesabı;

$$\% \text{ Epoksi} = \frac{3.70}{15.24} \times 100 = \%24.28 \quad (4.5a)$$

$$\% \text{ Elyaf} = \frac{11.54}{15.24} \times 100 = \%75.72 \quad (4.5b)$$

[±90°] numunesinin ağırlıkça yüzde oranlarının hesabı;

$$\% \text{ Epoksi} = \frac{4.47}{15.92} \times 100 = \%28.08 \quad (4.6a)$$

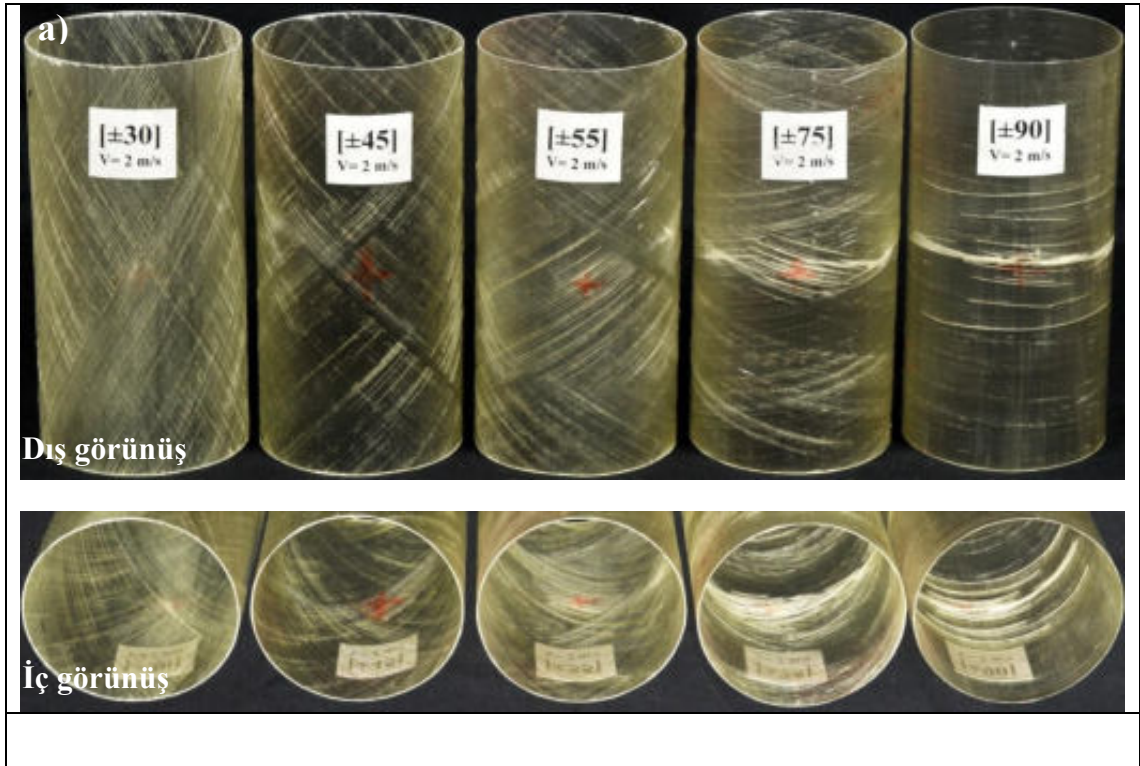
$$\% \text{ Elyaf} = \frac{11.45}{15.92} \times 100 = \%71.92 \quad (4.6b)$$

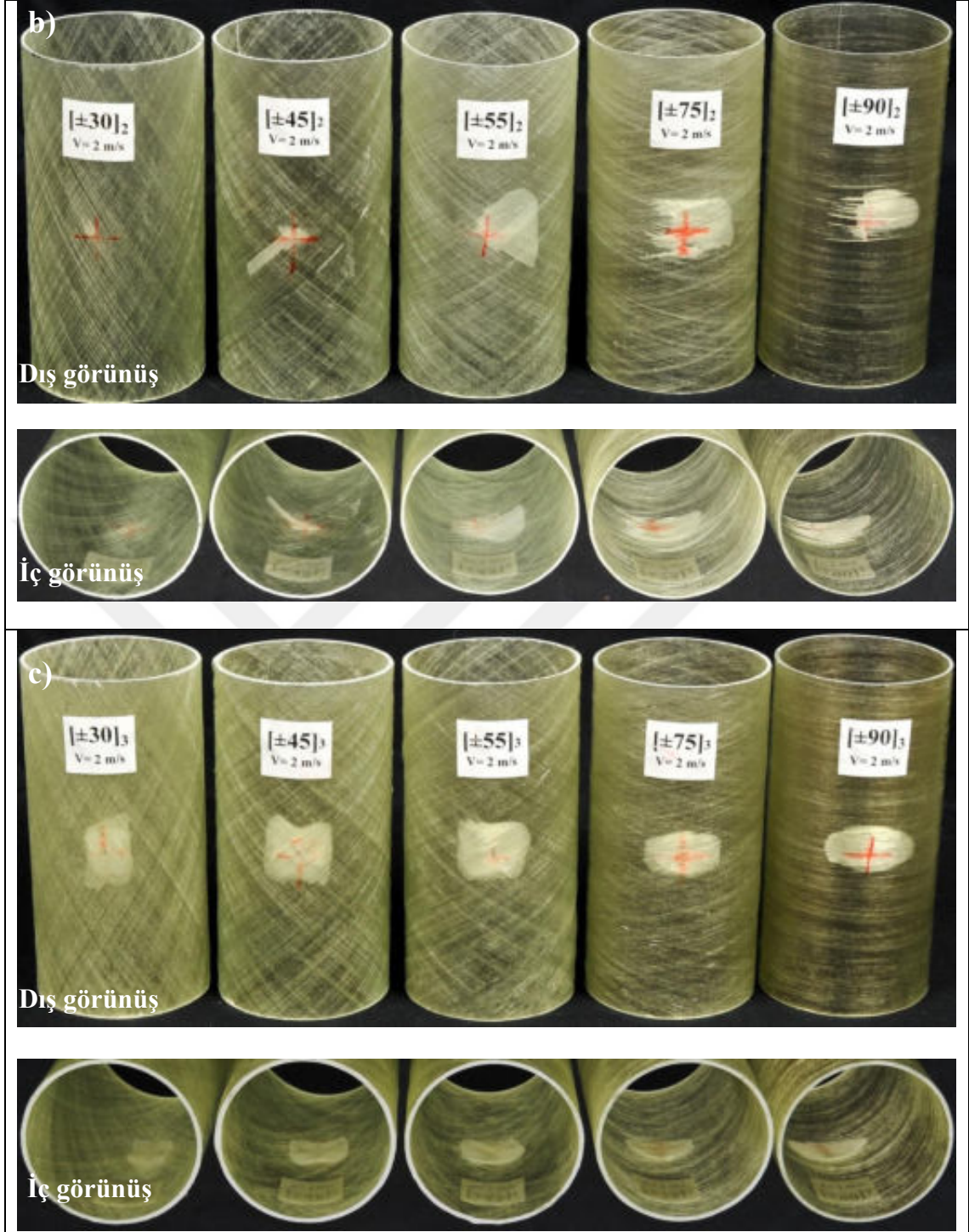
4.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi Sonuçları

Bu çalışmada, CTP boruların elyaf sarım açısının ve tabaka sayısının düşük hızlı darbe cevabına etkisini inceleyebilmek için impaktör (vurucu) temas hızı 2 m/s olarak sabit tutulmuştur. Darbe enerji değerlerini elde edebilmek için vurucu kütlelerinin

birakılacağı yükseklik teorik olarak hesaplanmıştır. 24 mm çapında yarı küresel çelik vurucu; 2 m/s hız ve 11.2 J enerji seviyesi için 0.204 m yükseklikten düşürülmüştür. 60° açılı V yatağı üzerine yerleştirilen numunelere yarı küresel çelik uçlu vurucu ile düşük hızlı darbeye maruz bırakılmıştır. Darbe enerjisiyle, darbe sonrası numunede oluşan hasar mekanizmalarının ilişkilendirilebilmesi için ilk darbeyi yaptıktan sonra vurucu kütlesi pnömatik pistonlarla tutularak tekrarlı darbeler engellenmiştir. Darbenin başlangıcından sonuna kadar kuvvet değişim verileri kuvvet algılayıcı tarafından elektronik aksama iletilmiştir. Bu veriler Signal Express yazılımı ile elde edilen, kuvvetin zamana göre değişim grafiğinde gösterilmiştir. Temas kuvveti-yer değiştirme (çökme), ve hız-zaman değişimleri düşük hızlı darbenin kinetik analizi neticesinde elde edilmiştir.

Farklı sarım açılarında üretilen boruların düşük hızlı darbe sonrası oluşan hasarların incelenmesi ve bu hasarların kompozit borunun mukavemet kayıplarına etkisinin araştırılması için 2, 4 ve 6 tabaka sayılarında üç farklı kalınlıklarda kompozit borular üretilmiştir. Düşük hızlı darbe hasarının etkisinin incelenmesi amacıyla, yukarıda belirtilen sarım açısı ve tabaka sayılarında borular üzerine ASTM D 7136 standardına göre, 2 m/s hızında darbe uygulanmış ve ön hasar oluşturulmuştur. Düşük hızlı darbe testleri 3 tekrarlı olarak yapılmıştır. Darbe hasarlı borular Şekil 4.1'de toplu olarak verilmiştir.





Şekil 4.1. Farklı sarım açılarının sahip a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı CTP kompozit boruların darbe sonrası hasarlı iç/dış görünüşleri

Deney verileri sonucu kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve absorbe edilen enerji-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Deney sonrası elde edilen tepe kuvvet, toplam süre, tepe deplasman, toplam impuls, toplam enerji ve absorbe edilen enerji verilerinin ortalama değerleri Çizelge 4.2’de toplu olarak verilmiştir. Bu verilerle deney sırasında ve sonrasında çekilen görselleri ile birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Çizelge 4.2 Düşük hızlı darbe sonrası elde edilen veriler

Tabaka sayısı	CTP borunun sarım açısı	Darbe hızı (m/s)	Tepe kuvvet (N)	Toplam süre (s)	Tepe deplasman (m)	Toplam impuls (Ns)	Toplam enerji (J)	Absorbe edilen enerji (J)
2	[±30°]	2	370.73	0.0665	0.0503	16040.172	11.2	11.160
4	[±30°] ₂	2	1402.72	0.0227	0.0139	11384.882	11.2	2.956
6	[±30°] ₃	2	2155.27	0.0132	0.0073	4758.161	11.2	7.527
2	[±45°]	2	669.53	0.0575	0.0320	25174.343	11.2	3.694
4	[±45°] ₂	2	1648.96	0.0185	0.0114	9063.572	11.2	3.751
6	[±45°] ₃	2	2199.54	0.0131	0.0075	5104.658	11.2	6.854
2	[±55°]	2	711.03	0.0572	0.0315	24337.610	11.2	4.056
4	[±55°] ₂	2	1554.89	0.0207	0.0123	9520.874	11.2	4.260
6	[±55°] ₃	2	2063.97	0.0145	0.0078	4883.024	11.2	7.847
2	[±75°]	2	666.77	0.0627	0.0294	22151.737	11.2	5.678
4	[±75°] ₂	2	1399.95	0.0221	0.0120	8623.011	11.2	6.134
6	[±75°] ₃	2	2279.77	0.0127	0.0069	4301.451	11.2	8.011
2	[±90°]	2	509.06	0.0956	0.0368	38313.388	11.2	3.137
4	[±90°] ₂	2	1394.42	0.0234	0.0121	8681.244	11.2	6.467
6	[±90°] ₃	2	2393.21	0.0125	0.0068	4486.378	11.2	7.397

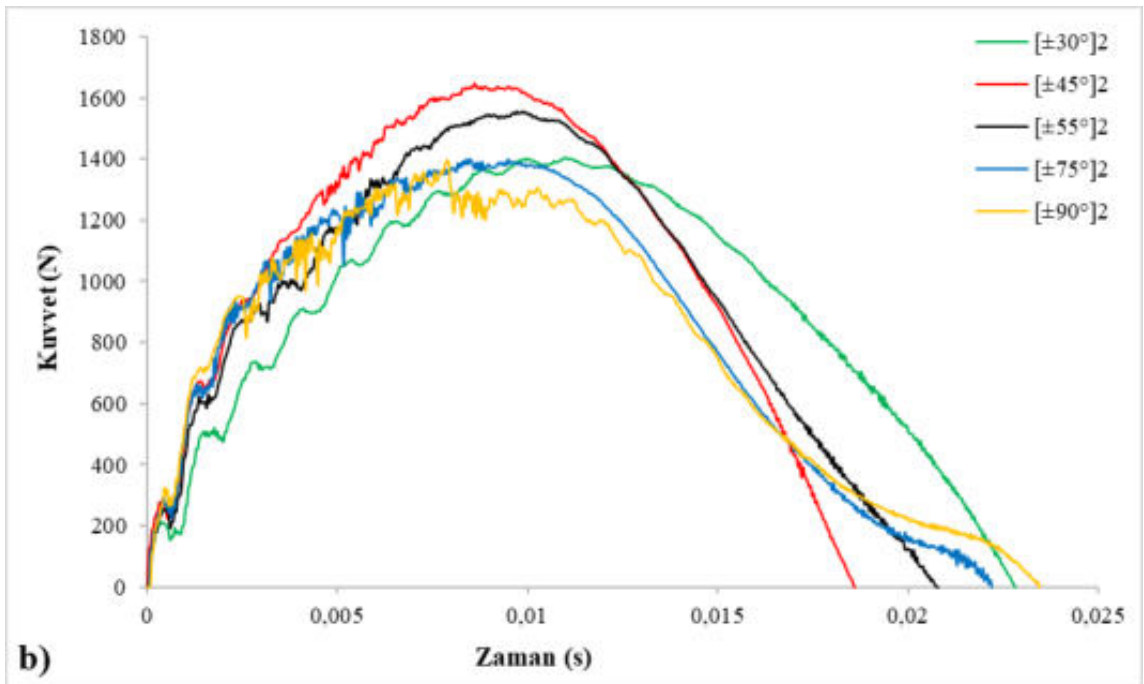
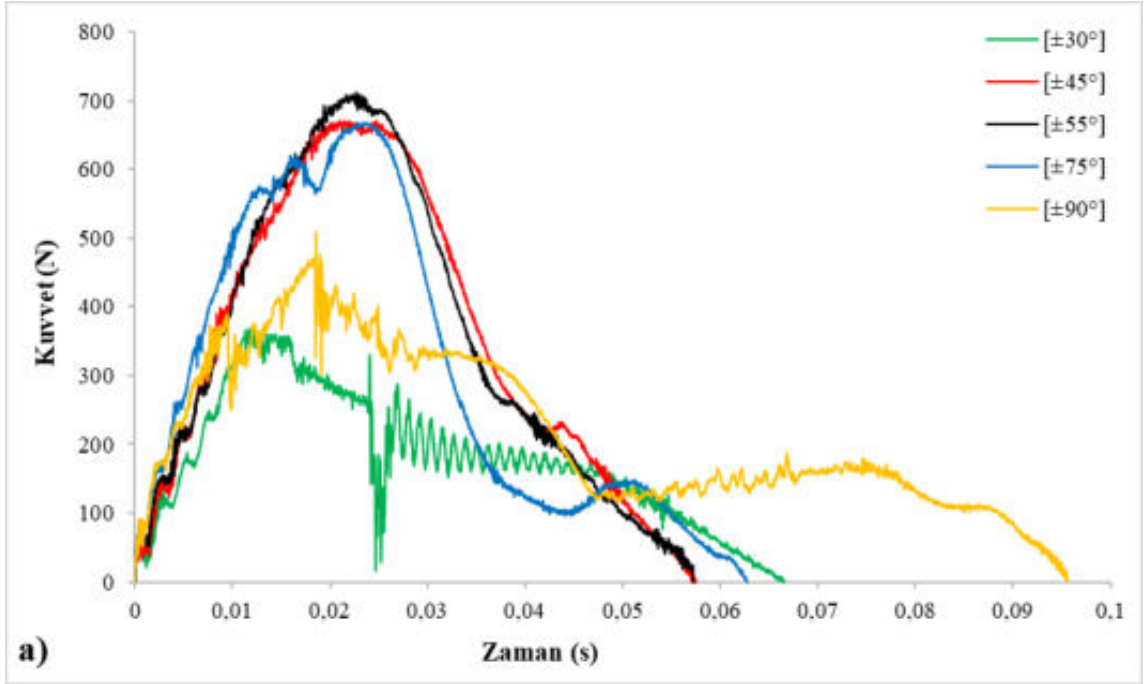
4.2.1. Numunenin hasar davranışına tabaka sayısının etkisi

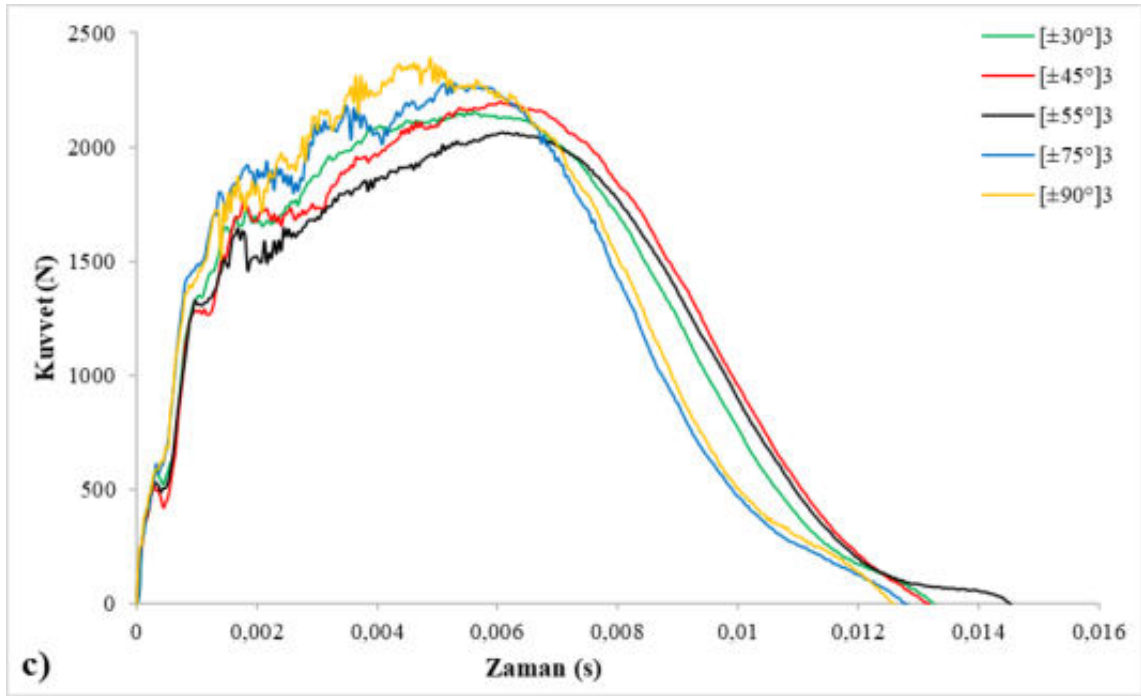
Bu bölümde farklı tabaka sayılarının numunelerin darbe davranışına etkisi incelenmiştir. Kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman grafikleri bu doğrultuda yorumlanmıştır.

4.2.1.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

2, 4 ve 6 tabakalı ±30°, ±45°, ±55°, ±75° ve ±90° sarım açısına sahip CTP borularına 2 m/s hızında gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneyi ile elde edilen kuvvet-zaman grafikleri toplu olarak Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen temas kuvveti-zaman değişim grafiklerinin çan eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bu eğriler incelendiğinde,

yüklemeye bir artma kısmına, ulaşılan en büyük bir temas kuvveti değerine ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Bu veriler yarı küresel vurucunun numuneye temasından sonra numune üzerinde biriken enerjinin etkisi ile vurucunun geri sekmesinden elde edilen grafiklerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune üzerinde hasarların oluşumu esnasında kompozit boru tarafından yutulmuş geri kalan enerji ise vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır.





Şekil 4.2. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı ($\pm 30^\circ$), ($\pm 45^\circ$), ($\pm 55^\circ$), ($\pm 75^\circ$), ($\pm 90^\circ$) elyaf sarım açısına sahip numunelerin zamana göre temas kuvvetindeki değişimi gösteren grafikler

Grafikler incelendiğinde, yükleme esnasında artış kısmından sonra oluşan salınımlar numuneler üzerinde uygulanan temas hızının etkisi ile oluşan enerjinin darbe bölgesinde kompozit boru cidarında hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir (Wang ve Vu-Khanh, 1994). Temas kuvvetinin artışı ile numunede oluşan çökme miktarı artmış dolayısıyla bu durum hasar miktarını da artırmıştır. Temas kuvveti en büyük değerine ulaşıncaya kadar hasar gelişiminin hızla devam ettiği düşünülmektedir (Gemi, 2014; Gemi, 2019; Gemi ve ark., 2021). Darbe etkisi ile farklı tabakalardaki CTP boruların davranışı Şekil 4.2’de verilen Kuvvet-Zaman grafiklerinde gözle görülür derecede belirgindir. Tabaka sayısındaki artış temas kuvvetinde artışa ve temas süresinde azalışa neden olduğu görülmektedir. Bu durum CTP borularının tabaka sayısındaki artışın darbe davranışını etkilediğini göstermektedir. Şekil 4.2a’da verilen 2 tabakalı numunelerin Kuvvet-Zaman grafikleri Şekil 4.1 ve Çizelge 4.2 ile birlikte incelendiğinde sarım açısının darbe cevabını önemli bir şekilde etkilediği görülmektedir. Darbe deneyleri esnasında 2 tabakalı bütün numunelerde tabaka sayısının düşük olmasından dolayı burkulma hasarları görülmesine rağmen $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde bilindik kuvvet-deplasman grafiği elde edilmiştir. Fakat sarım açısının etkisi ile $\pm 30^\circ$ numunesinde sarım açısından kaynaklı olarak burkulma boru eksenini doğrultusunda daha fazla oluşmuş ve normal bir grafik elde edilememiştir. Benzer bir

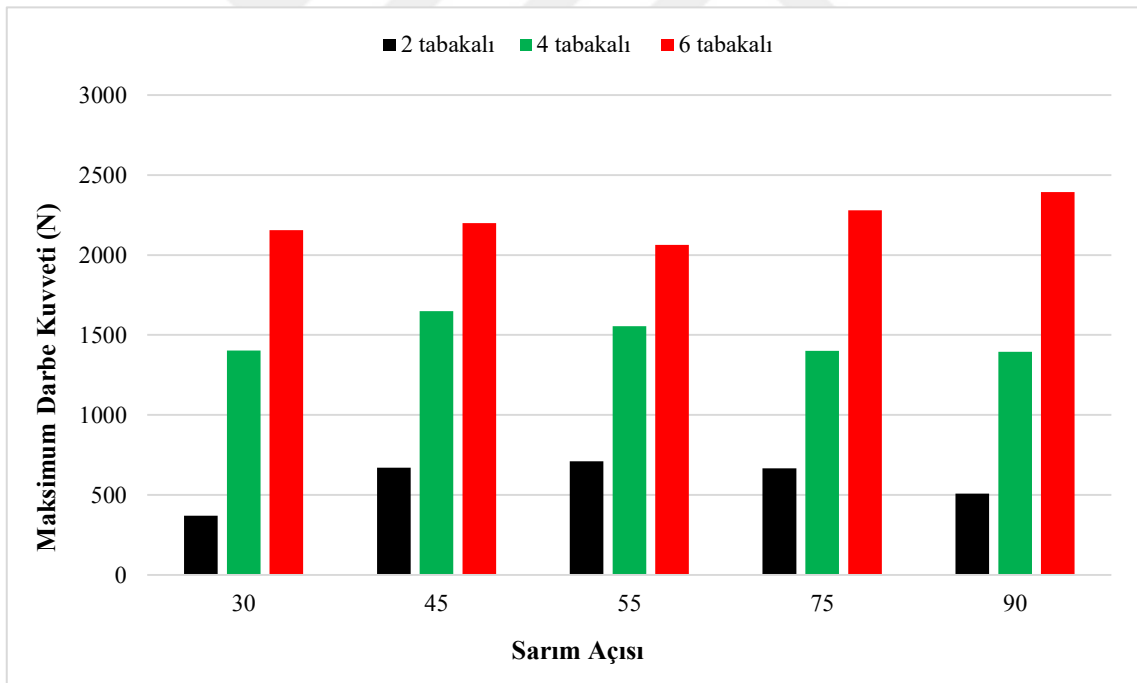
durum $\pm 90^\circ$ CTP numunesinde burkulma sarım açısı doğrultusunda gerçekleşmiş, darbe hızının etkisi ile vurucunun numuneye nüfuziyeti artmış ve elyaf doğrultusunda yarıлма hasarları gerçekleşmiştir (Şekil 4.1a). Bu durumda da normal bir kuvvet-zaman grafiği elde edilememiştir. Şekil 4.2a'dan da anlaşıldığı üzere iki tabakalı numunelerde $\pm 55^\circ$ numunesinde en yüksek (711.03 kN) ve $\pm 30^\circ$ numunesinde en düşük temas kuvveti elde edilmiştir (370.73 kN).

Şekil 4.2b'de verilen 4 tabakalı numuneler incelendiğinde, tabaka artışının etkisi ile CTP borularda yapısal rijitliğin arttığı ve bununla beraber darbe cevaplarının da değiştiği görülmektedir. 4 tabakalı numunelerde bütün sarım açılarında benzer bir Kuvvet-Zaman grafiği elde edilmiş olmasına rağmen bazı sarım açılarında darbe cevabı ve deplasman değerlerinde belirgin farklılıklar mevcut olduğu görülmüştür. $\pm 30^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip numunelerde birbirine yakın düşük tepe kuvvet ve yüksek deplasman değerleri elde edilirken, $\pm 45^\circ$ ve $\pm 55^\circ$ sarım açılarındaki CTP borularda farklı bir darbe cevabı elde edilmiştir. 4 tabakalı $\pm 45^\circ$ sarım açılı numunelerde en yüksek tepe kuvvet (1648.96 N) ve en düşük deplasman (0.0114 m) değerleri elde edilmiştir. Bunu takiben $\pm 55^\circ$ sarım açılı numunelerde 1554.89 N ortalama tepe kuvvet ve 0.0315 m deplasman değerleri elde edilmiştir.

4 tabakalı numuneler hasar gelişimi açısından incelendiğinde; Şekil 4.1b'den de anlaşıldığı üzere sarım açısı değişiminden kaynaklı olarak CTP borularda oluşan hasarlar farklılık göstermektedir. Sarım açısının artışıyla numune üzerinde oluşan delaminasyon hasar alanlarında artış olduğu ve oluşan hasar modlarının değiştiği görülmüştür. $\pm 30^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ sarım açılı numunelerde oluşan hasar alanları darbe noktasında dar bir alanda oluşurken, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ numunelerde hasar delaminasyon hasarı yoğunluğunda daha geniş alanlarda gerçekleşmiştir. $\pm 55^\circ$ sarım açılı numunede yoğun delaminasyon hasarı oluşurken, artan sarım açılarında delaminasyon hasarının azaldığı ve elyaf sarım açısı doğrultusunda yarıлма hasarlarının belirginleştiği görülmüştür. Özellikle $\pm 90^\circ$ sarım açılı numunede delaminasyon hasarı ile birlikte yoğun yarıлма hasarlarının oluştuğu görülmüştür. Bu durumun Kuvvet- Zaman grafiğinden de anlaşılacağı üzere en düşük tepe kuvvetinin ve en yüksek deplasman değerinin elde edilmesine yol açtığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.2c'de verilen 6 tabakalı numunelere ait Kuvvet-Zaman grafikleri incelendiğinde, düşük hızlı darbe deneylerinde tabaka artışının etkisi 2 ve 4 tabakalı numunelere kıyasla daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Elde edilen Kuvvet-Zaman grafikleri tabakalı kompozitlerde beklenen en uygun eğrileri vermiş gerek sarım açısının

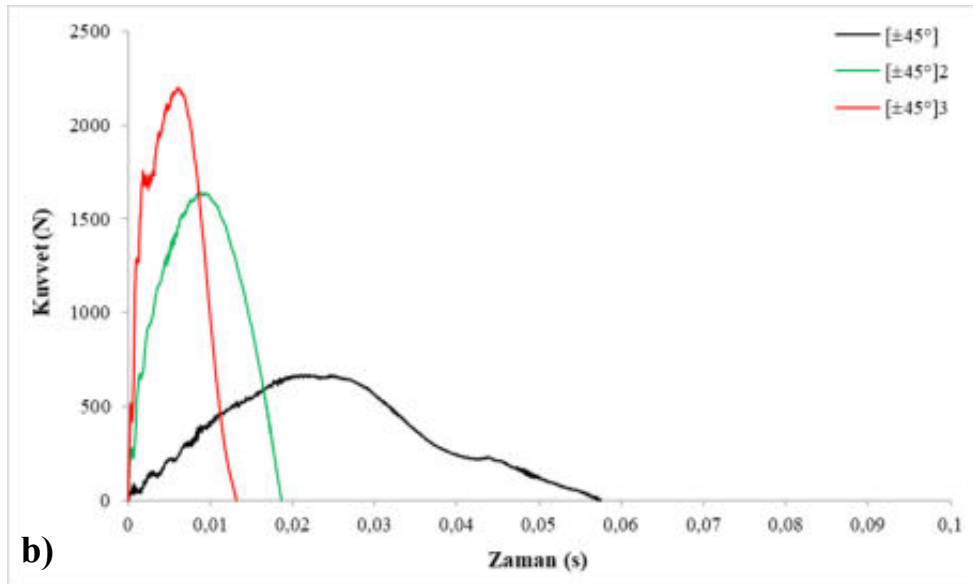
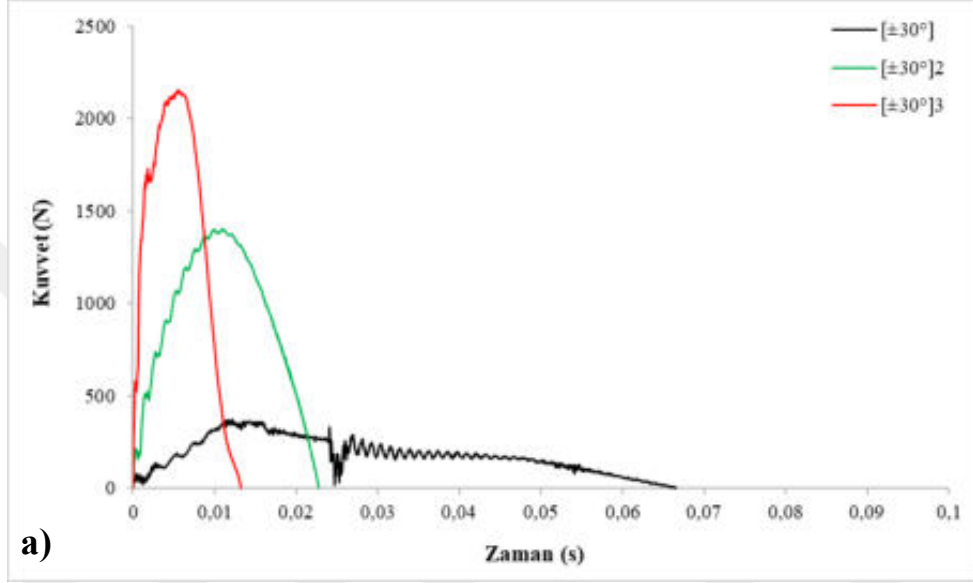
etkisi ve gerekse oluşan hasarların gelişimine temsil edecek salınımlara sahip olduğu görülmüştür. Tabaka artışı ile beraber CTP borularda yapısal rijitliğin arttığı ve bununla beraber darbe cevaplarının da değiştiği görülmüştür. Çizelge 4.2, Şekil 4.2c ve Şekil 4.3 birlikte incelendiğinde; 6 tabakalı numunelerde genel olarak sarım açısının artışı ile beraber Kuvvet-Zaman grafiklerinde tepe kuvvetlerinin de arttığı görülmektedir. Sadece $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip numunede diğerlerinden farklı olarak en düşük tepe kuvvete (2063.97 N) ve en yüksek deplasman (0.0078 m) değerleri elde edilmiştir. Tabaka artışı ile beraber farklı sarım açılarına sahip CTP borular da oluşan darbe cevabı özellikle hasar gelişim bölgelerinde sarım açısının karakteristik özelliklerini sergileyecek davranışlar sergilemiştir. 6 tabakalı bütün numuneler hasar açısından incelendiğinde; darbe noktalarında delaminasyon hasar bölgelerinin sarım açısına bağlı değişiklikler ile beraber düzenli bir hasar alanına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.1c'de görüldüğü üzere, oluşan delaminasyon alanlarının darbe merkezi etrafında elyaf sarım açıları doğrultusunda yöneldiği ve CTP boru kesitinde çoklu tabakalarda gerçekleştiği anlaşılmıştır.

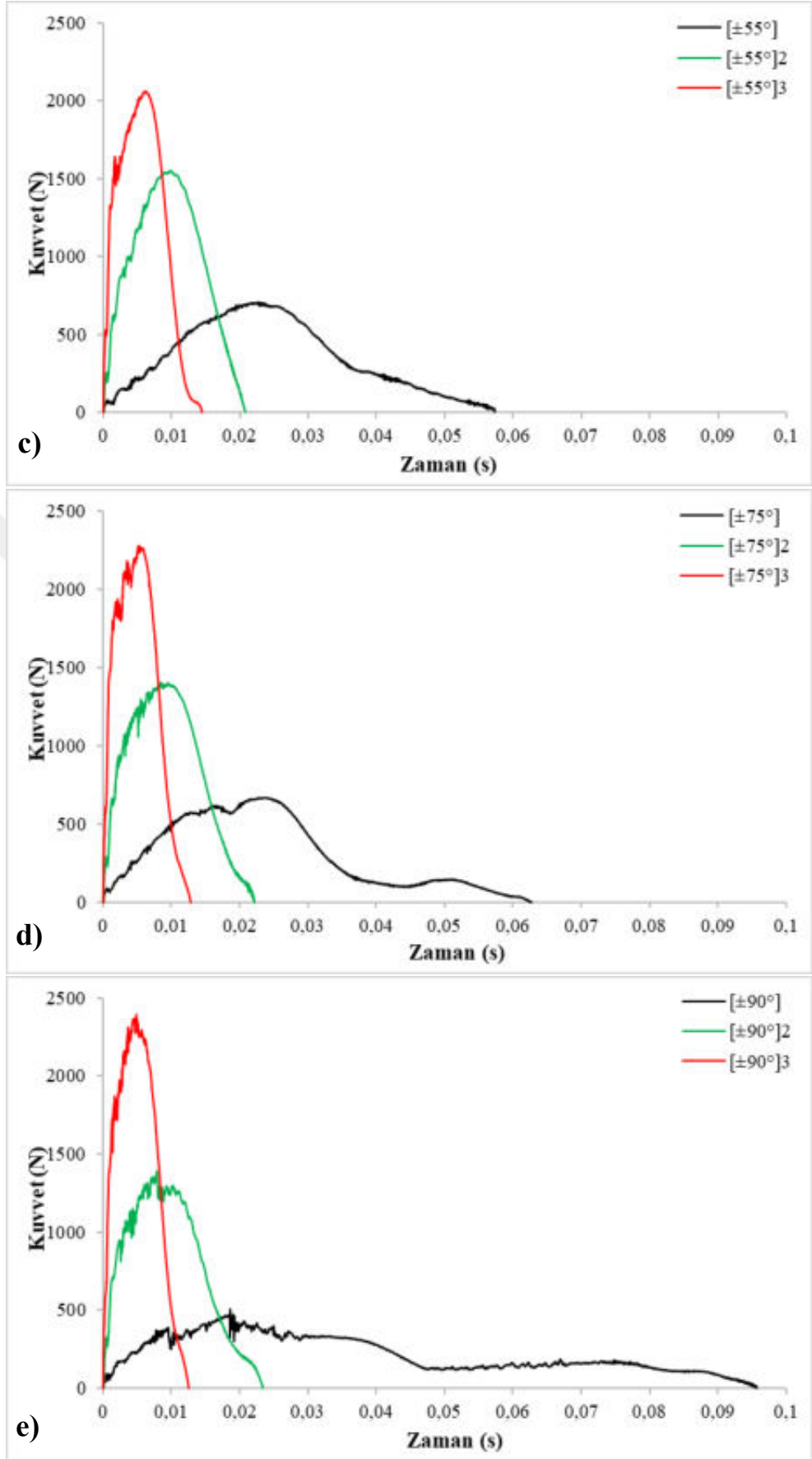


Şekil 4.3. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde maksimum darbe kuvvetlerini gösteren sütun grafiği

Şekil 4.4'te düşük hızlı darbe sonucu elde edilen kuvvet-zaman grafiklerinde sarım açılarının tabaka sayılarına göre değişimleri toplu olarak verilmiştir. Bu grafiklerin tamamı vurucunun numune yüzeyine temasından sonra yüzeyden geri sekmesiyle oluşan grafiklerdir. Genel olarak görülmektedir ki tabaka sayısındaki artış temas kuvvetini

arttırırken temas süresini azaltmıştır. Bunun sebebi tabaka sayısındaki artışın vurucunun temas noktasındaki nüfuziyetini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, tabaka sayısının artışı ile CTP boruların eğilme rijitliklerinin arttığı ve numuneler üzerinde oluşan hasarların vurucunun nüfuz ettiği belli bir alanda yoğunlaştığı görülmektedir. Tabaka sayısının artışı ile oluşan hasarların yarıлма hasarından delaminasyon hasarına doğru değiştiği görülmektedir (Şekil 4.1b,c).

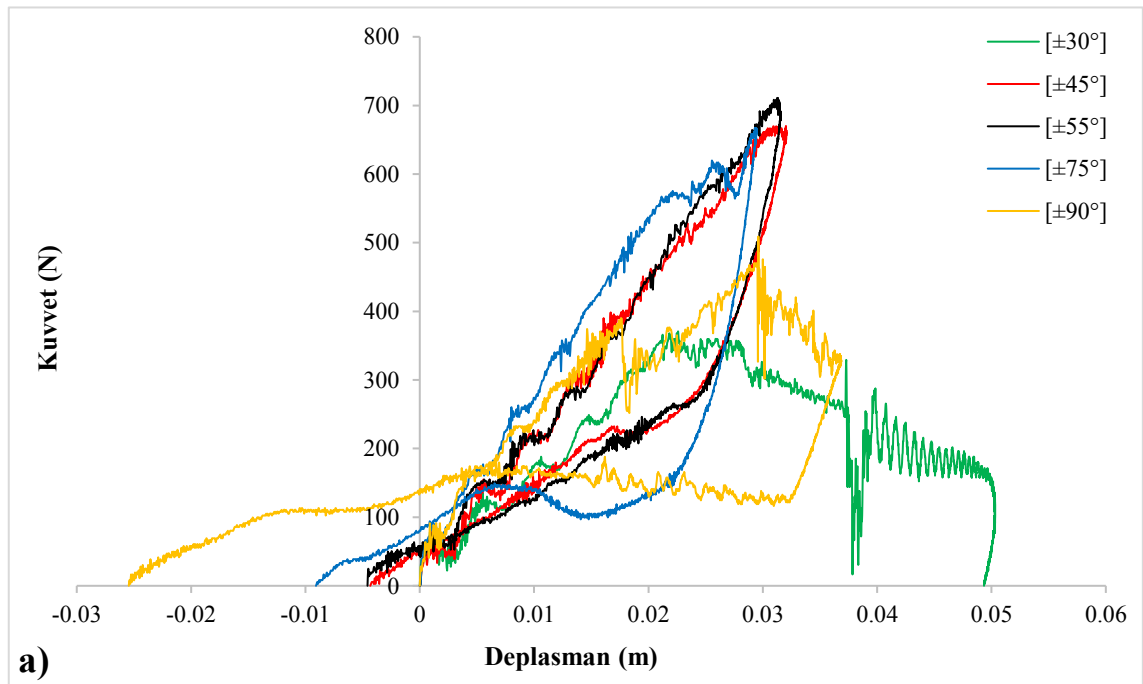


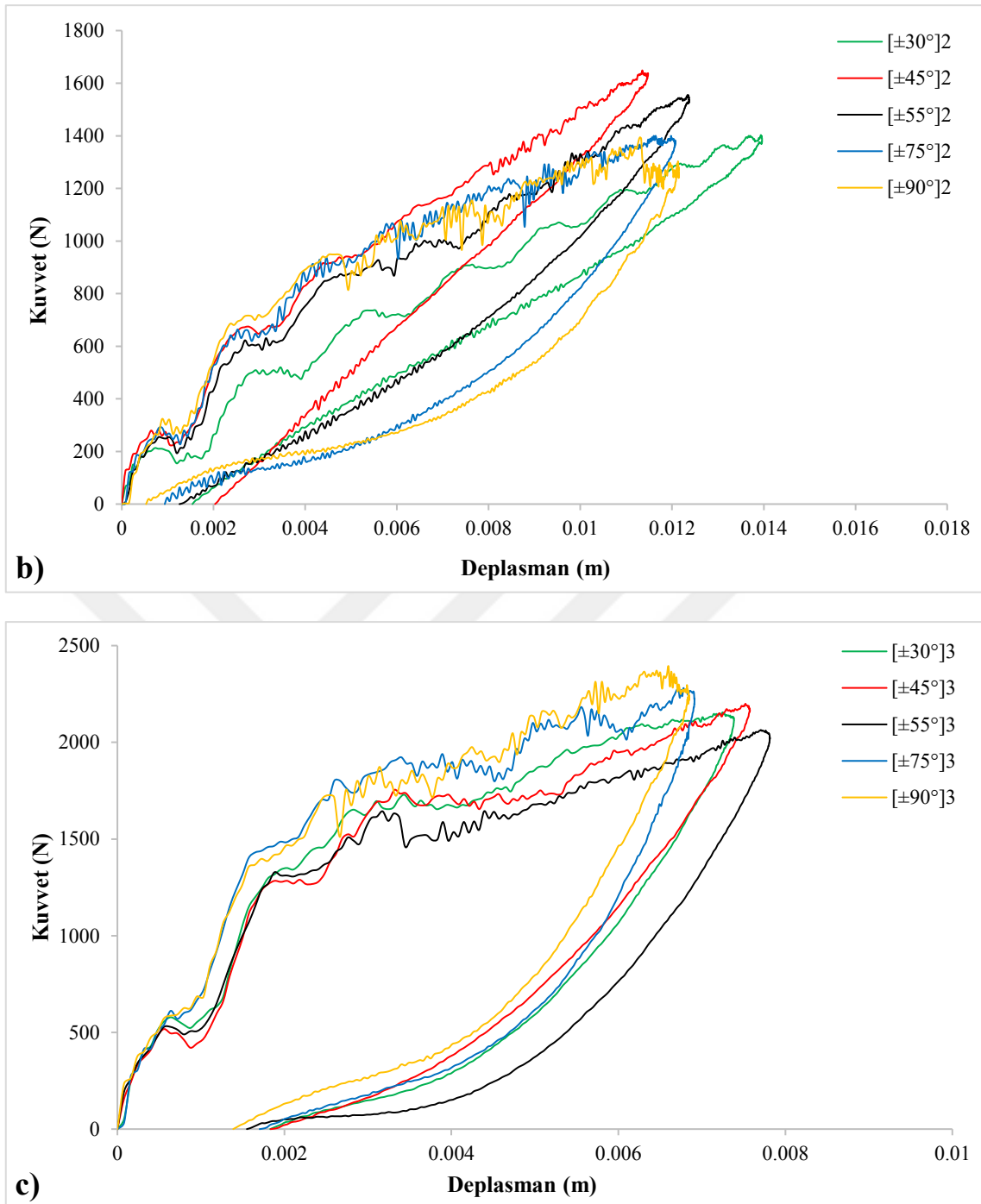


Şekil 4.4. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren temas kuvveti-zaman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$

4.2.1.2. Temas kuvveti-deplasman değişimi

Düşük hızlı darbe sonrası kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-deplasman (kuvvet-çökme) değişim grafikleridir. 2, 4 ve 6 tabakalı $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip CTP borularına 2 m/s hızında gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneyi sonrası elde edilen Kuvvet-Deplasman grafikleri toplu olarak Şekil 4.5'te verilmiştir. Darbe sırasında vurucunun numuneye temasıyla numunede deplasman (çökme) başlamış ve kuvvet en büyük değerine ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Temas kuvvet-yer değiştirme eğrisinde artma kısmındaki eğim darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu dirençten dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Eğilme rijitliğindeki salınımlar ve değişimler numunede oluşan hasarlanmayı göstermektedir. CTP boruların sarım açısı değişimi ve özellikle tabaka sayısı artışında numunelerin eğilme rijitliklerinde büyük farklılıkların ortaya çıktığı gözlenmiştir. Oluşan grafiklerin tamamında kapalı tip eğri oluşmuştur. Bu da darbe enerjisinin büyük bir kısmının numune tarafından emildiğini ve geri kalan enerjinin ise vurucunun geri sekmesi için kullanıldığı anlamına gelmektedir (Gemi, 2018). Kuvvet-Deplasman grafikleri incelendiğinde genel olarak tabaka sayısındaki artışın temas kuvvet değerlerini önemli derecede arttırdığı ve deplasmanları da azalttığı görülmektedir.





Şekil 4.5. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı ($\pm 30^\circ$), ($\pm 45^\circ$), ($\pm 55^\circ$), ($\pm 75^\circ$), ($\pm 90^\circ$) elyaf sarım açısına sahip numunelerin temas kuvveti-deplasman grafikleri

Grafik ve hasar gelişimi yorumları Şekil 4.1, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Çizelge 4.2 karşılaştırmalı olarak birlikte incelenerek yapılmıştır. 2 tabakalı numuneler için Şekil 4.5a ve Şekil 4.1a birlikte incelendiğinde; genel olarak bütün 2 tabakalı numunelerde darbe esnasında burkulma gözükmesine rağmen $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri benzer bir davranış sergilemiştir. Bunlardan farklı olarak $\pm 30^\circ$ sarım açılı numunede sarım açısının boru eksenine daha paralel olması burkulma miktarını

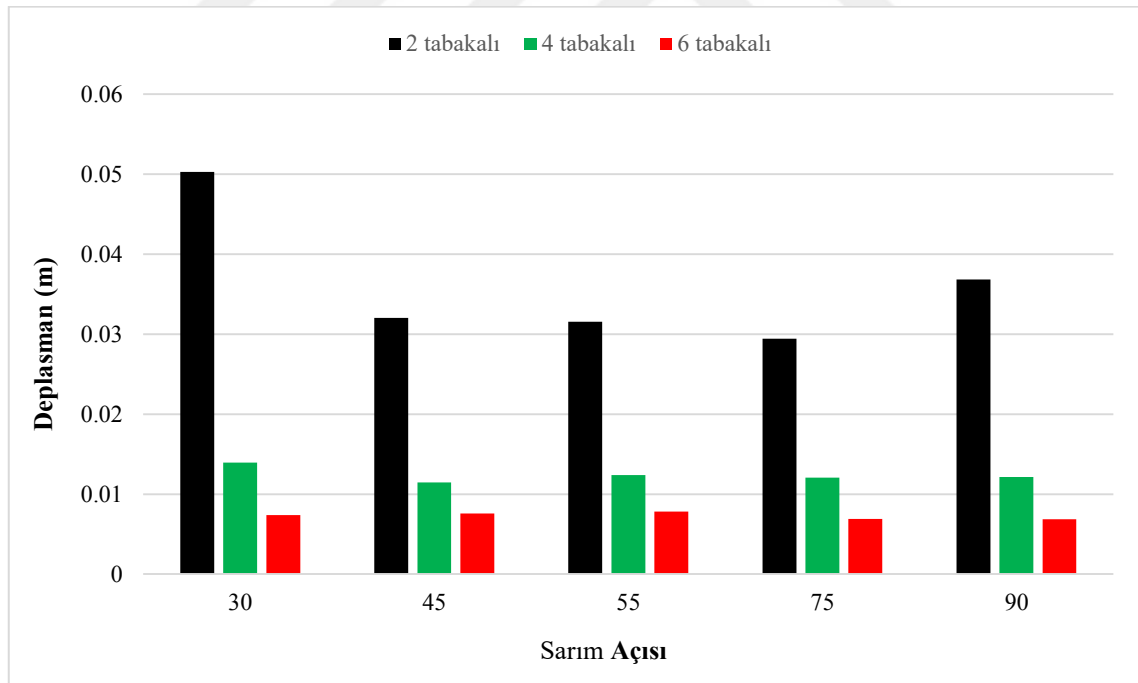
artırmış ve boru yüzeyinde burkulmanın etkisi ile elyaf doğrultusunda yoğun matris çatlaklarına yol açmıştır. Benzer bir durum $\pm 90^\circ$ sarım açılı numunede de darbe bölgesinde lokal burkulma şeklinde gerçekleşmiştir. Boru eksenine dik olan elyaflar darbenin etkisi ile darbe noktasında yoğun olmakla beraber darbe çevresinde elyaf doğrultusunda yarılma şeklinde hasara uğramıştır. Her iki numunede de beklenmedik deplasman ve hasar gelişimi kuvvet-deplasman grafiklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Sarım açısının artışı ile birlikte deplasmanda azalma görülürken oluşan hasarlar elyaf doğrultusunda matris çatlamlarından yarılma hasarına doğru yöneldiği görülmüştür.

Şekil 4.1b, Şekil 4.5b ve Şekil 4.6 4 tabakalı numuneler için birlikte incelendiğinde; tabaka sayısı artışı ile 2 tabakalı numunelere göre kuvvet-deplasman grafikleri daha düzenli bir eğilim sergilemiştir. Bu tabaka şartlarında da sarım açısından kaynaklı olarak $\pm 30^\circ$ sarım açısına sahip CTP boru numunesi en yüksek deplasmanı yapmıştır. Diğer numunelerin deplasman değerleri birbirine yakın oluşmakla beraber eğilme rijitliklerinde ve hasar oluşumunu temsil eden salınımlarda farklılıklar gözlenmiştir. $\pm 30^\circ$ sarım açısına sahip numunede lokal burkulmadan dolayı eğilme rijitliği en düşük numune olarak görülürken, $\pm 45^\circ$ 'lik numune en yüksek eğilme rijitliğine sahip olmuştur. Hasar gelişimi açısından incelediğimizde, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açılı numunelerde eğilme rijitliğindeki salınımların fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, özellikle $\pm 90^\circ$ 'lik numunede olmak üzere delaminasyon hasarları ile beraber elyaf doğrultusunda yarılma hasarlarının da oluşması salınımların artmasına sebep olmuştur. Bu salınımların ve kuvvet-deplasman grafik alanının fazla olması enerjinin çoğunun hasarın oluşumuna harcadığını göstermektedir. Bu durum enerji-zaman grafikleri incelendiğinde daha iyi anlaşılacaktır.

Şekil 4.1c, Şekil 4.5c ve Şekil 4.6 6 tabakalı numuneler için birlikte incelendiğinde; 2 ve 4 tabakalı numuneler ile karşılaştırıldığında, bütün numunelerde tepe kuvvet değerlerinde artış gözlenirken deplasman değerlerinde önemli derecede azalma görülmüştür. Tabaka sayılarının artmasından kaynaklı olarak Kuvvet-Deplasman grafikleri şekilsel olarak birbirine benzer ve daha anlamlı hale gelirken sarım açısının etkisi ile eğilme rijitliklerin de farklılıklar gözlenmiştir. $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip numuneler en yüksek eğilme rijitliğine sahip olurken deplasmanlarının düştüğü görülmektedir. Çizelge 4.2 ve Şekil 4.5'te de görüldüğü üzere, $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip numune diğer numunelere göre en düşük tepe kuvvette (2063.97 N) ve en yüksek deplasman (0.0078 m) değerine ulaşmıştır. Hasar gelişimi açısından değerlendirildiğinde; Şekil 4.1c incelendiğinde eğilme rijitlikleri yüksek, deplasman değeri düşük olan $\pm 75^\circ$ ve

$\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip numuneler de oluşan delaminasyon alanlarının diğer numunelere göre azaldığı anlaşılmaktadır. 6 tabakalı bütün numunelerde sarım açısına bağlı değişikliklerle beraber numune kesitlerinde tabakalar arası delaminasyon hasarlarının belirginleştiği görülmüştür.

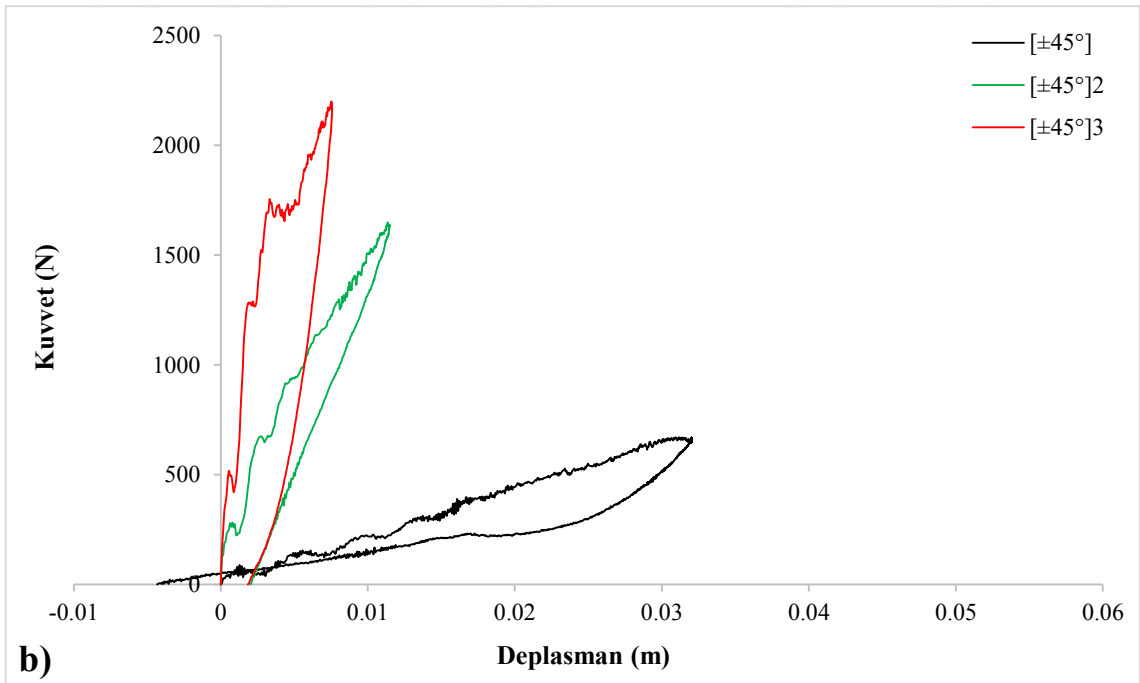
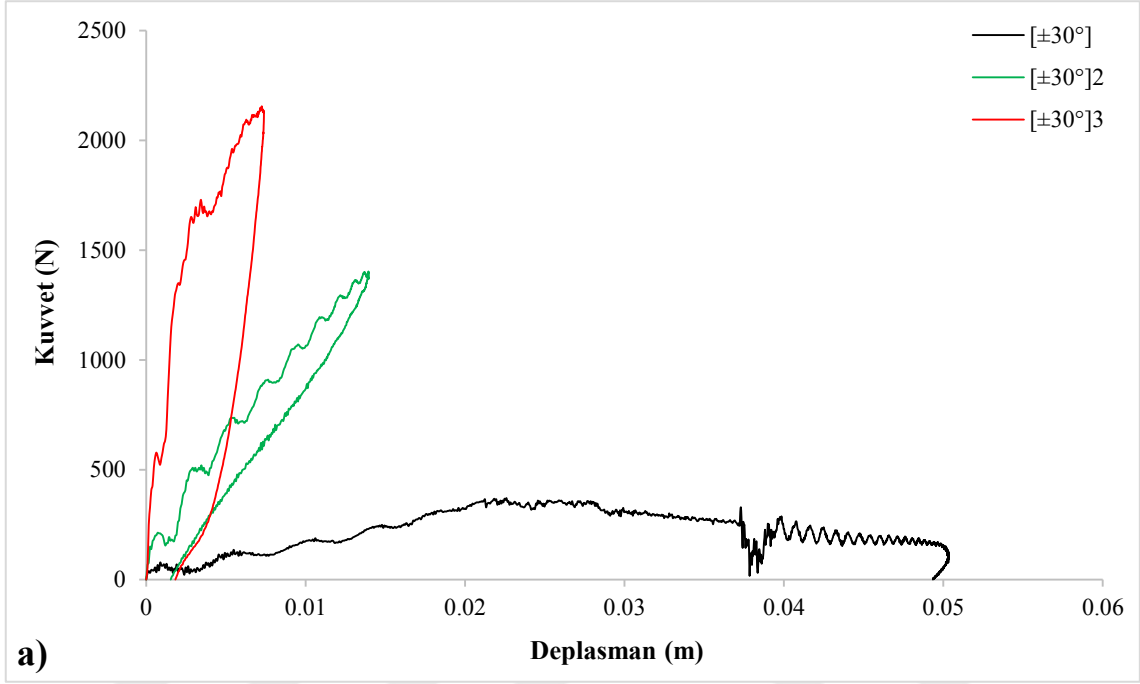
Şekil 4.6'da sarım açısına ve tabaka sayısına bağlı tepe deplasman değerleri karşılaştırmalı olarak çubuk grafik şeklinde verilmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere tabaka sayısının artışı burkulmayı önlemiş ve genel olarak deplasman değerlerinde düşüşe sebep olmuştur. Bilindiği üzere tabakalı kompozitlerde özellikle düşük hızlı darbe deneylerinde hasarın gelişimi impaktörün numune üzerinde yapmış olduğu deplasman miktarına bağlı olarak ilerlemektedir. Yani hasar oluşumu deplasman kontrollü olarak gerçekleşmektedir. Özellikle 6 tabakalı numunelerde tabaka sayısının artışı genel olarak numunelerin rijitliklerini artırmış ve deplasman değerleri azaltarak birbirine yakın olmasını sağlamıştır. Aynı sarım açıları kendi içinde tabaka sayısı artışı dikkate alınarak incelendiğinde, $\pm 30^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip numunelerde tabaka artışının deplasman değerini önemli derecede azalttığı görülmektedir.

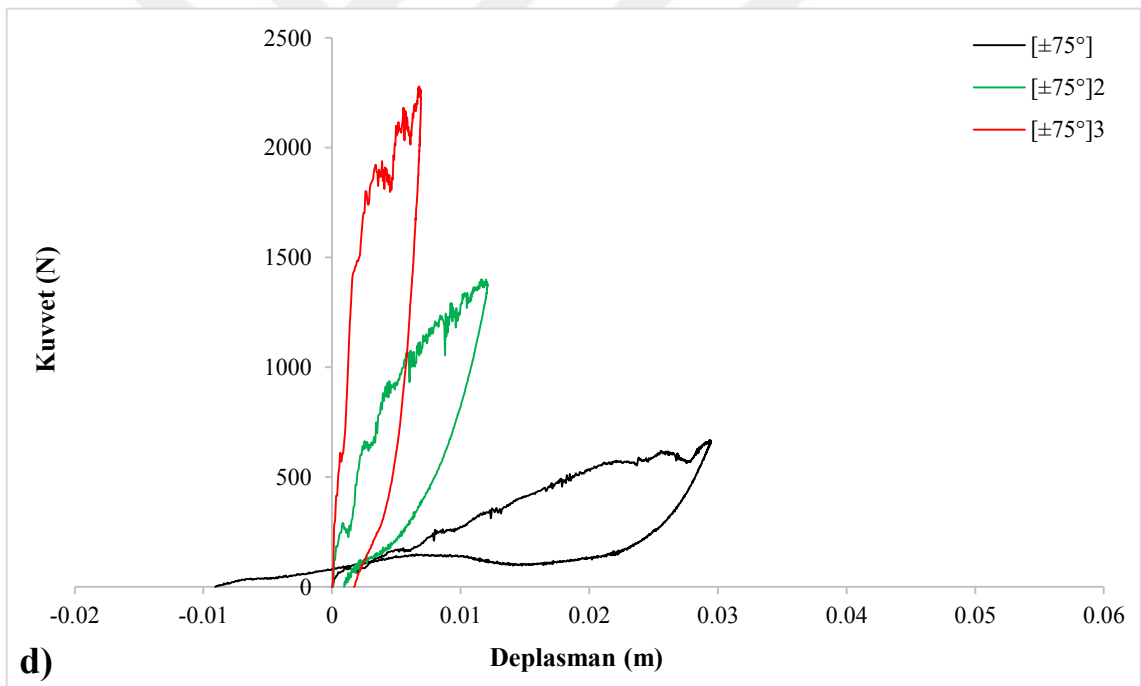
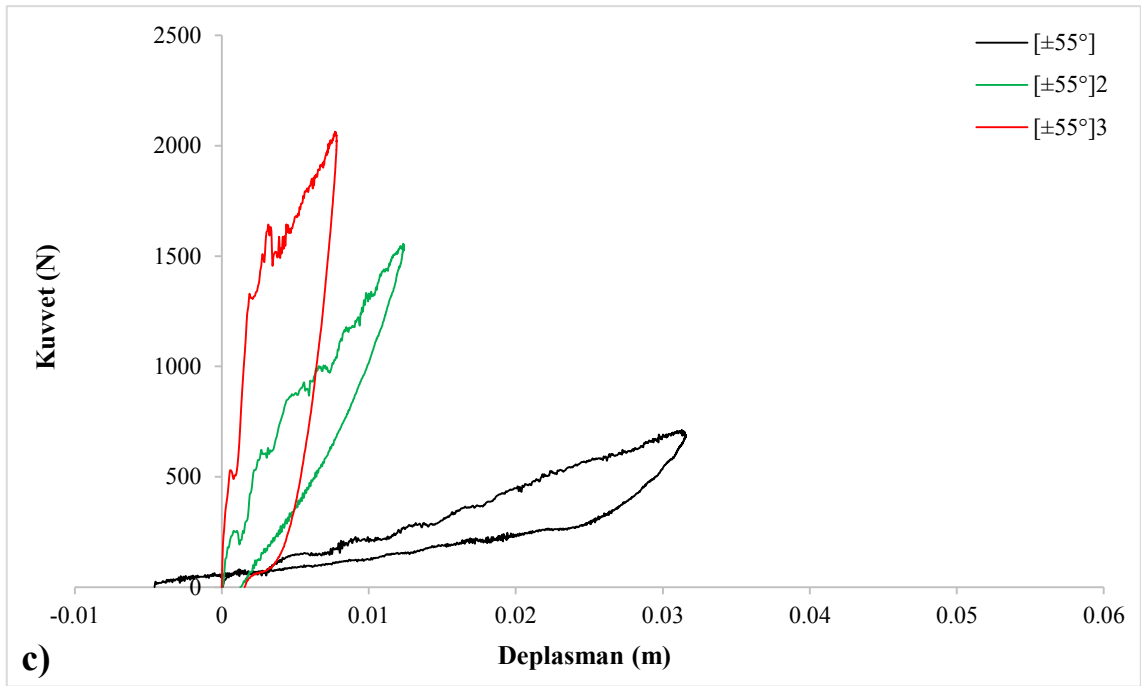


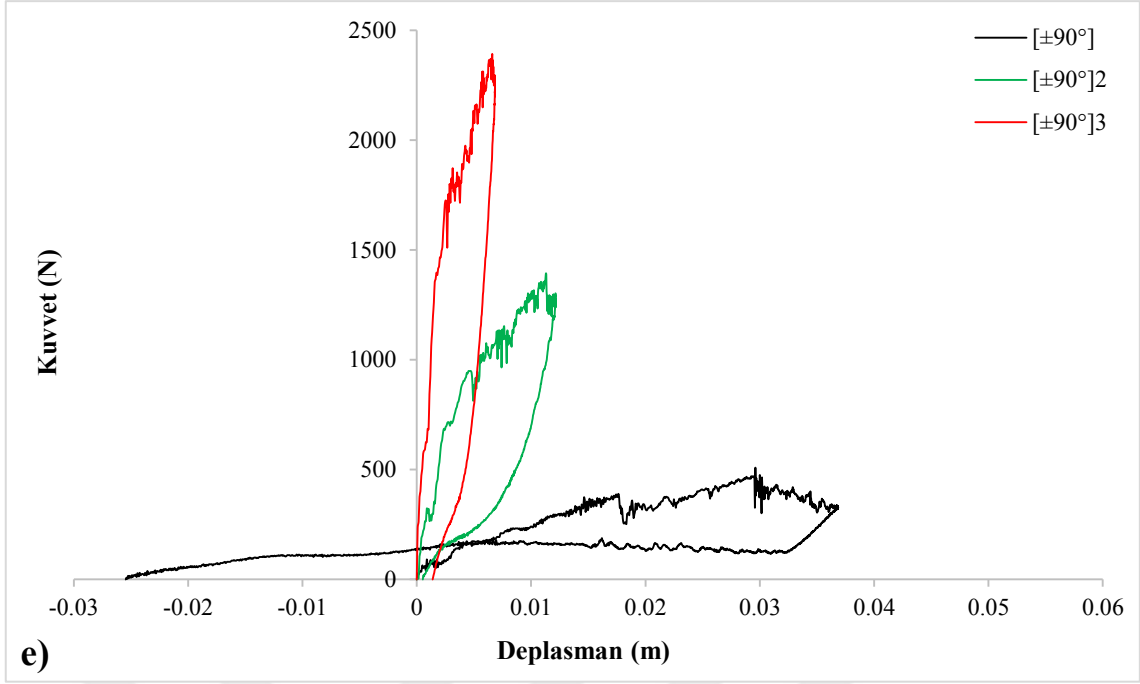
Şekil 4.6. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde maksimum deplasmanları gösteren sütun grafiği

Şekil 4.7'de düşük hızlı darbe sonucu elde edilen kuvvet-deplasman grafiklerinde sarım açılarının tabaka sayılarına göre değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kapalı tipte oluşan tüm grafiklerden sadece 2 tabakalı numunelerin grafiklerinin arkaya

kaçtığı görülmektedir. Bunun nedeninin 2 tabakalı numunelerde meydana gelen burkulmalardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra tabaka artışının temas kuvvetini arttırdığı ancak temas süresinin azalmasından dolayı deplasman değerini azalttığı söylenebilir.



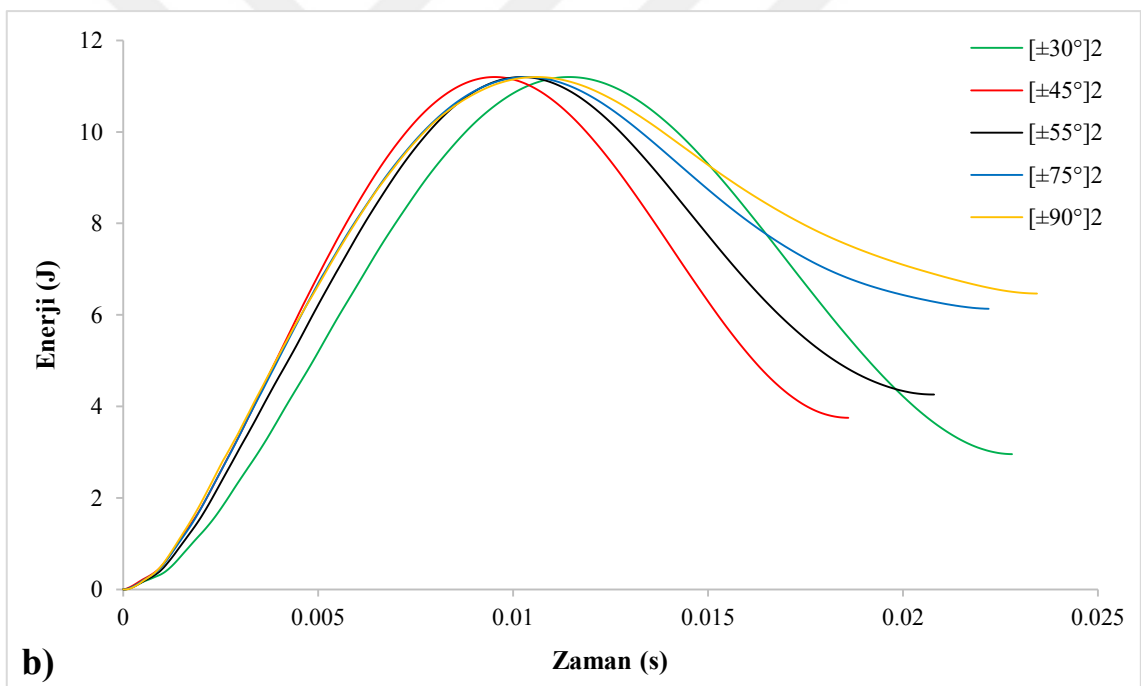
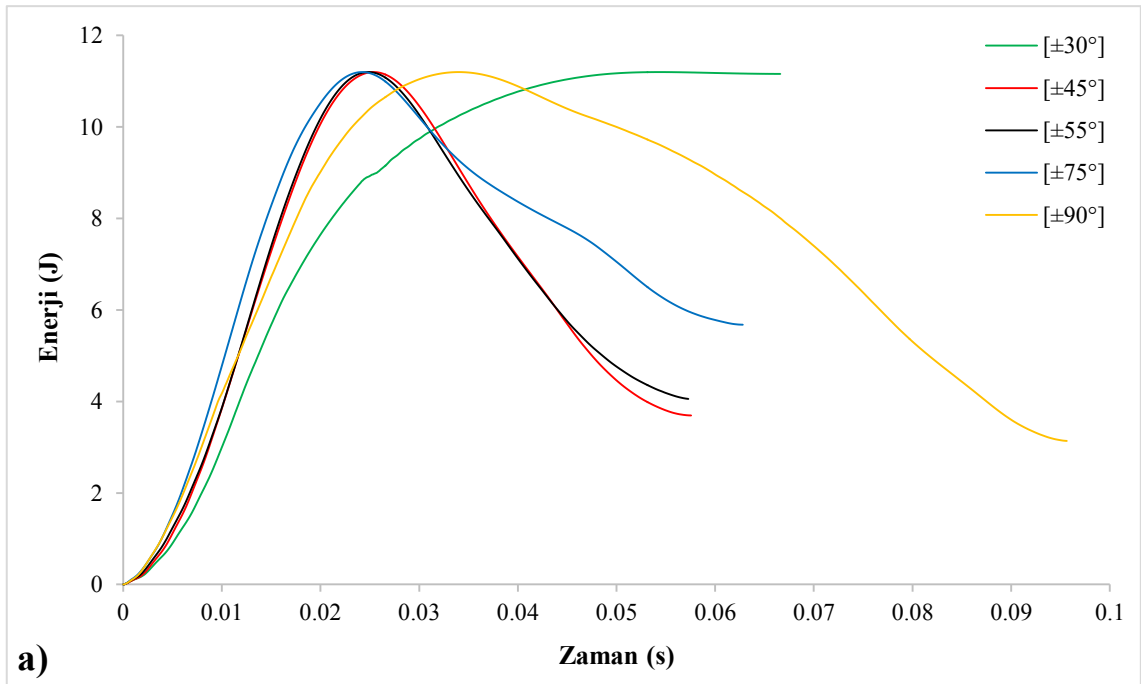


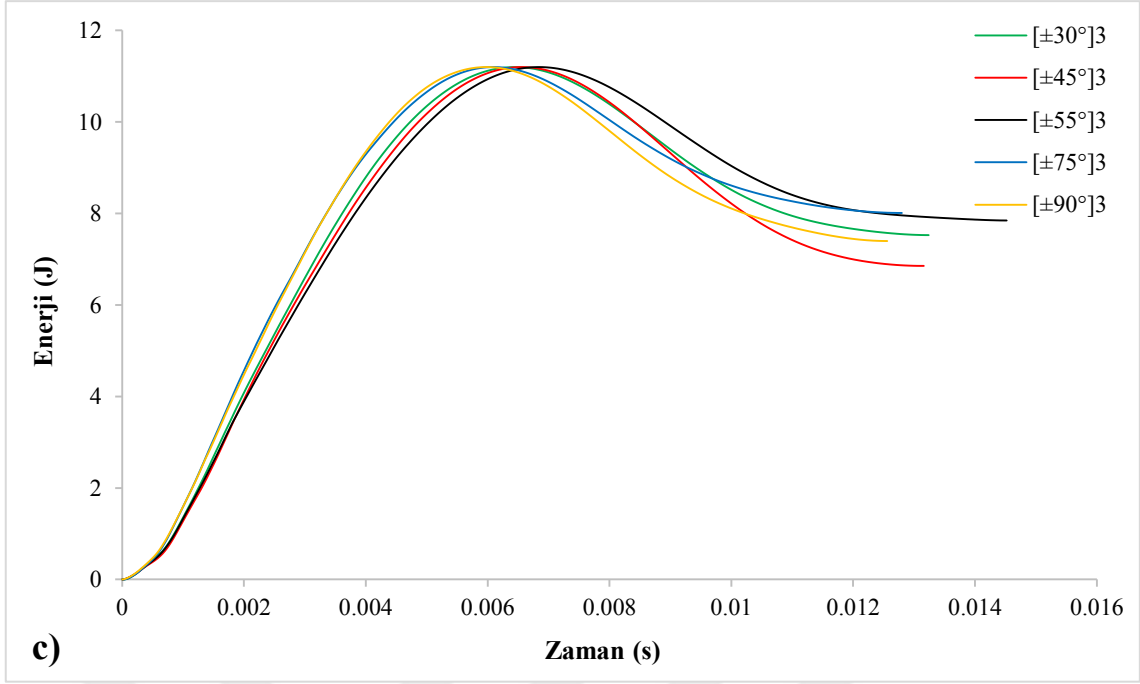


Şekil 4.7. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren temas kuvveti-deplasman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$

4.2.1.3. Enerji-zaman değişimi

Kuvvet-yer değiştirme grafiği içinde kalan alan numune üzerinde yapılan işi (numunede yutulan enerjiyi) vermektedir (Kara, 2012b; Gemi, 2014; Gemi, 2019). Şekil 4.5'te grafik içinde kalan alanlar hesaplanmış ve yutulan enerji miktarı elde edilmiştir. Çizelge 4.2'de farklı sarım açlarına ve tabaka sayılarına ait hesaplanmış yutulan enerji değerleri verilmiştir. 2, 4 ve 6 tabakalı $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açısına sahip CTP borularına 2 m/s hızında gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneyi ile elde edilen enerji-zaman grafikleri toplu olarak Şekil 4.8'de verilmiştir. Grafikler genel olarak incelendiğinde tabaka sayısındaki artışın emilen enerji kapasitesini de artırdığı görülmektedir. 2 tabakalı numunelerde $\pm 30^\circ$ sarım açılı numune düşük sarım açılı olduğundan çok fazla deplasmana uğrayarak yay vazifesi görmüş ve üzerinde toplanan enerjinin %99'unu impaktöre geri sekme enerjisi olarak harcamıştır. Şekil 4.1a'da da görüldüğü üzere numune üzerinde de fazla hasar oluşmamıştır. Diğer numuneler de de burkulmalar oluşsa da sarım açısına bağlı olarak oluşan hasarlar uygulanan enerjinin bir kısmını absorbe etmiştir. En fazla enerji absorbe eden numune 5.7 J ile en çok hasar gören $\pm 75^\circ$ sarım açılı numune olmuştur.

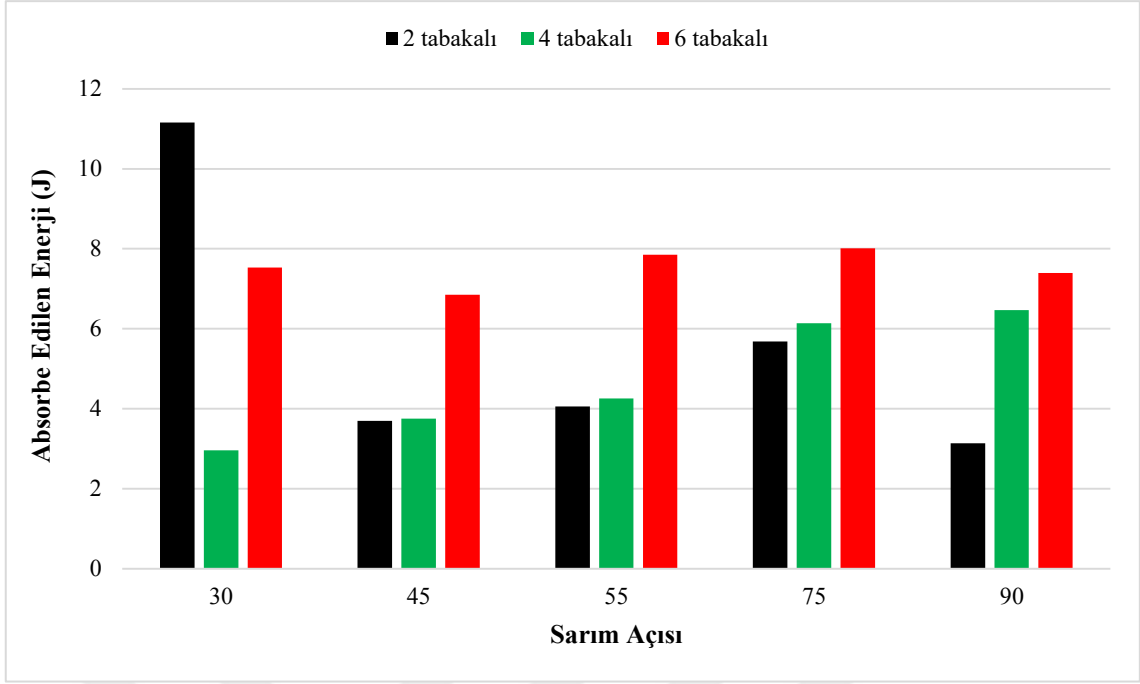




Şekil 4.8. a) 2, b) 4 ve c) 6 tabakalı ($\pm 30^\circ$), ($\pm 45^\circ$), ($\pm 55^\circ$), ($\pm 75^\circ$), ($\pm 90^\circ$) elyaf sarım açısına sahip numunelerin enerji-zaman grafikleri

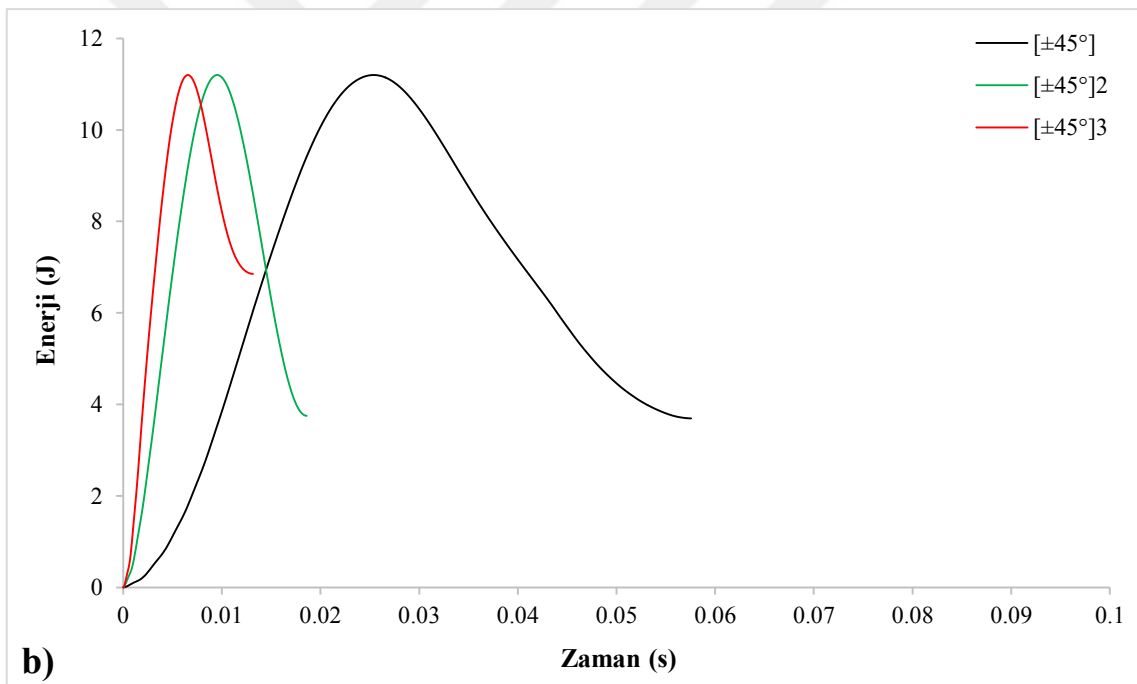
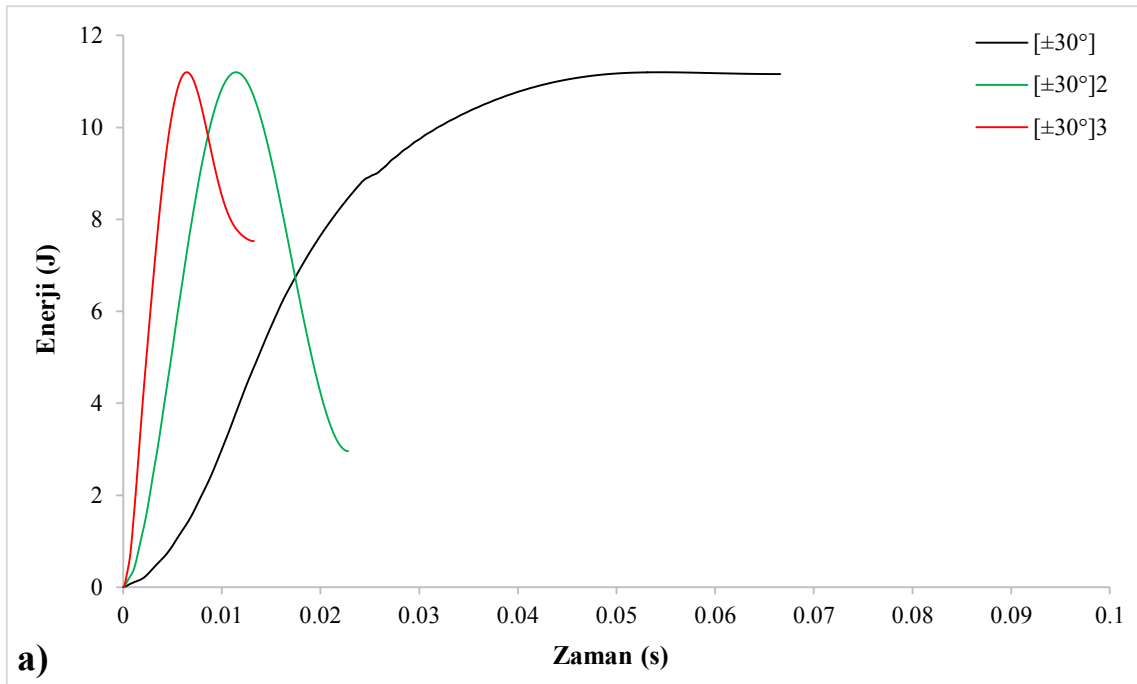
Şekil 4.8b ve Şekil 4.9 birlikte incelendiğinde, 4 tabakalı numunelerde sarım açısı artışı ile yutulan enerji miktarlarında da düzenli bir artışın gerçekleştiği görülmüştür. Darbe sonrası hasarlı numuneler (Şekil 4.1b) incelendiğinde benzer şekilde sarım açısı artışıyla beraber CTP borularda oluşan hasar alanlarında da artışlar gözlenmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere her ne kadar 4 tabakalı numunelerde de lokal burkulmalar oluşsa da yutulan enerjinin hasar oluşumuna harcadığı görülmüştür. $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açılı numunelerin fazla enerji yutması, numune üzerinde oluşan darbe hasar alanında delaminasyon hasarı ile beraber elyaf sarım açısı doğrultusunda yarıлма hasarlarının oluşmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

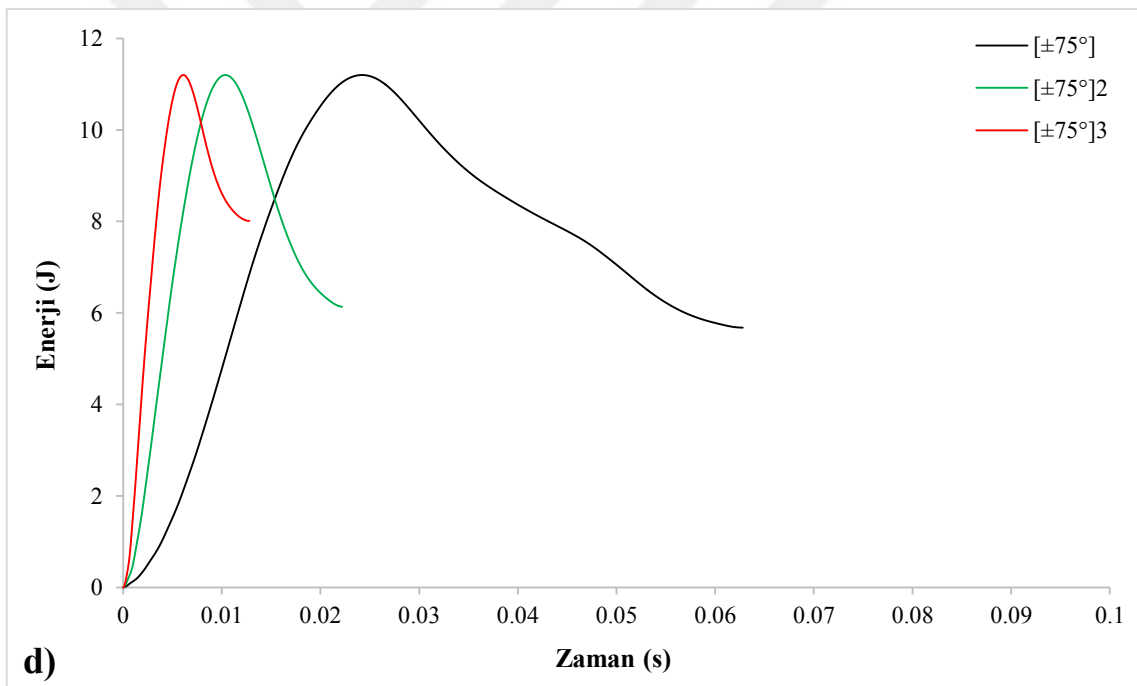
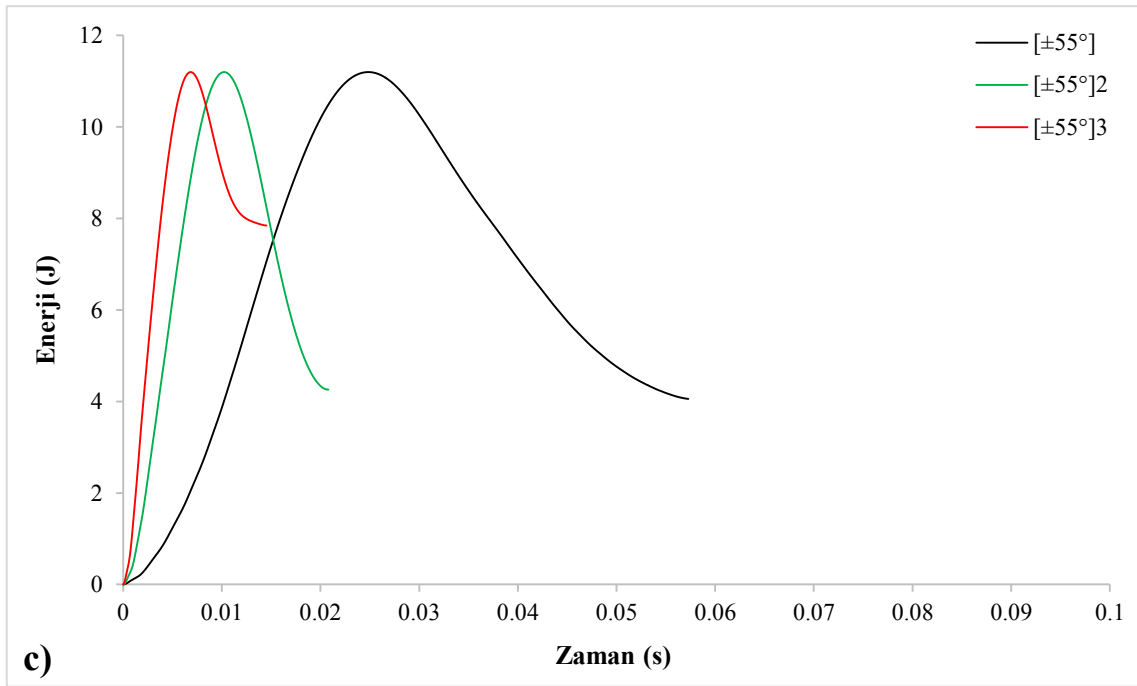
Şekil 4.1c, Şekil 4.8c ve Şekil 4.9 birlikte incelendiğinde 6 tabakalı numuneler rijit bir davranış sergilemiş ve burkulma etkisi ortadan kalktığı için darbe cevabında yutulan enerji miktarları diğer tabakalara göre daha fazla olmuştur. Bu numunelerde sarım açısının etkisi ile oluşan darbe hasarları belli bir geometride ve daha düzenli yapıda gerçekleşmiştir. Bu numunelerde yutulan enerji darbe bölgelerinde yoğun oluşan delaminasyon hasarlarına harcanmıştır. Şekil 4.1c ayrıntılı olarak incelendiğinde numunelerde tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarlarının bütün sarım açıları için geçerli olduğu söylenebilir. Numunelerde delaminasyon hasarı ile birlikte yüzey matris çatlakları ve elyaf doğrultusunda yarıлма hasarlarının da oluştuğu görülmüştür.

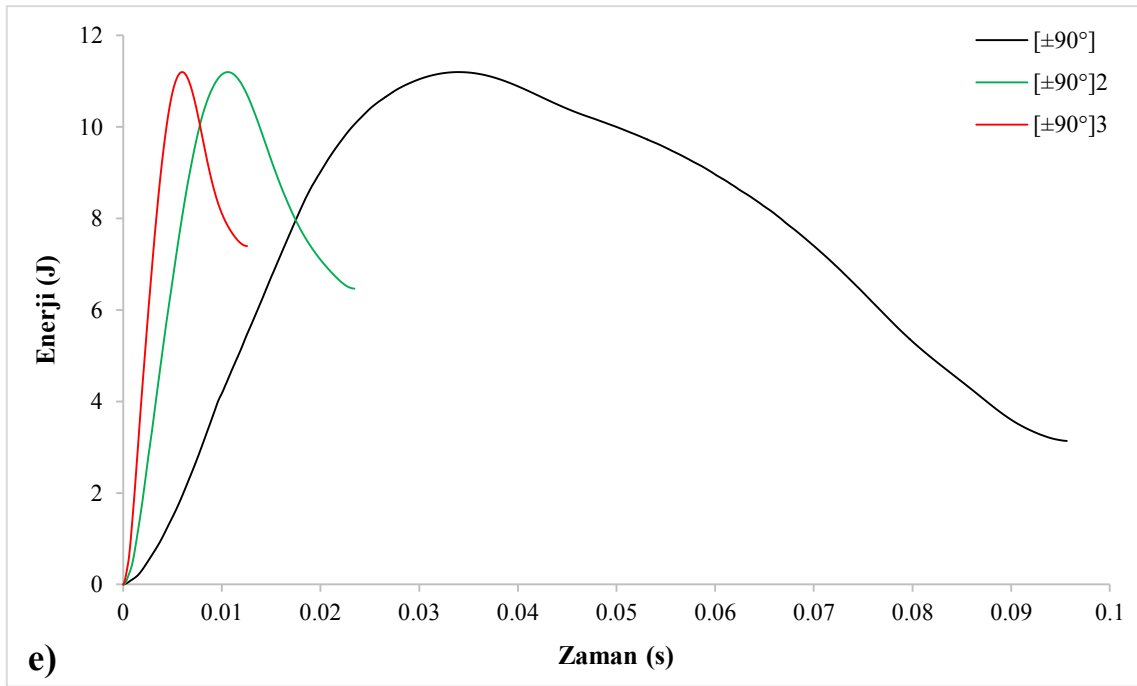


Şekil 4.9. Farklı sarım açılarındaki boruların tabaka sayısı değişiminde yutulan enerji miktarlarını gösteren sütun grafiği

Şekil 4.10'da düşük hızlı darbe sonucu elde edilen enerji-zaman grafiklerinde sarım açılarının tabaka sayılarına göre değişimleri verilmiştir. Bu grafikler için genel bir değerlendirme yapılacak olunursa; Tabaka sayılarının artışı ile yutulan enerji miktarlarının da arttığı aynı zamanda temas sürelerinin azaldığı görülmektedir. Tabaka artışı ile daha rijit hale gelen numunelerde burkulmanın etkisi azalmış ve beklenen darbe cevabı ile yutulan enerjinin hasar oluşumu için harcadığı görülmüştür.







Şekil 4.10. Farklı elyaf sarım açısına sahip CTP boru numunelerinde tabaka sayılarındaki değişimi gösteren enerji-zaman grafikleri a) $\pm 30^\circ$, b) $\pm 45^\circ$, c) $\pm 55^\circ$, d) $\pm 75^\circ$, e) $\pm 90^\circ$

4.3. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Basma Deneyi (CAI) Sonuçları

Düşük hızlı darbe sonrası basma (CAI) deneyi ile CTP borularının hasar davranışını izlemek ve eksenel yük taşıma kapasitesi, deplasman gibi mekanik özelliklerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Darbe hasarı almış $\varnothing 72$ mm iç çaplı, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ açılarındaki 2,4 ve 6 tabakalı CTP borularının CAI deney verileri yük (N), uzama (mm), gerilme (N/mm^2) şeklinde alınmış ve grafik haline dönüştürülmüştür. Darbe hasarı almış ve almamış numunelerin deney sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

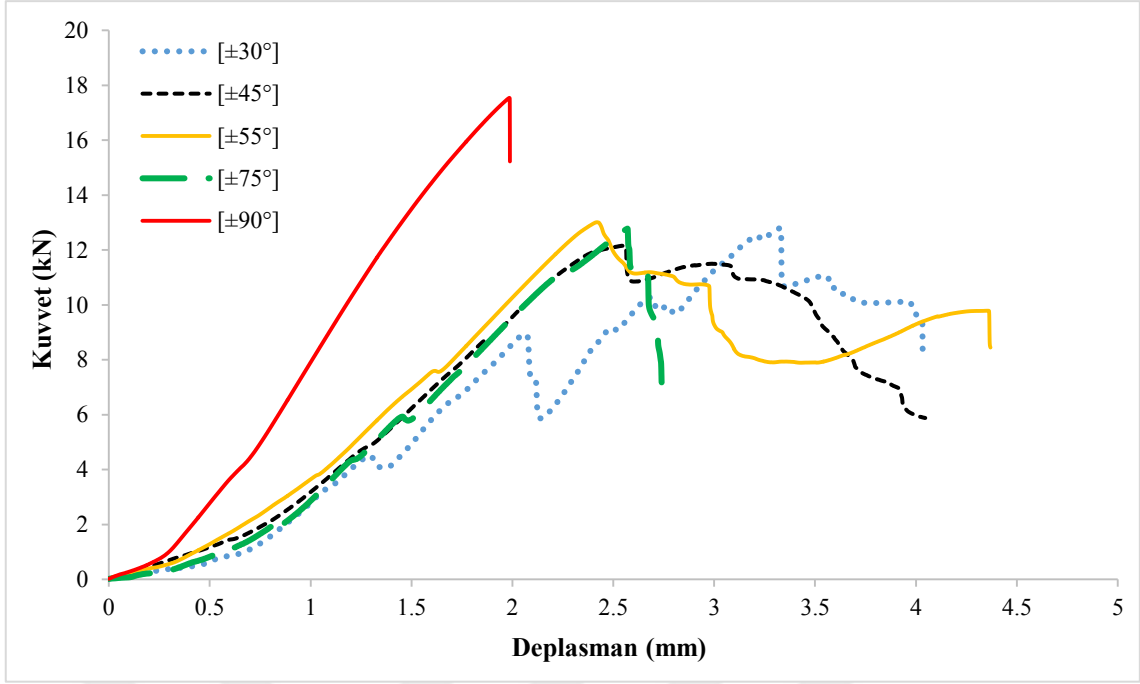
4.3.1. Darbe hasarı almamış numunelere ait basma deneyi sonuçları

Darbe hasarı almamış; boyu 150 mm, iç çapı $\varnothing 72$ mm olan $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ elyaf sarım açısına sahip 2, 4, 6 tabakalı CTP borularına yapılan eksenel basma deneyi sonucu sarım açısının tabaka sayısı üzerinde etkisini gösteren kuvvet-deplasman grafiği Şekil 4.11, 4.18, 4.25'da verilmiştir. Eksenel basma kuvveti altında numunelerin zamana bağlı deformasyon durumları ve taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Deney sonucu elde edilen maksimum kuvvet, deplasman ve gerilme değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

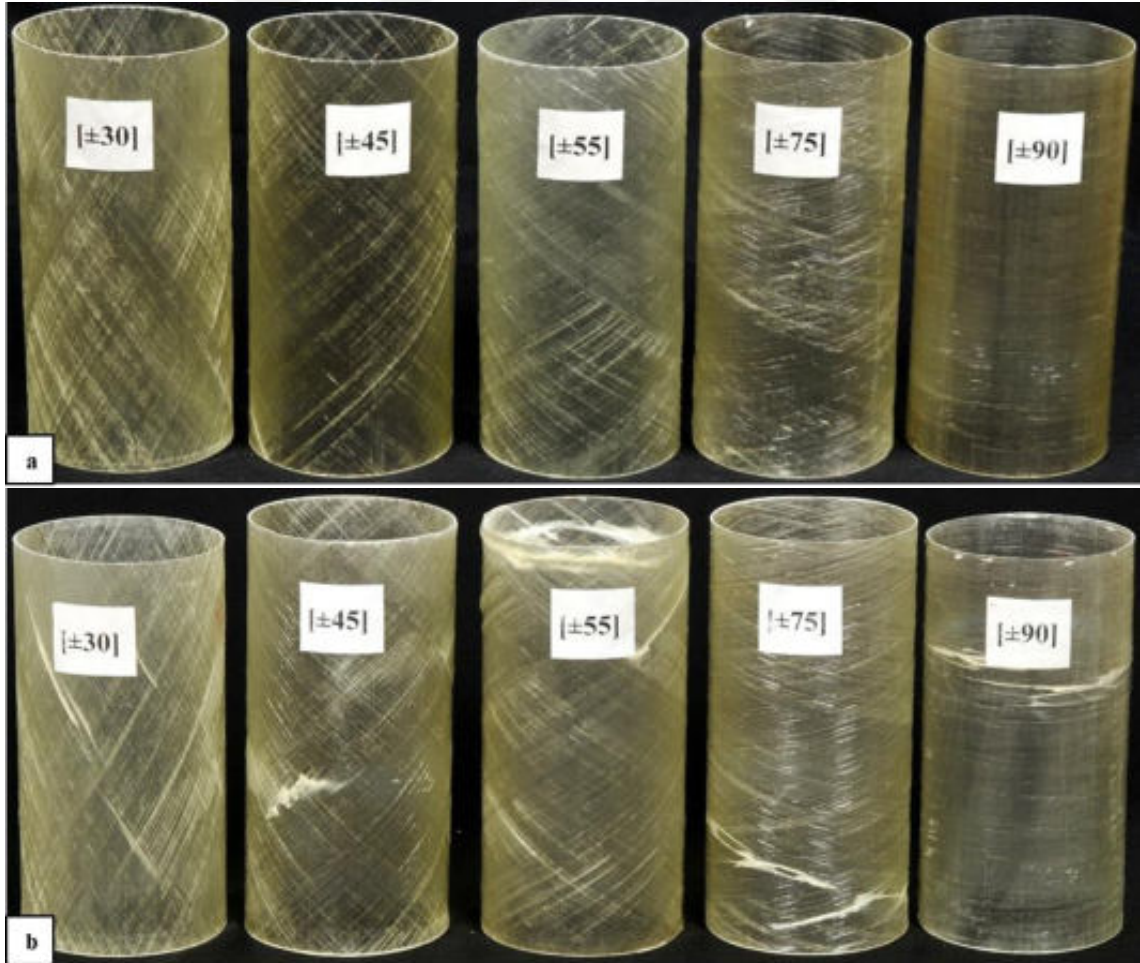
Çizelge 4.3. Darbe hasarsız CTP borularına uygulanan basma deneyinde elde edilen veriler

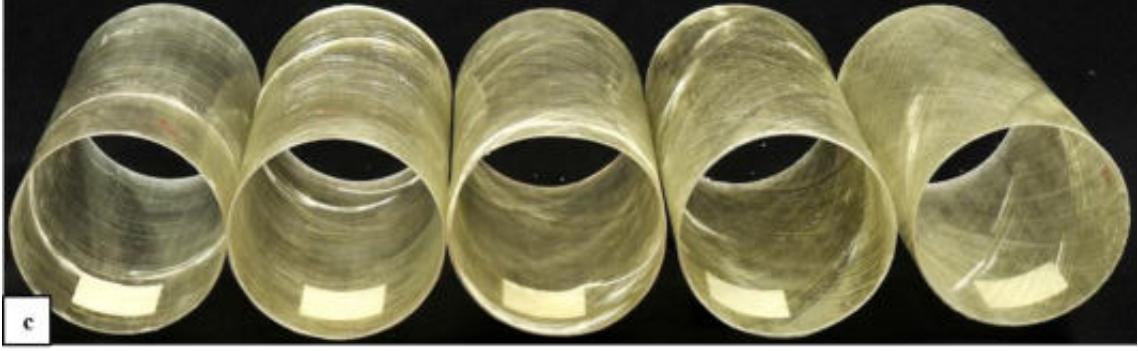
Tabaka Sayısı	Sarım Açısı	Darbe Hızı (m/s)	Max. Kuvvet (kN)	Gerilme (N/mm ²)	Deplasman (mm)
2	[±30°]	0 (Hasarsız)	12.811	22.84	4.033
	[±45°]	0 (Hasarsız)	12.159	21.67	4.046
	[±55°]	0 (Hasarsız)	13.014	23.19	4.369
	[±75°]	0 (Hasarsız)	12.782	22.79	2.800
	[±90°]	0 (Hasarsız)	17.547	31.28	1.987
4	[±30°] ₂	0 (Hasarsız)	45.524	81.16	2.056
	[±45°] ₂	0 (Hasarsız)	37.310	66.51	4.660
	[±55°] ₂	0 (Hasarsız)	43.017	76.68	3.828
	[±75°] ₂	0 (Hasarsız)	42.843	76.37	3.319
	[±90°] ₂	0 (Hasarsız)	44.243	78.87	4.976
6	[±30°] ₃	0 (Hasarsız)	55.214	98.43	4.687
	[±45°] ₃	0 (Hasarsız)	60.200	107.32	8.135
	[±55°] ₃	0 (Hasarsız)	67.251	119.89	7.026
	[±75°] ₃	0 (Hasarsız)	64.347	114.71	5.075
	[±90°] ₃	0 (Hasarsız)	66.536	118.61	3.295

Şekil 4.11’de basma deneyi sonrası farklı sarım açılarının 2 tabakalı CTP boruların üzerinde ki etkisi görülmektedir. Genel olarak 2 tabakalı numunelerde tabaka sayısının az olması sebebiyle elyaf sarım açısının etkisi gözlenememiştir. Eksenel basma kuvvetinin 2 tabakalı numunelerde burkulma etkisi ile oluşan hasarlar meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca 2 tabakalı numunelerin yük taşıma kapasite değerleri diğer tabakalı numunelerin değerlerine göre daha az olduğu görülmektedir. Deney sonucu verilerine göre en büyük maksimum kuvvet [±90°] sarım açısına sahip numuneye ait 17.547 kN değeridir. 2 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



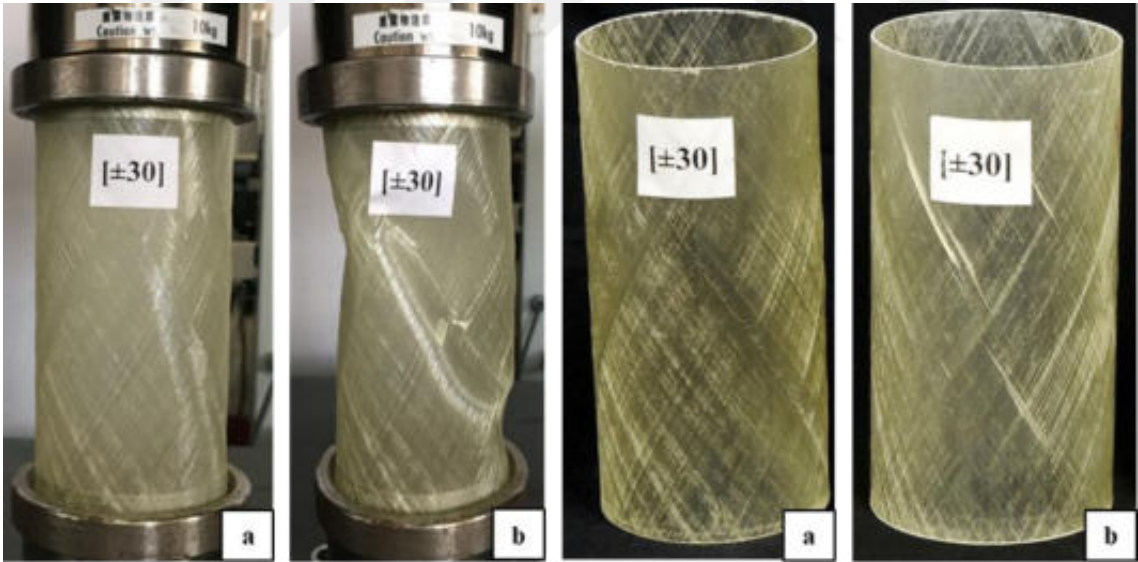
Şekil 4.11. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.12. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarları

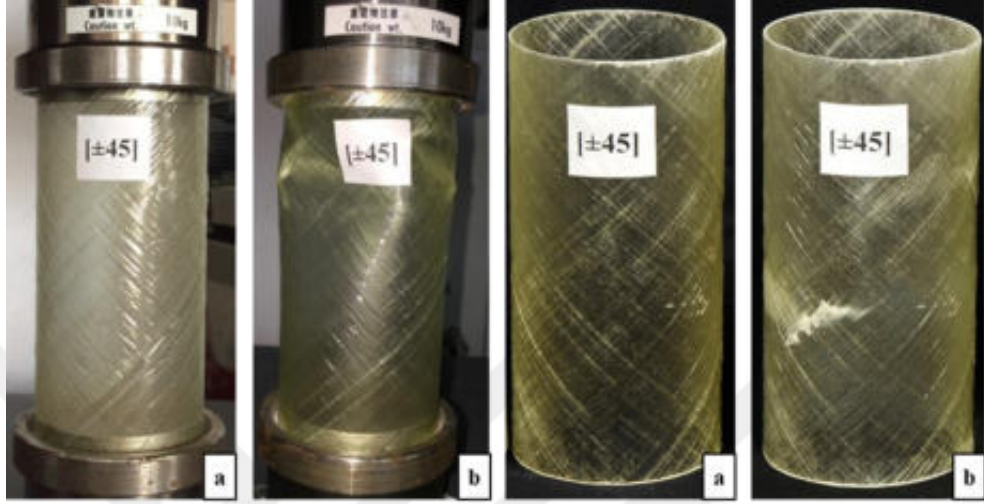
- $[\pm 30^\circ]$ sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra kuvvetteki artışla ilerlemeli hasar başlamıştır. Lokal burkulma meydana geldiği ve burkulma bölgelerinde delaminasyon (tabaka ayrılması) ardından da elyaf yarıлма hasarı gözlenmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 12.811 kN, 4.033 mm, 22.84 N/mm²'dir. Şekil 4.13'te $[\pm 30^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.13. 2 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

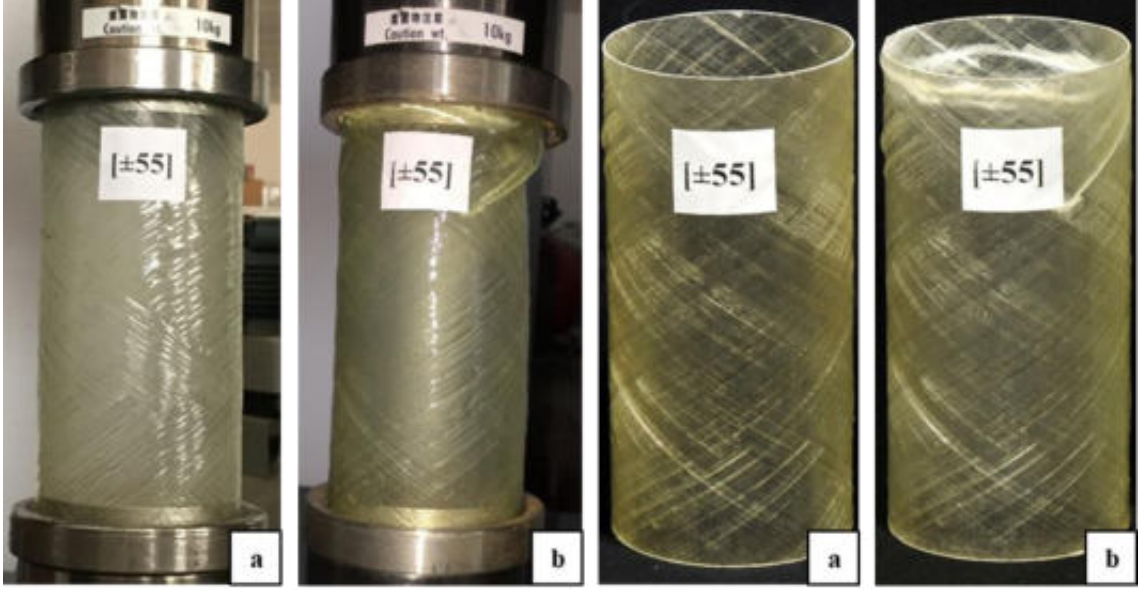
- $[\pm 45^\circ]$ sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra kuvvetteki artışla ilerlemeli hasar başlamıştır. Lokal burkulma meydana geldi ve burkulma bölgelerinde delaminasyon (tabaka ayrılması) ardından da elyaf yarıлма hasarı gözlenmiştir. Ayrıca burkulma bölgelerinde beyazlaşmaların olduğu görülmüştür.

Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 12.158 kN, 4.046 mm, 21.67 N/mm²'dir. Şekil 4.14'te $[\pm 45^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi, deney esnasında ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



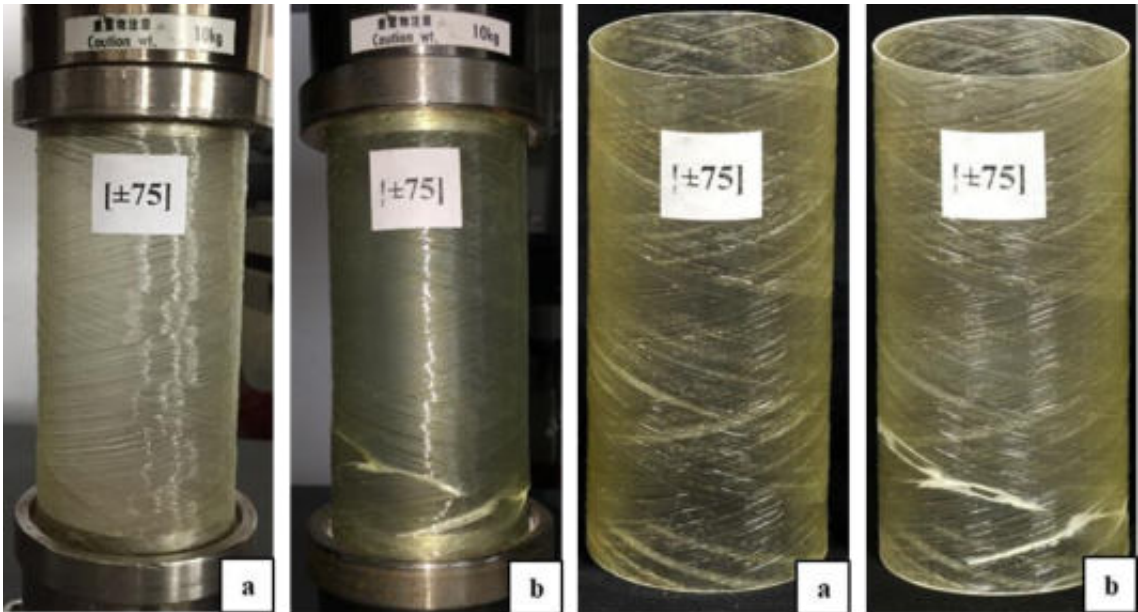
Şekil 4.14. 2 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 55^\circ]$ sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra artan kuvvet etkisiyle oluşan lokal burkulma numunede matris çatlakları ve açı doğrultusunda elyaf yarma hasarı oluşmuştur. Ayrıca numunenin başlık kısmına yakın bölgede oluşan beyazlaşmalar yük artışıyla elyaf şeritleri halinde görülmektedir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 13.013 kN, 4.369 mm, 23.19 N/mm²'dir. Şekil 4.15'te $[\pm 55^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi, deney esnasında ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



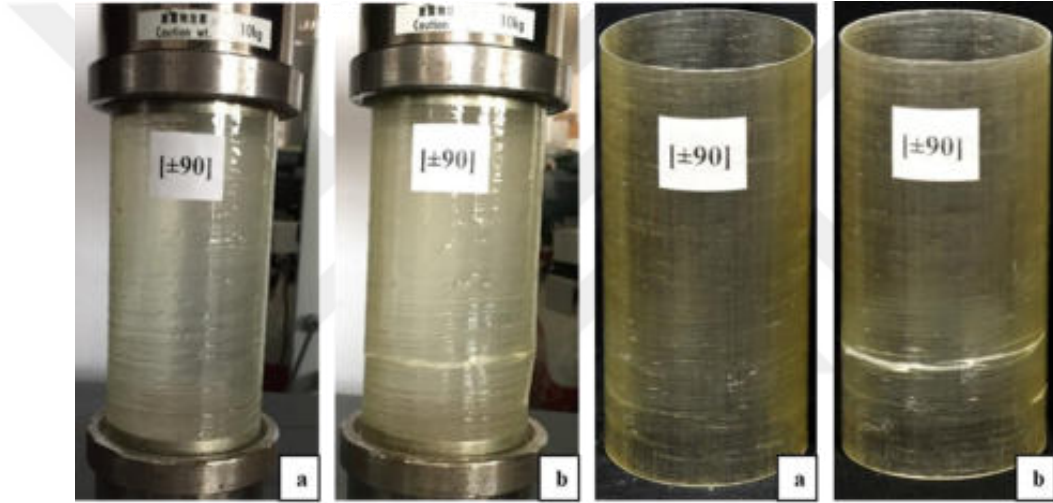
Şekil 4.15. 2 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 75^\circ]$ sarım açısına sahip numune yükleme eksenel yükleme esnasında sünek bir davranış göstermemiş ve artan kuvvet etkisiyle numunede lokal burkulma sonucu elyaf sarım açısı doğrultusunda yarılmaları meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 12.781 kN, 2.8 mm, 22.79 N/mm^2 'dir. Şekil 4.216'da $[\pm 75^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



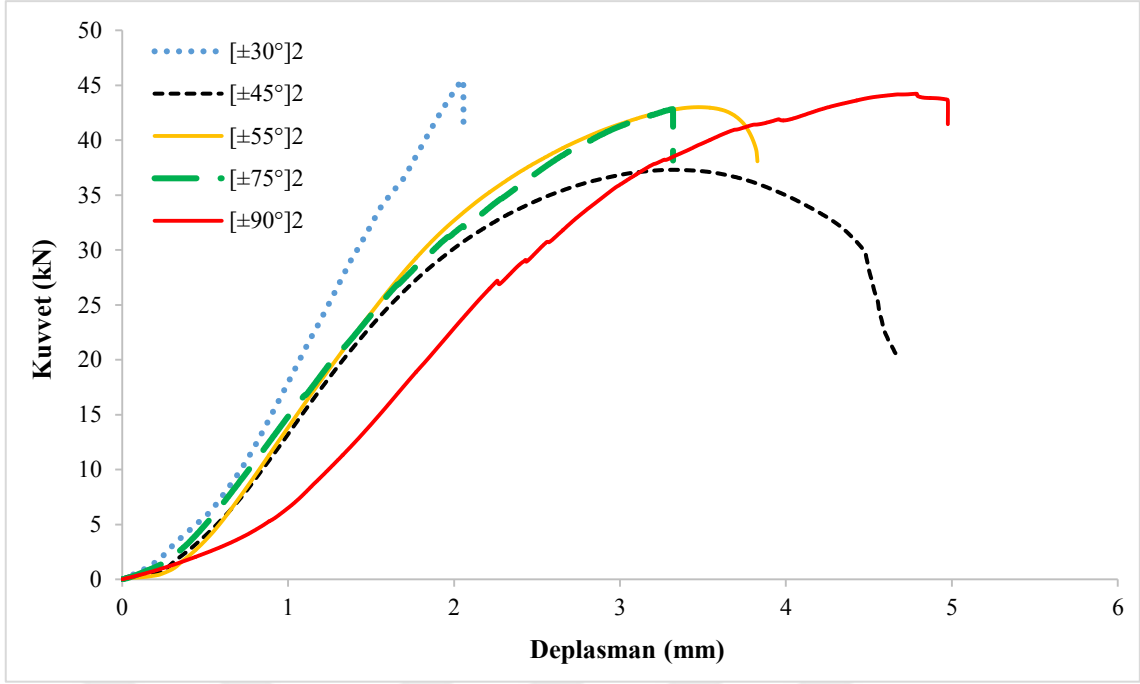
Şekil 4.16. 2 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 90^\circ]$ sarım açısına sahip numunede yükleme elyaf sarım açısına dik doğrultuda olduğu için numune sünek bir davranış göstermemiş ve burkulma meydana gelmemiştir. Yükleme artışıyla numunede sarım açısı yönünde matris çatlakları ve elyaf yarıma hasarı olduğu görülmüştür. Bu numunede sarım açısından kaynaklı olarak basma yükleri elyaflara dik olarak etki etmiş ve numune daha rijit bir davranış sergilemiştir. Deney sonucunda maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 17.547 kN, 1.987 mm, 31.28 N/mm²'dir. Diğer numunelere göre bu numunenin taşıma kapasitesi daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.17'de $[\pm 90^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.

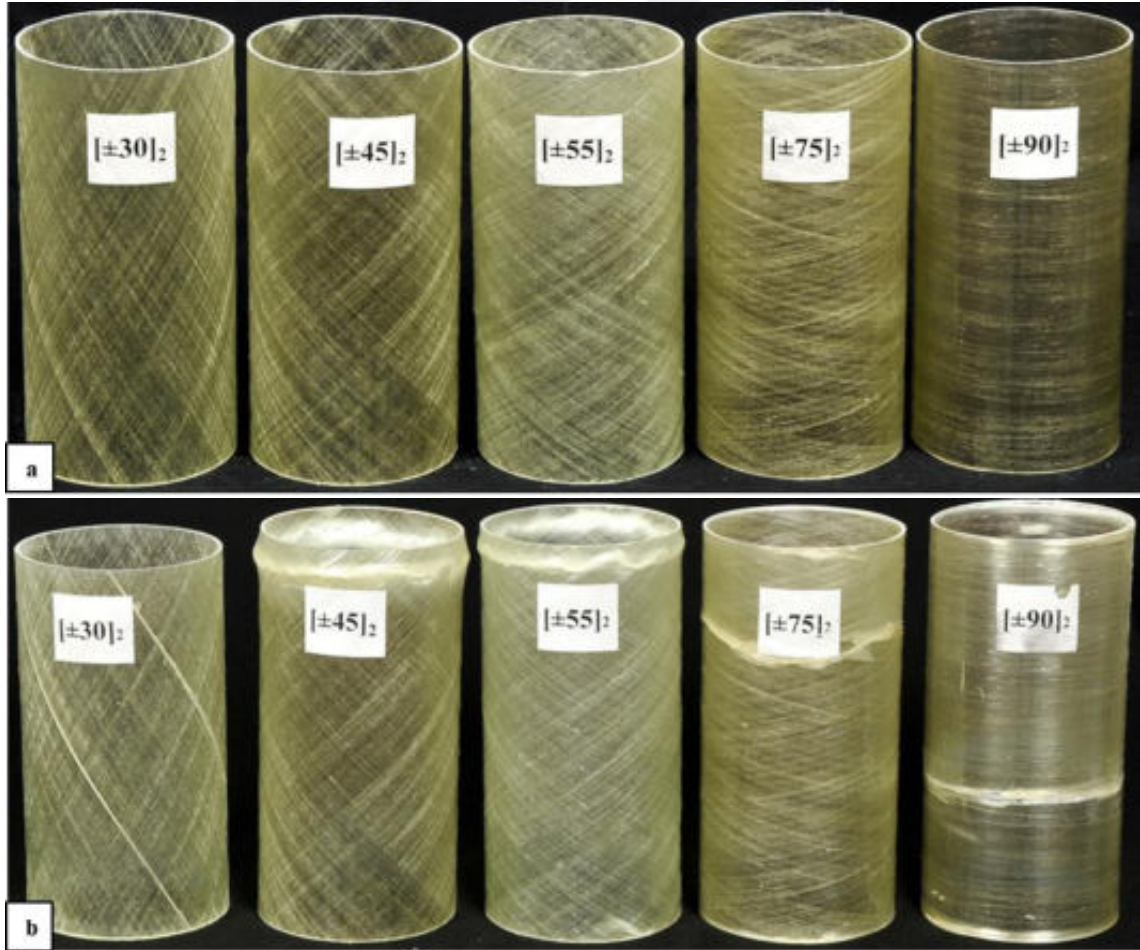


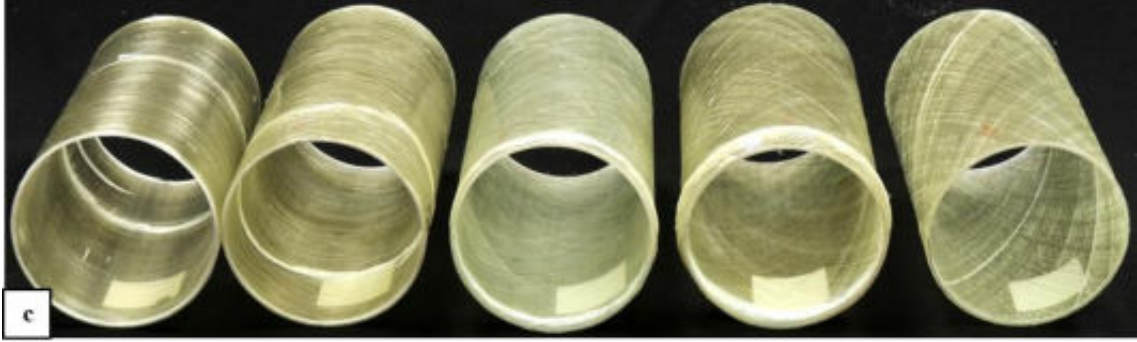
Şekil 4.17. 2 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.18'de basma deneyi sonrası farklı sarım açılarının 4 tabaka üzerinde ki etkisi görülmektedir. 4 tabakalı numunelerde süneklik etkisi azalmış ve burkulma görülmemiştir. 2 tabakalı numunelerde görülmeyen elyaf açısının etkisi 4 tabakalı numunelerde görülmüştür. Deney sonucunda elde edilen verilere göre en büyük maksimum kuvvet değeri $[\pm 30^\circ]_2$ sarım açısına sahip numuneye ait 45.523 kN değeridir. 4 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



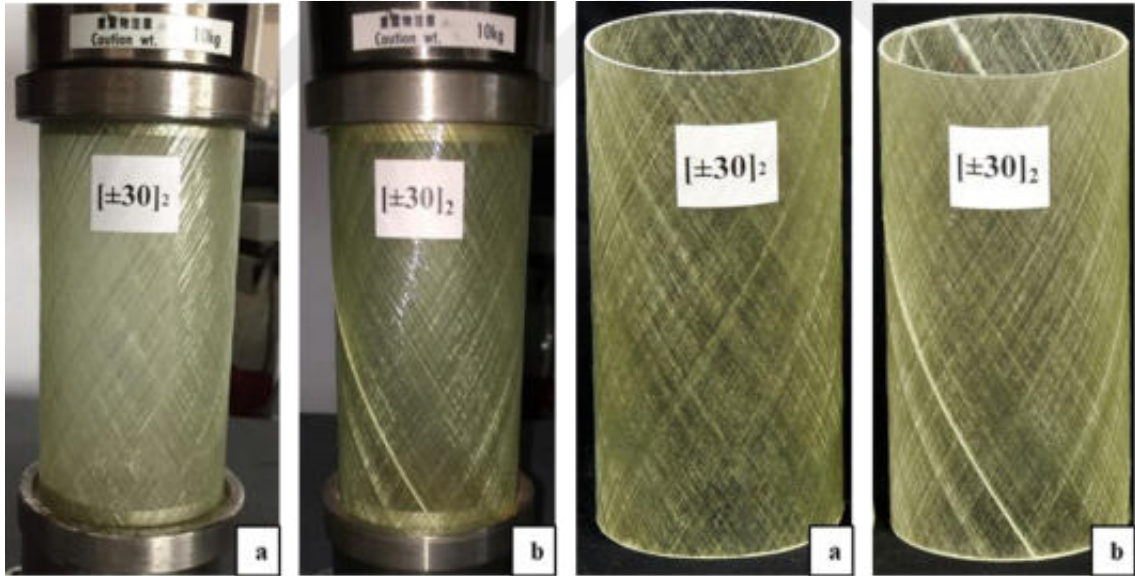
Şekil 4.18. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.19. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı

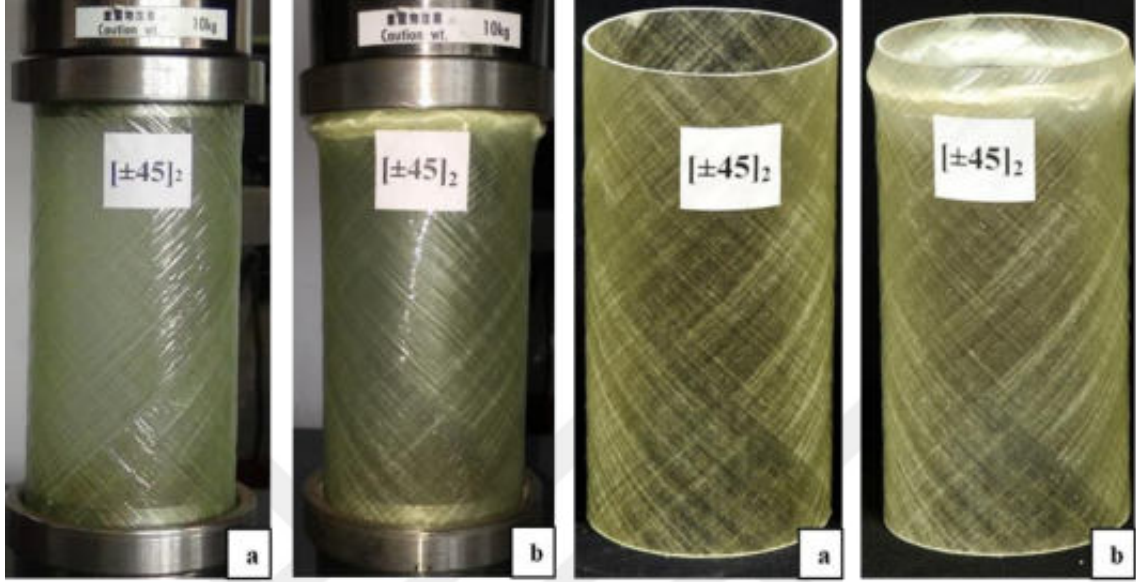
- $[\pm 30]_2$ sarım açısına sahip numunede aksenal yüklemeye beraber elyaf açısı doğrultusunda matris çatlakları ve numuneyi boydan boya saran elyaf yarıлма hasarı ile kuvvette ani bir düşüşle sonuç hasarına ulaşmıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 45.523 kN, 2.056 mm, 81.15 N/mm²'dir. Şekil 4.20'de $[\pm 30]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.20. 4 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

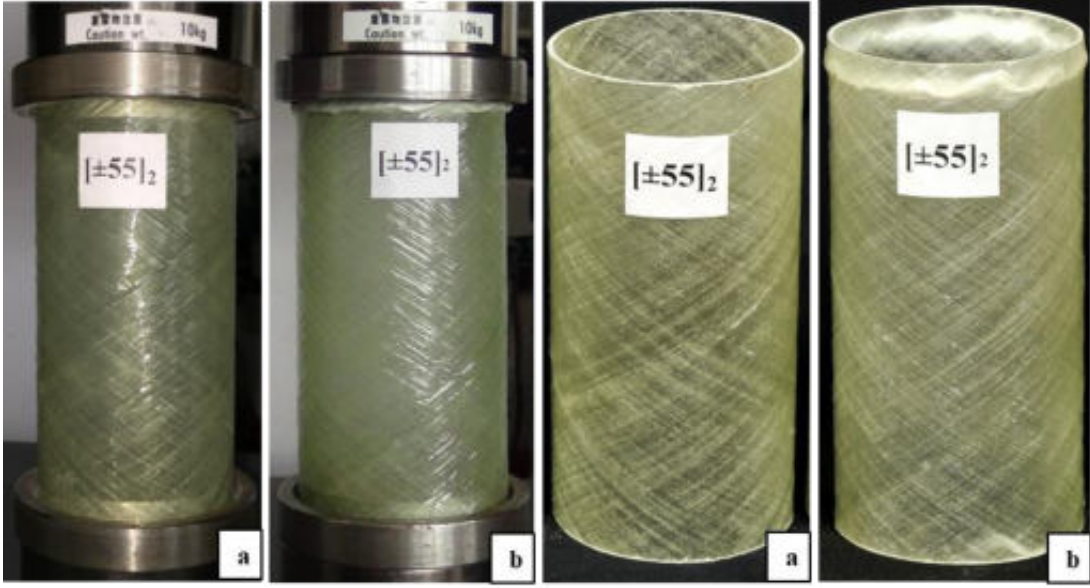
- $[\pm 45]_2$ sarım açısına sahip numune aksenal yüklemeye altında homojen gibi davranarak başlık bölgesinde lokal burkulma hasarı (elephant foot) şeklinde sonuç hasarına ulaşmıştır. Hasar bölgesinde oluşan tabaka hasarlarından dolayı lokal burkulma boyunca beyazlaşmalar meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum

kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 37.310 kN, 4.66 mm, 66.51 N/mm²'dir. Şekil 4.21'de $[\pm 45]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



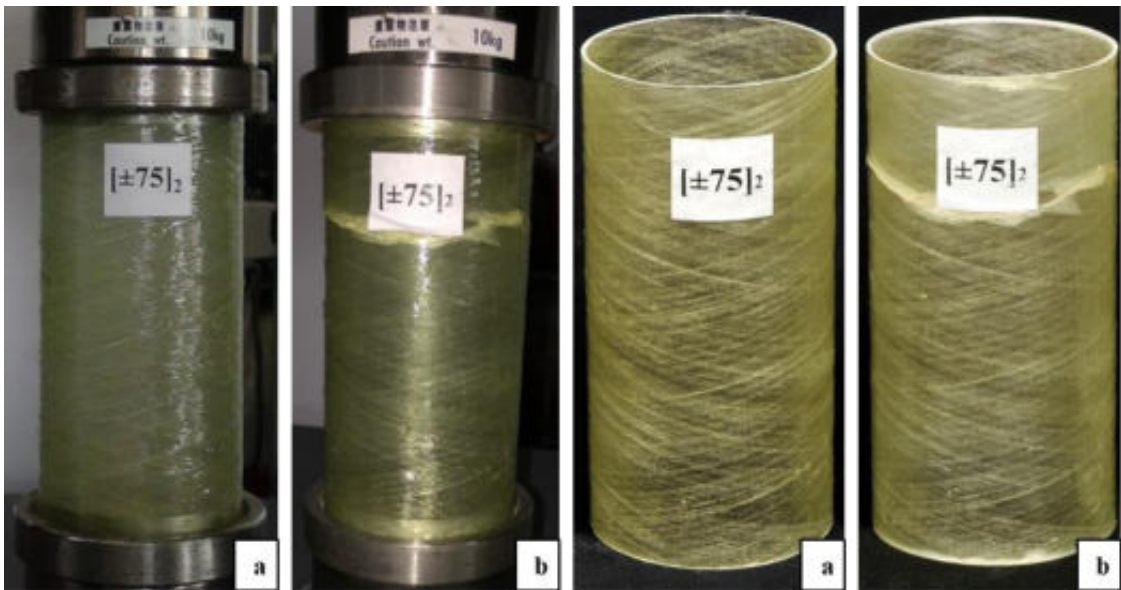
Şekil 4.21. 4 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 55]_2$ sarım açısına sahip numunede aksenal yükleme altında başlık bölgesinde burkulma hasarı (elephant foot) şeklinde sonuç hasarına ulaşmıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 43.017 kN, 3.828 mm, 76.68 N/mm²'dir. Şekil 4.22'de $[\pm 55]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



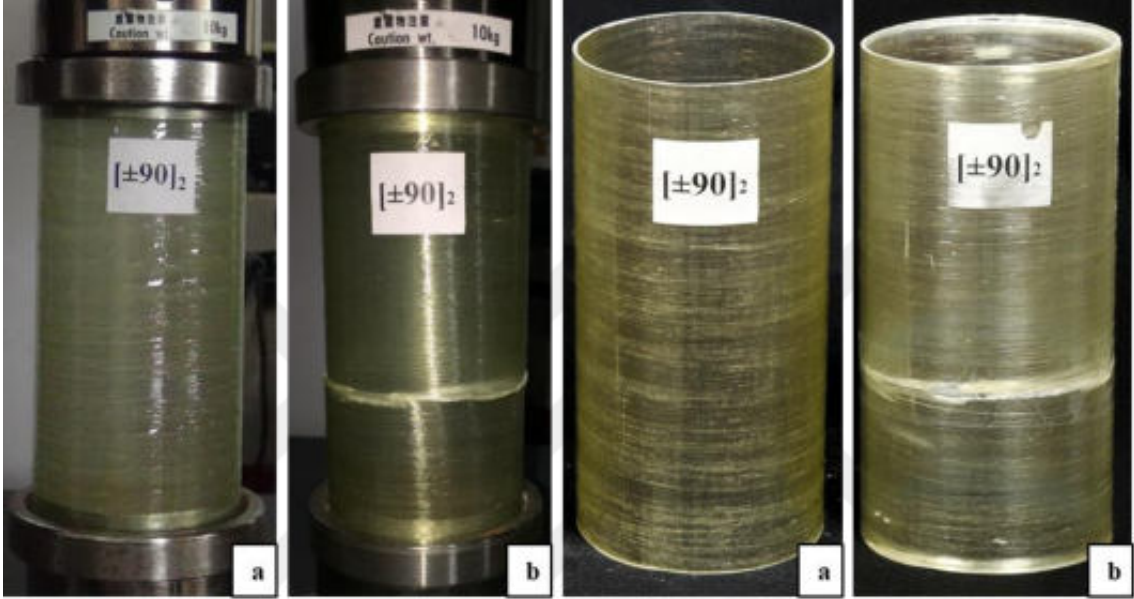
Şekil 4.22. 4 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 75^\circ]_2$ sarım açısına sahip numune sünek bir davranış göstermemiştir. Maksimum kuvvete eriştiği noktada ani bir düşüşle sonuç hasarı gerçekleşmiştir. Sarım açısı doğrultusunda matris çatlakları, delaminasyon ve son aşamada elyaf yarıma hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 42.843 kN, 3.319 mm, 76.37 N/mm²'dir. Şekil 4.23'te $[\pm 75^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



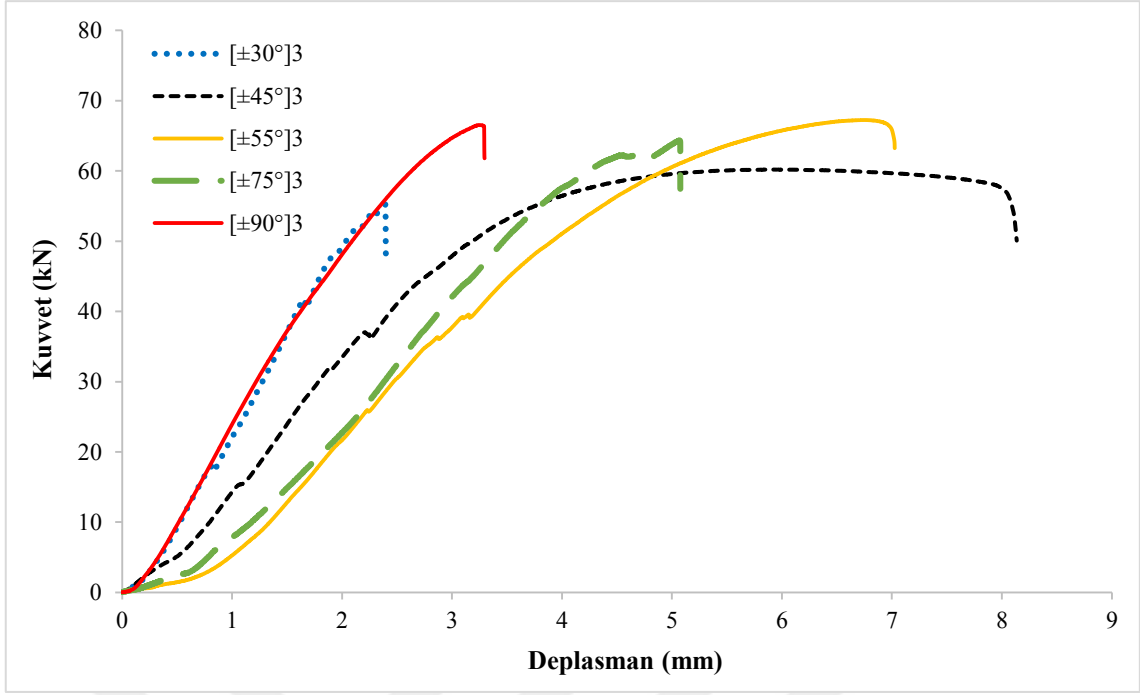
Şekil 4.23. 4 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunede elyafa dik doğrultuda gelen yük karşılanmış ve kuvvet maksimum değere ulaştığında elyaf yarılmaları ile sonuç hasarına ulaşmıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 44.243 kN, 4.976 mm, 78.87 N/mm²'dir. Şekil 4.24'te $[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.

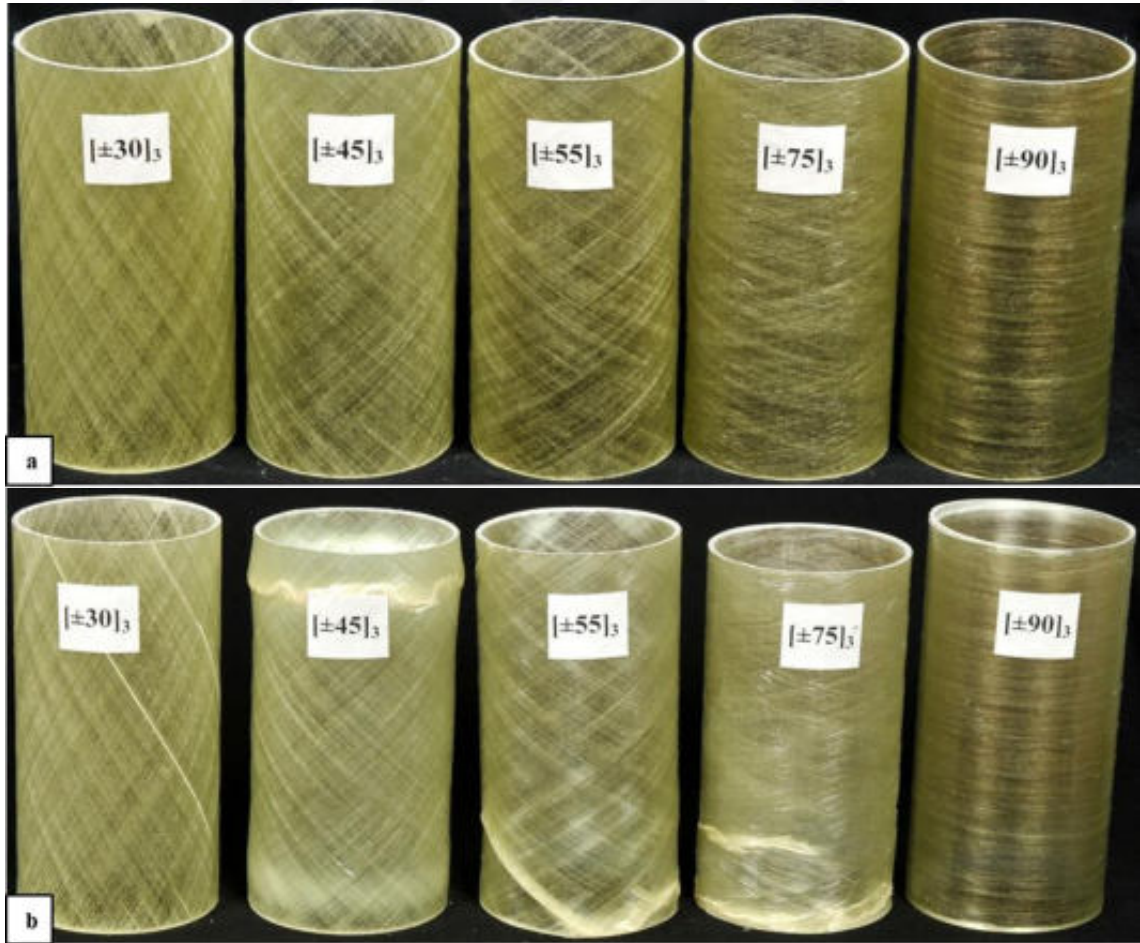


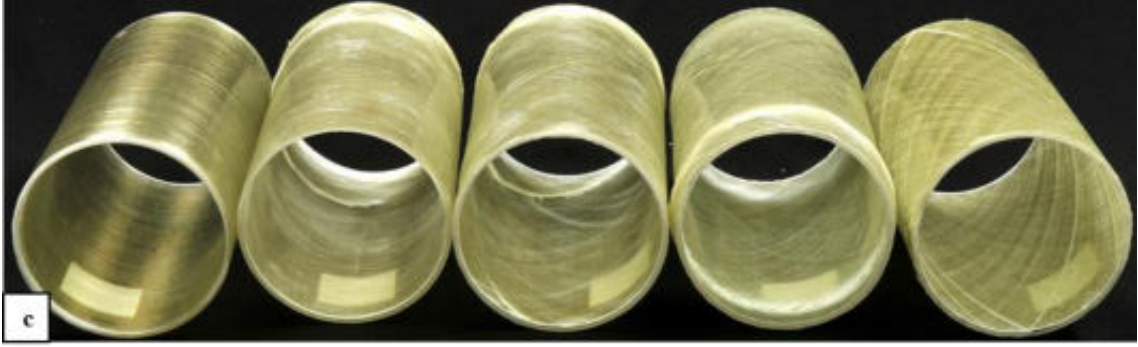
Şekil 4.24. 4 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.25'te basma deneyi sonrası farklı sarım açılarının 6 tabaka üzerindeki etkisi görülmektedir. 6 tabakalı numunelerde burkulma etkisi görülmemiştir. Deney sonucunda elde edilen verilere göre maksimum kuvvet değeri 67.251 kN olan $[\pm 55^\circ]_3$ sarım açısına sahip numune en yüksek değeri almıştır. En düşük maksimum kuvvet değeri ise 55.214 kN değerini alan $[\pm 30^\circ]_3$ sarım açısına sahip numune olmuştur. Bunun sebebi olarak darbe deneylerinde de görüldüğü üzere sarım açısının yük eksenine daha paralel olmasından ve hasarın CTP boru boyunca elyaf doğrultusunda ani yarıma hasarından kaynaklandığı görülmüştür. 6 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Bu numunelerde $[\pm 30^\circ]_3$ sarım açılı numune dikkate alınmadığı takdirde sarım açısı artışıyla deplasman değerlerinde azalmaların gerçekleştiği görülmüştür. Diğer numunelerde elyaf sarım açısı değişimi ile hasar gelişimlerinin farklılaştığı ve farklı hasar mekanizmaları ile sonuç hasarına ulaştıkları görülmüştür.



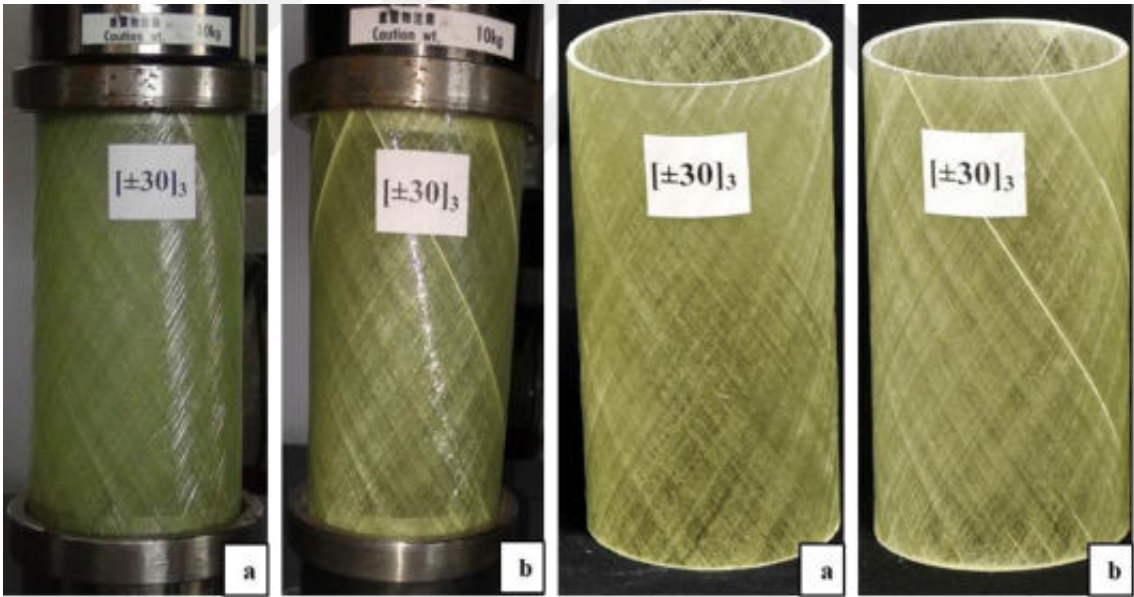
Şekil 4.25. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.26. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı

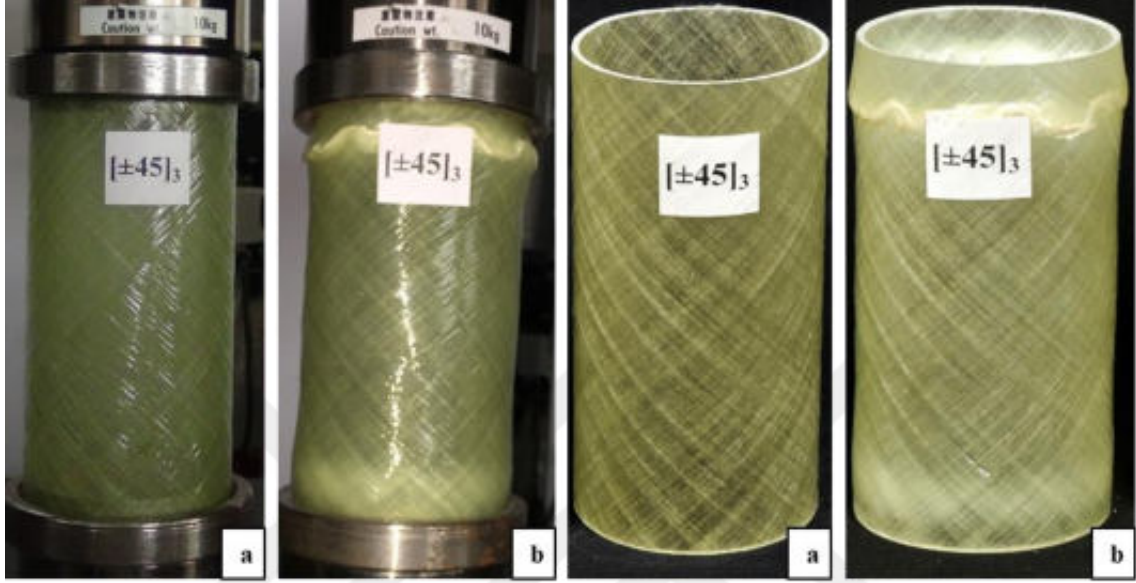
- $[\pm 30^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede aksel yüklemeye beraber sarım açısı doğrultusunda matris çatlakları ve elyaf yarılma hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 55.214 kN, 4.687 mm, 98.43 N/mm²'dir. Şekil 4.27'de $[\pm 30^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.27. 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) Deney öncesi ve b) deney sonrası

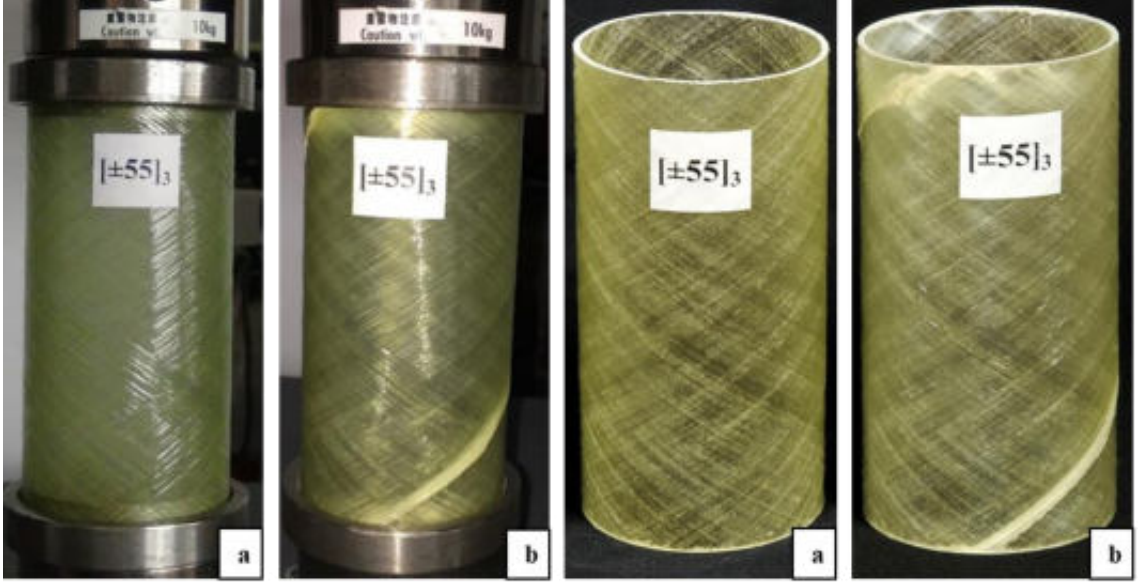
- $[\pm 45^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede 4 tabakalıya kıyasla tamamen homojen davranarak üst başlığa yakın bölgede lokal burkulma (elephant foot) hasarı oluşmuştur. Lokal burkulma bölgelerinde oluşan delaminasyon hasarları neticesinde beyazlaşmalar görülmüştür. Alt başlığa yakın bölgede burkulma hasarı öncesi kısmi delaminasyon ve matris bozulmasından kaynaklı beyazlaşma hasarı görülmüştür.

Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 60.2 kN, 8.135 mm, 107.32 N/mm²'dir. Şekil 4.28'de $[\pm 45]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.28. 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 55]_3$ sarım açısına sahip numunede başlık bölgesinde, sarım açısı doğrultusunda bütün numuneyi dolaşan elyaf yarıma hasarı meydana gelmiştir. Üst basma plakasına yakın bölgelerde delaminasyon ve matris bozulmaları görülmüştür. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 67.251 kN, 7.026 mm, 119.89 N/mm²'dir. Şekil 4.29'te $[\pm 55]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



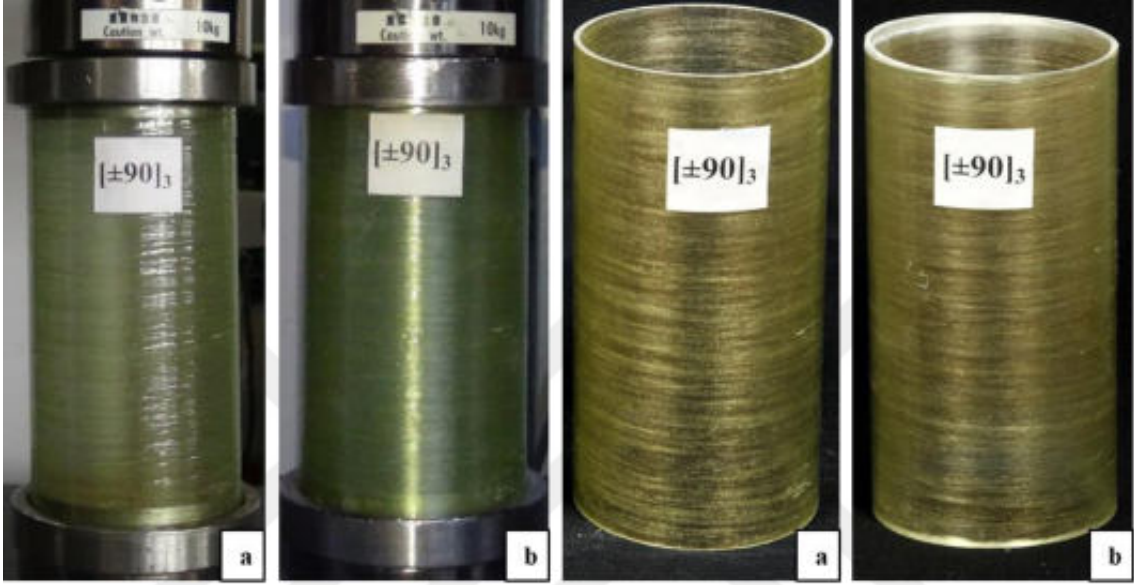
Şekil 4.29. 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 75^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede başlık bölgesinde renklenmeler, matraste bozulma ve delaminasyon oluşmuştur. Sarım açısı doğrultusunda numuneyi saran elyaf yarıлма hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 64.347 kN, 5.075 mm, 114.71 N/mm²'dir. Şekil 4.30'da $[\pm 75^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.30. 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $[\pm 90]_3$ sarım açısına sahip numunede başlık kısımlarında ezilme ve elyaf doğrultusunda yarıлма hasarı ile sonuç hasarına ulaşmıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 66.536 kN, 3.295 mm, 118.61 N/mm²'dir. Şekil 4.31'de $[\pm 90]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.

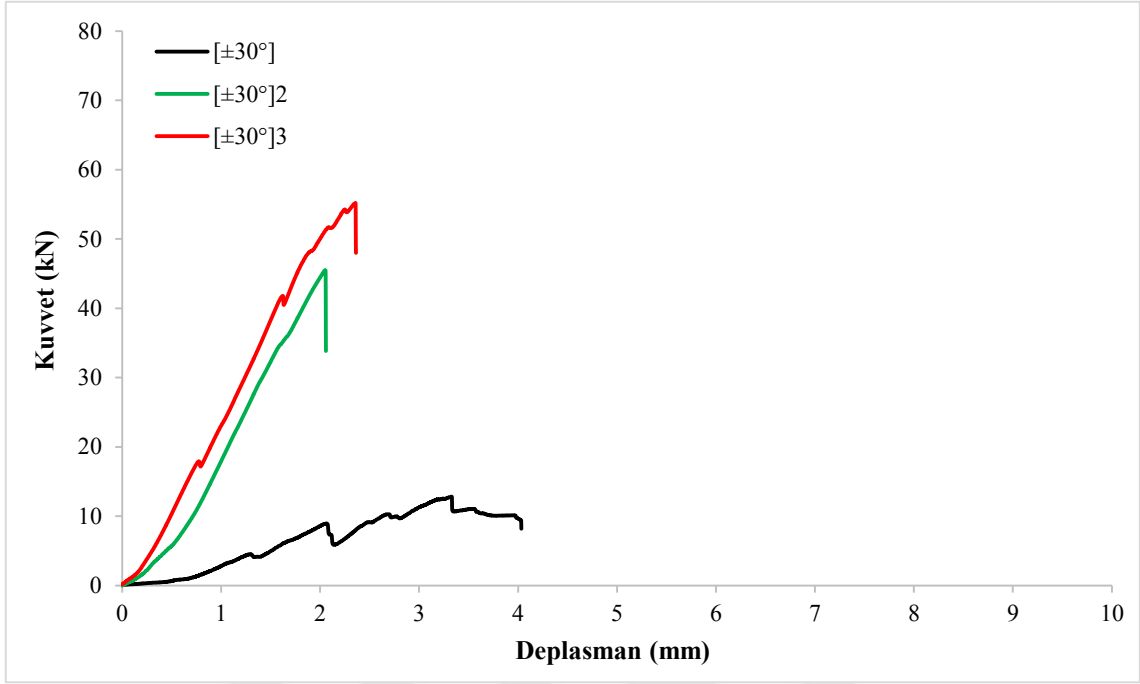


Şekil 4.31. 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

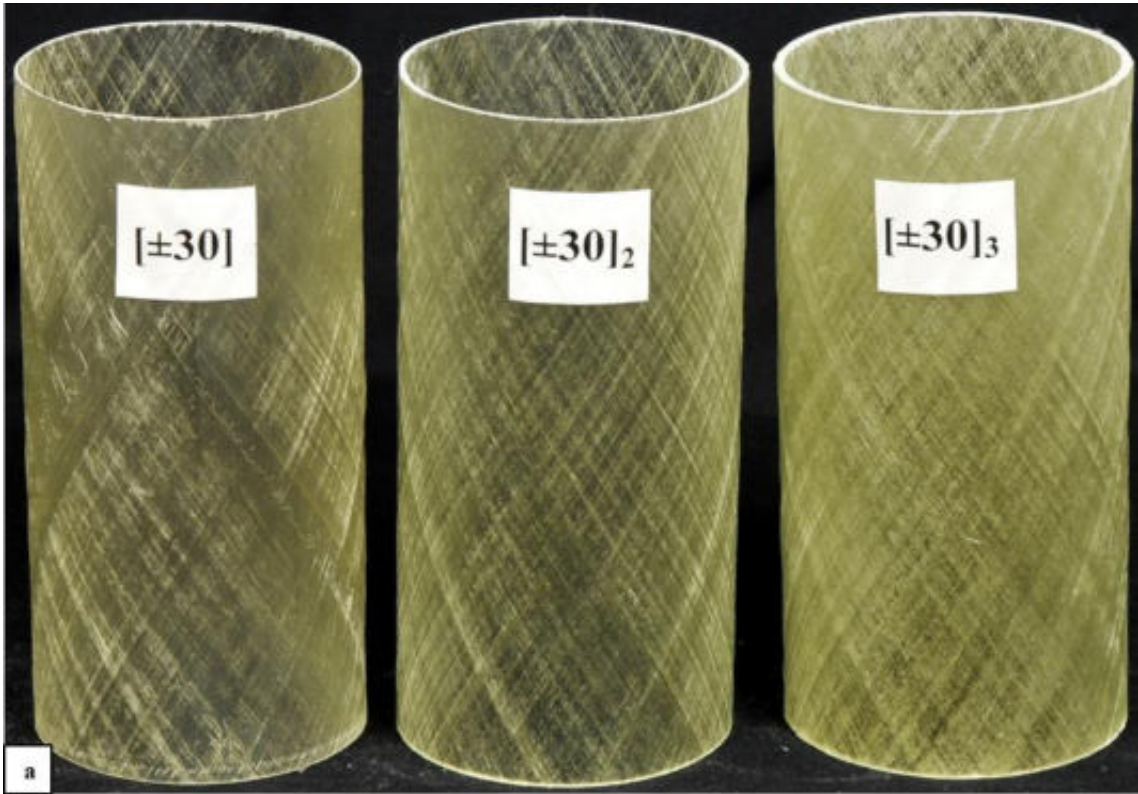
Darbe almamış numunelerde tabaka sayısının sarım açısı üzerinde etkisini gösteren düşey eksenli basma deneyi sonuçları Şekil 4.32, 4.34, 4.36, 4.38, 4.40'ta kuvvet-deplasman grafiği olarak verilmektedir. Basma kuvveti altında numunelerin zamana bağlı deformasyon durumları ve taşıma kapasiteleri görülmektedir. Elde edilen deney sonuç verilerine göre tabaka sayısındaki artış maksimum kuvvet değerini arttırmaktadır. Yani tabaka sayısı arttıkça numunenin yük taşıma kapasitesi artmaktadır.

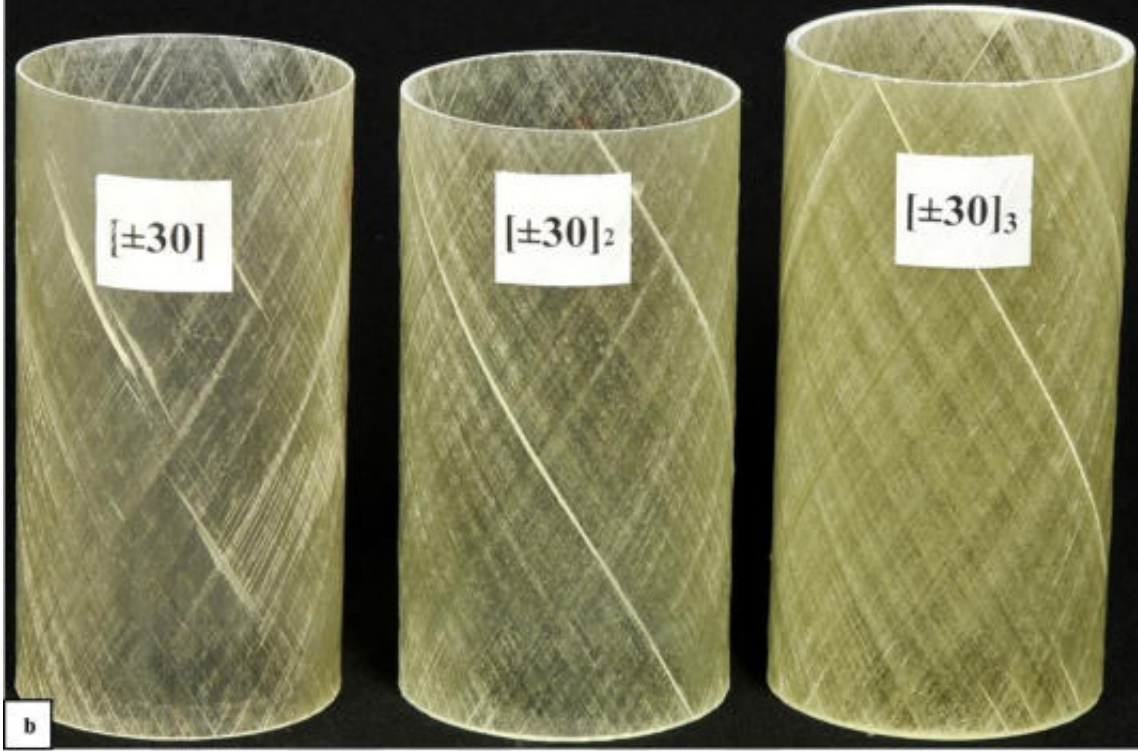
Şekil 4.32'de basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 30^\circ$ elyaf açısına sahip numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı numunelerde sünek bir davranış oluşturmuş ve burkulma etkisi ile oluşan hasarlar meydana getirmiştir. Her ne kadar sünek bir davranış göstermiş olsa da 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük değere, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2,4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almamış $\pm 30^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 12.811 kN, 45.524 kN ve 55.214 kN 'dur.

Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



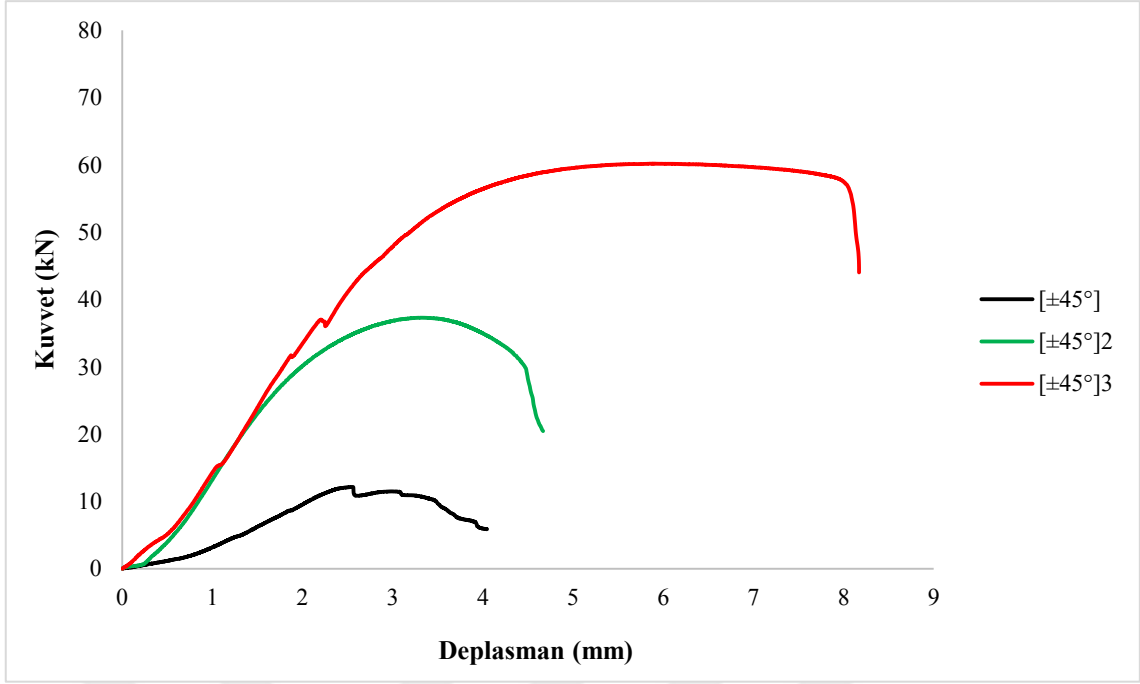
Şekil 4.32. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



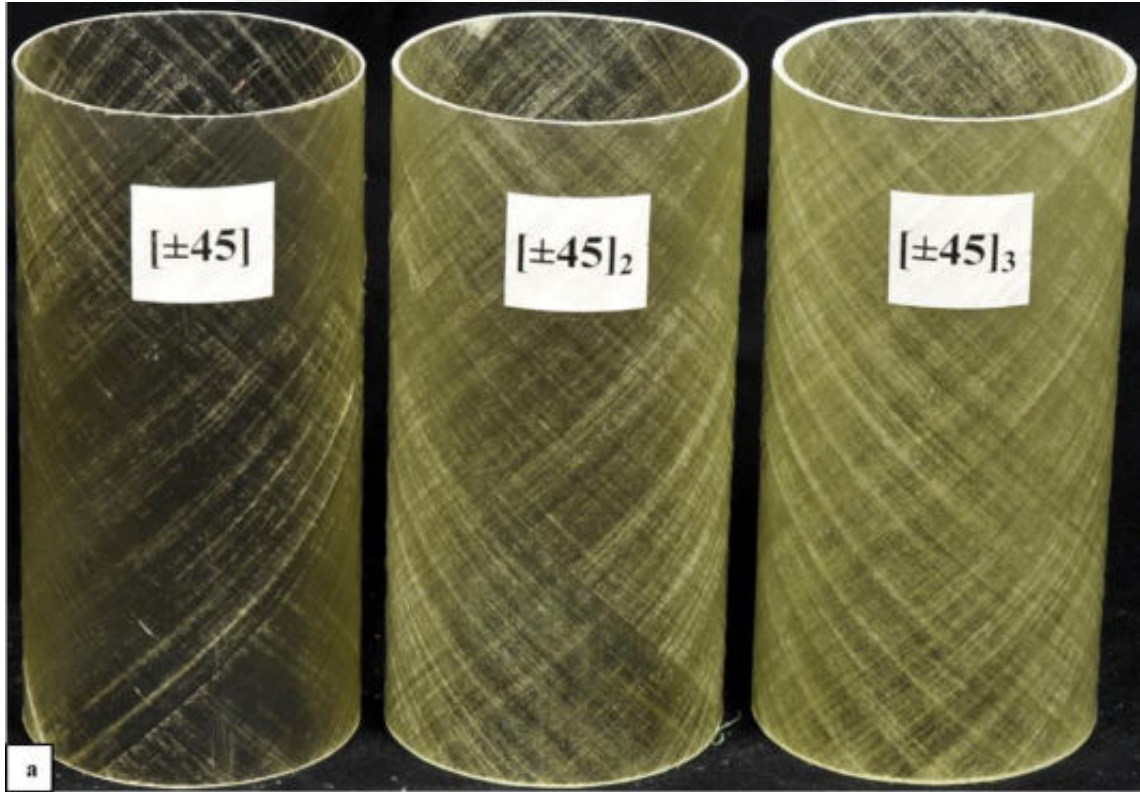


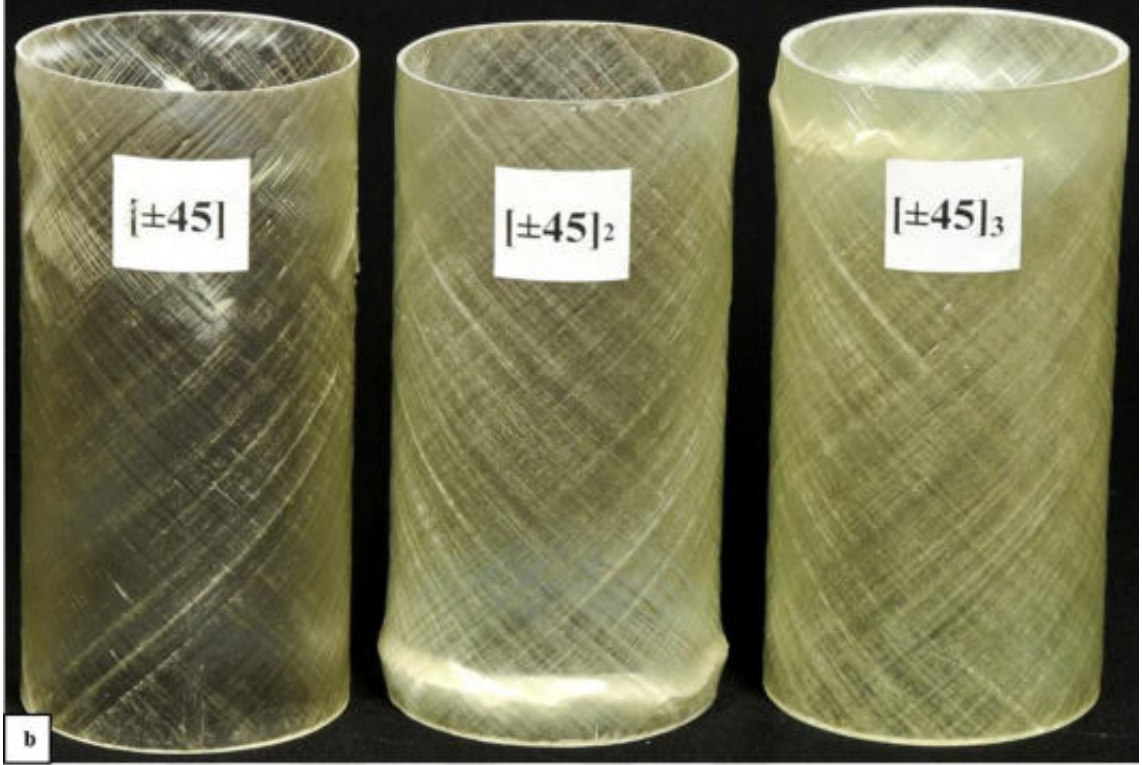
Şekil 4.33. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.34'te basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 45^\circ$ elyaf açısına sahip numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı numunelerde sünek bir davranış oluşturmuş ve lokal burkulma etkisi ile oluşan hasarlar meydana getirmiştir. Her ne kadar sünek bir davranış göstermiş olsa da 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük değere, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2,4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almamış $\pm 45^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 12.159 kN, 37.31 kN ve 60.2 kN'dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



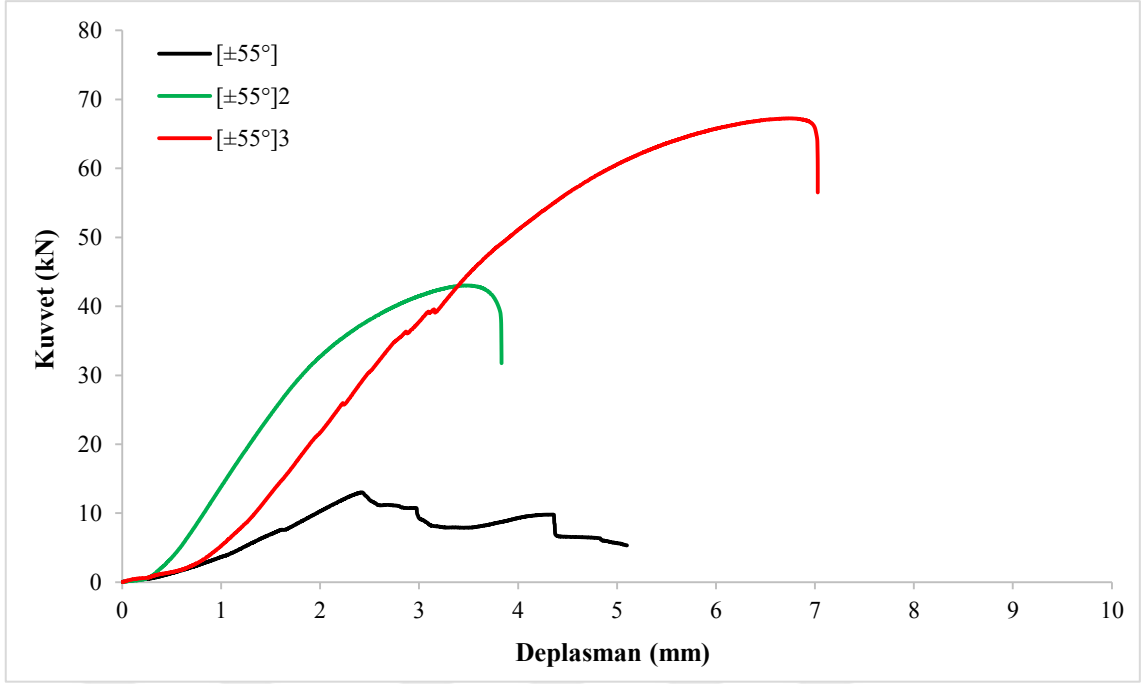
Şekil 4.34. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



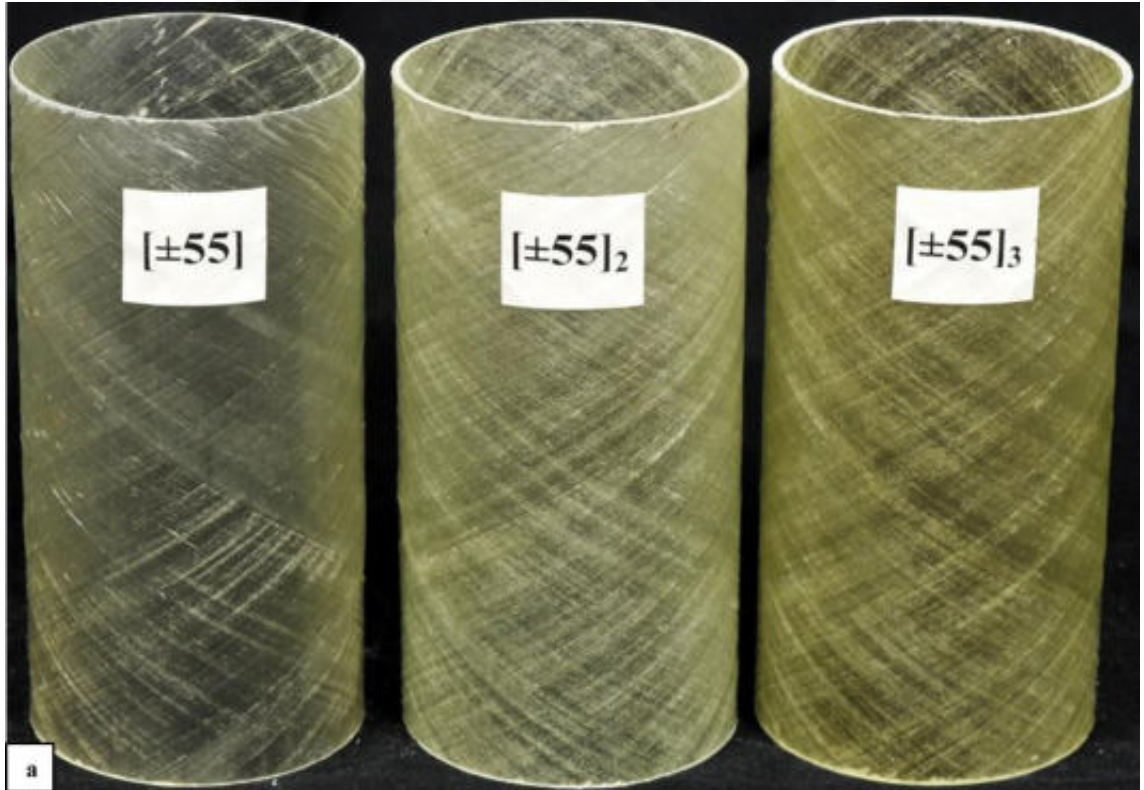


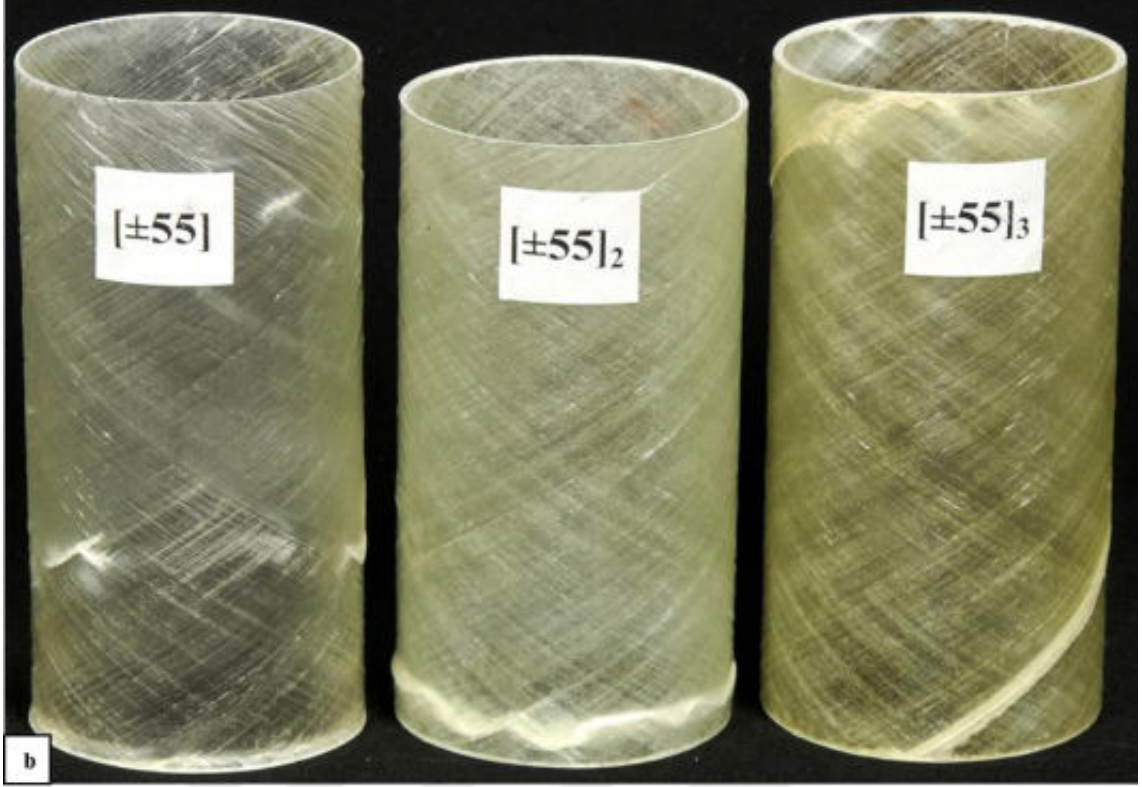
Şekil 4.35. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.36'da basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 55^\circ$ elyaf açısına sahip numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı numunelerde sünek bir davranış oluşturmuş ve burkulma etkisi ile oluşan hasarlar meydana getirmiştir. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almamış $\pm 55^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 13.014 kN, 43.017 kN ve 67.251 kN'dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.37'de gösterilmiştir.



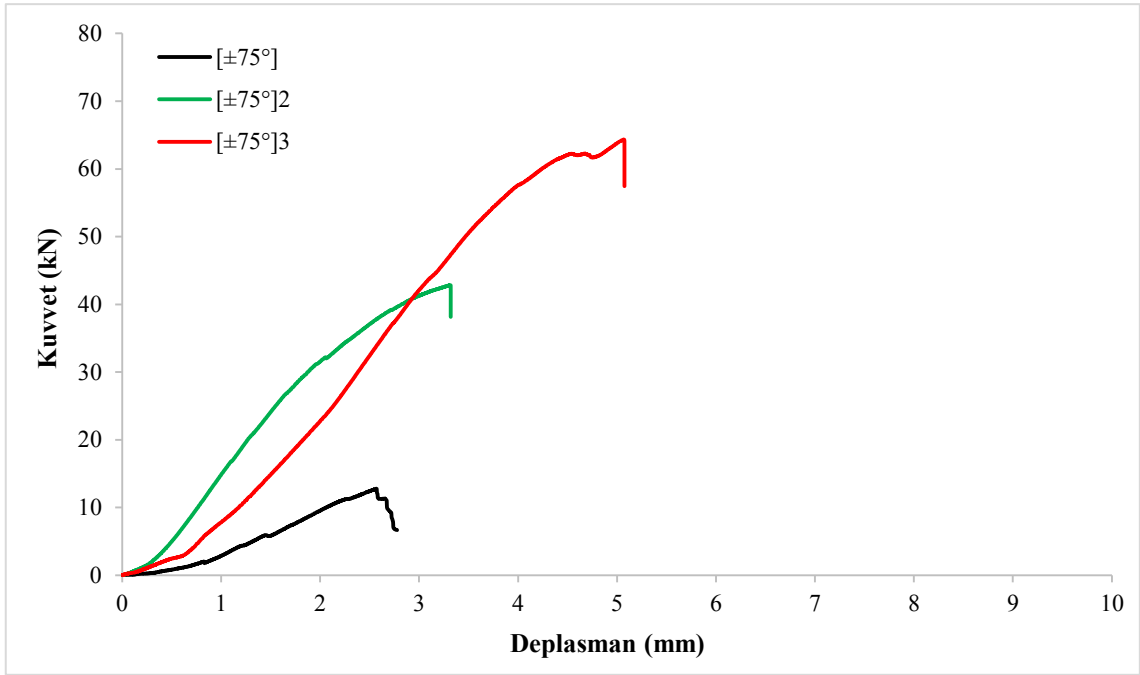
Şekil 4.36. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





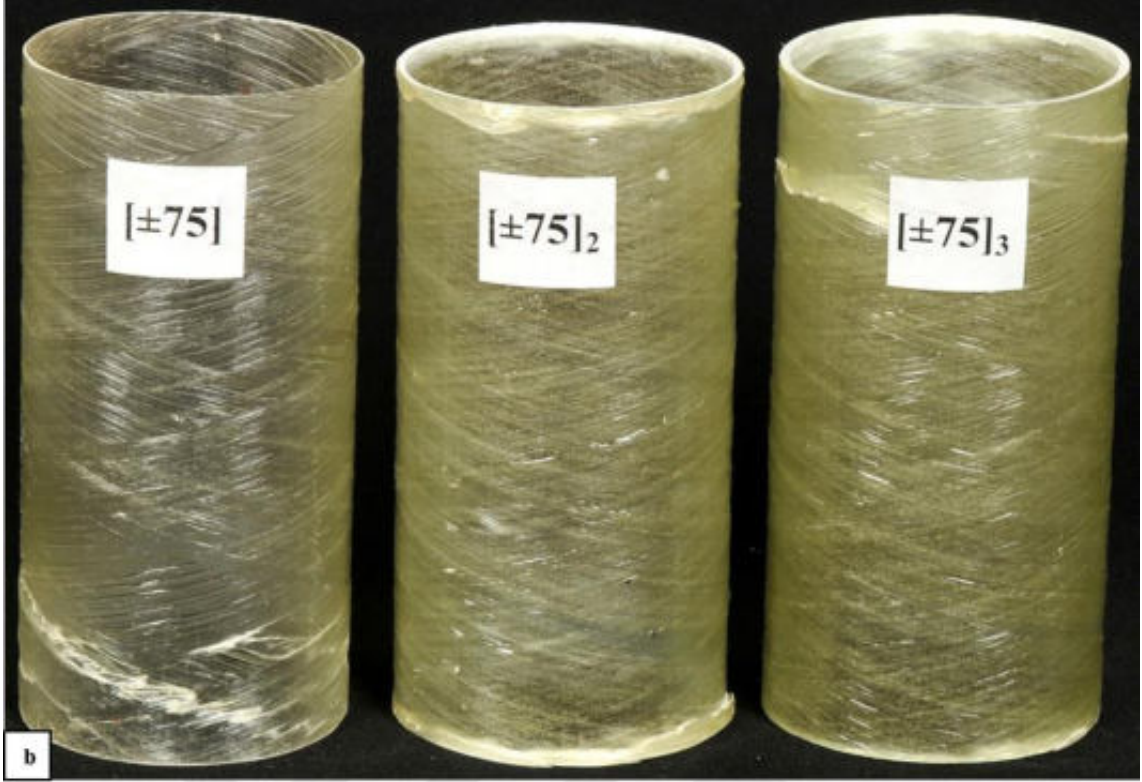
Şekil 4.37. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.38’de basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 75^\circ$ elyaf açısına sahip numuneler üzerinde ki etkisi görülmektedir. Eksenel basma kuvvetinin 2 tabakalı numunelerdeki süneklik davranışı artık görülmemiştir tüm numuneler rijit davranmıştır. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almamış $\pm 75^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 12.782 kN, 42.843 kN ve 64.347 kN’dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



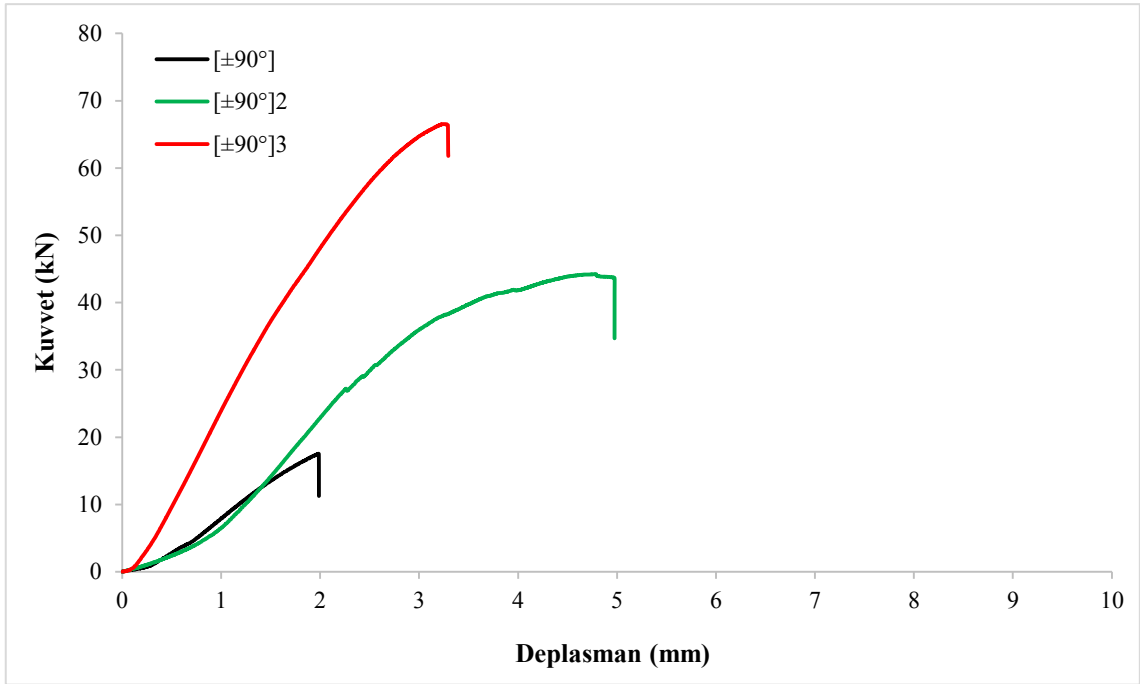
Şekil 4.38. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



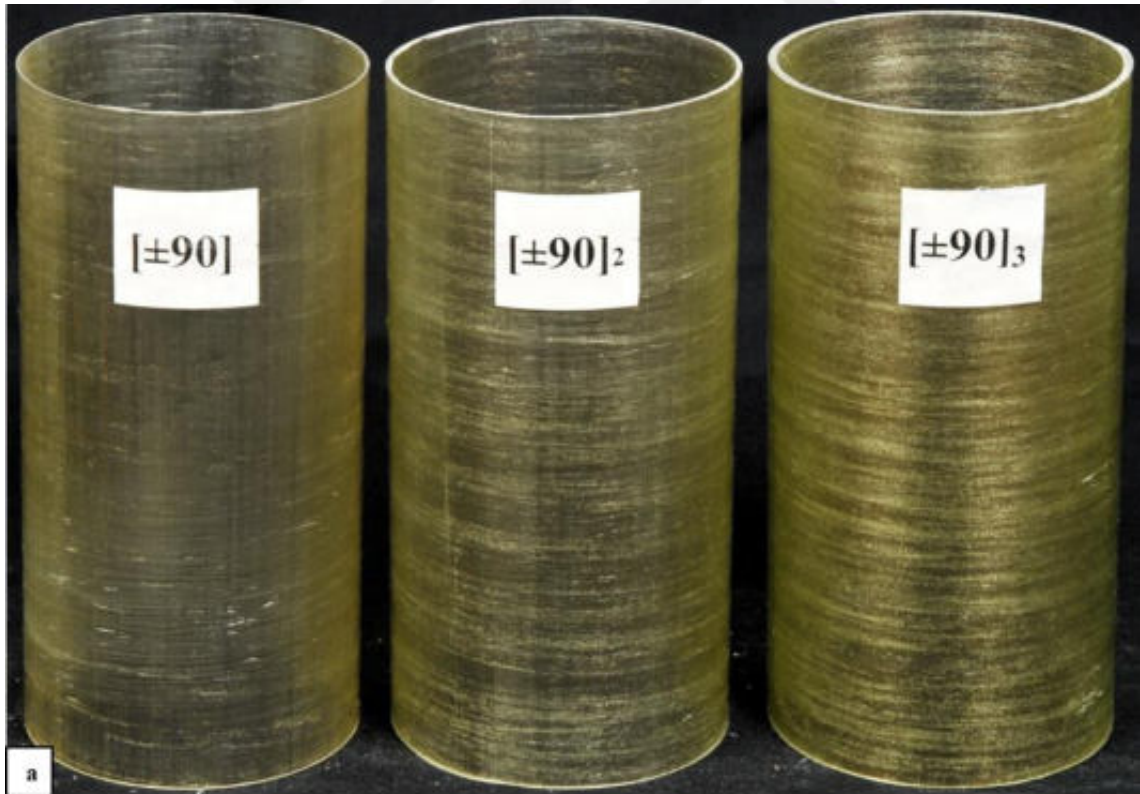


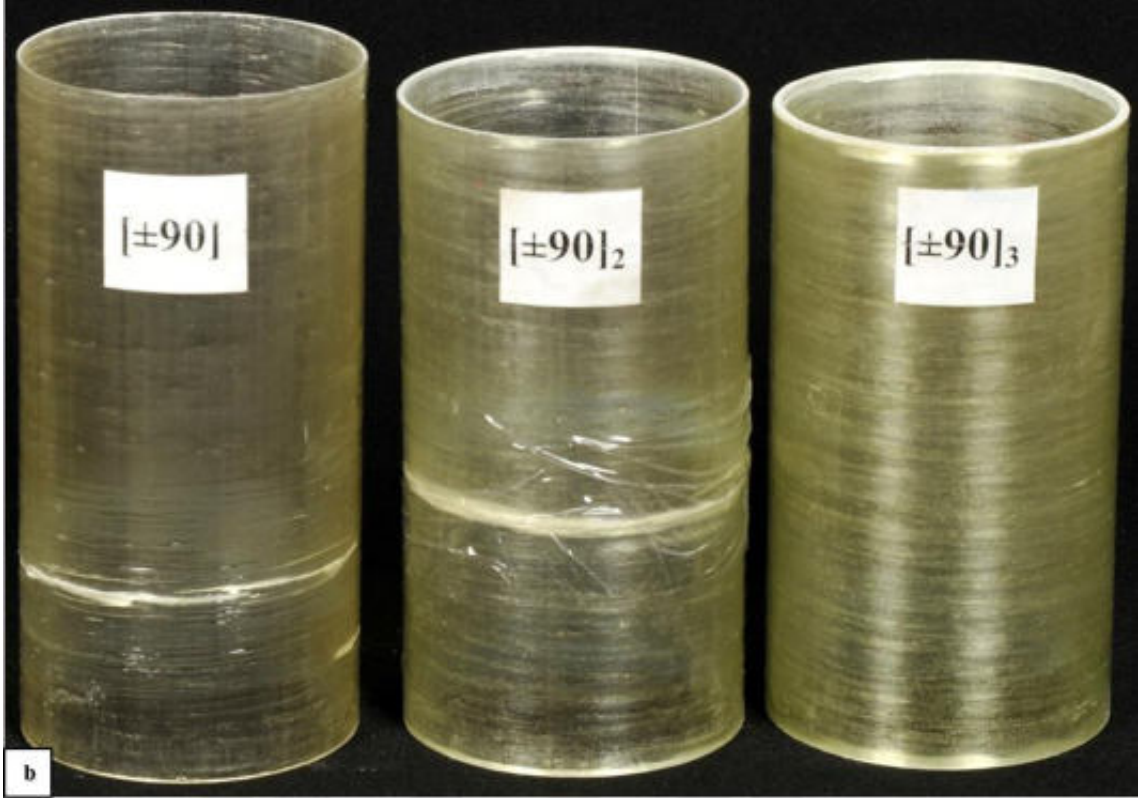
Şekil 4.39. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.40'ta basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 90^\circ$ elyaf açısına sahip numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almamış $\pm 90^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 17.547 kN, 44.243 kN ve 66.536 kN'dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.41'de gösterilmiştir.



Şekil 4.40. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.41. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbesiz basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

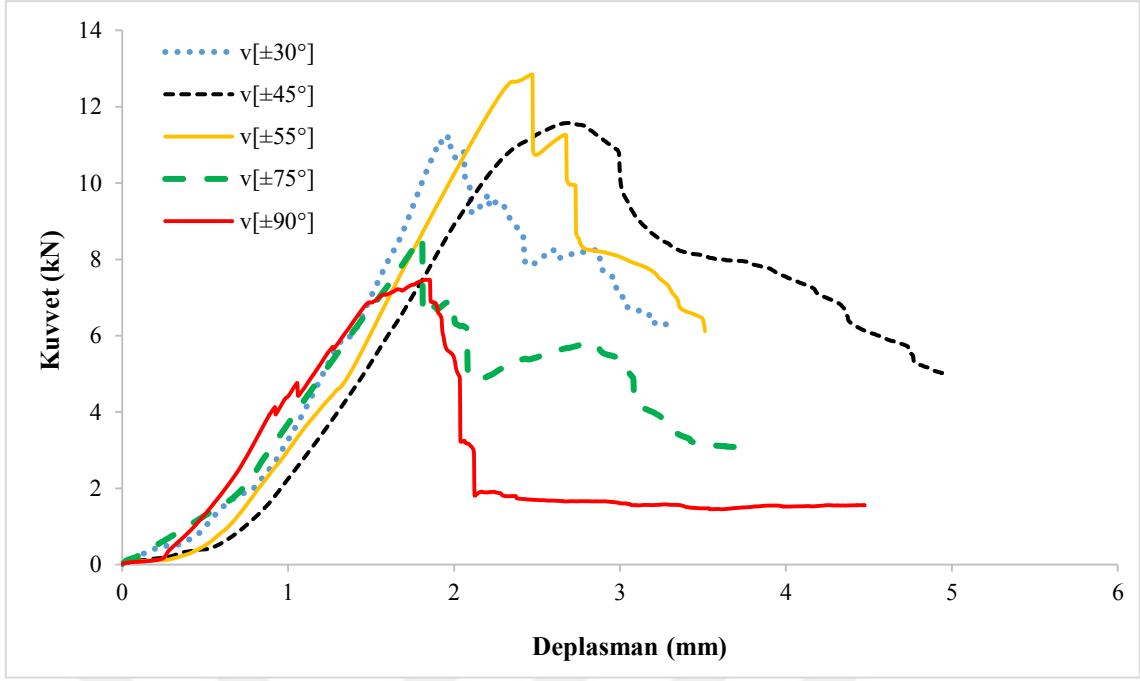
4.3.2. Darbe hasarı almış numunelere ait basma deneyi sonuçları

Darbe hasarı almış; boyu 150 mm, iç çapı $\varnothing 72$ mm olan $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ elyaf sarım açısına sahip 2, 4 ve 6 tabakalı filaman sarım borulara yapılan CAI deneyi sunucunda sarım açısının tabaka sayısı üzerinde etkisini gösteren kuvvet-deplasman grafiği Şekil 4.42, 4.49, 4.56'da verilmektedir. Basma kuvveti altında numunelerin zamana bağlı deformasyon durumları ve taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Deney sonucunda elde edilen maksimum kuvvet, deplasman ve gerilme değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

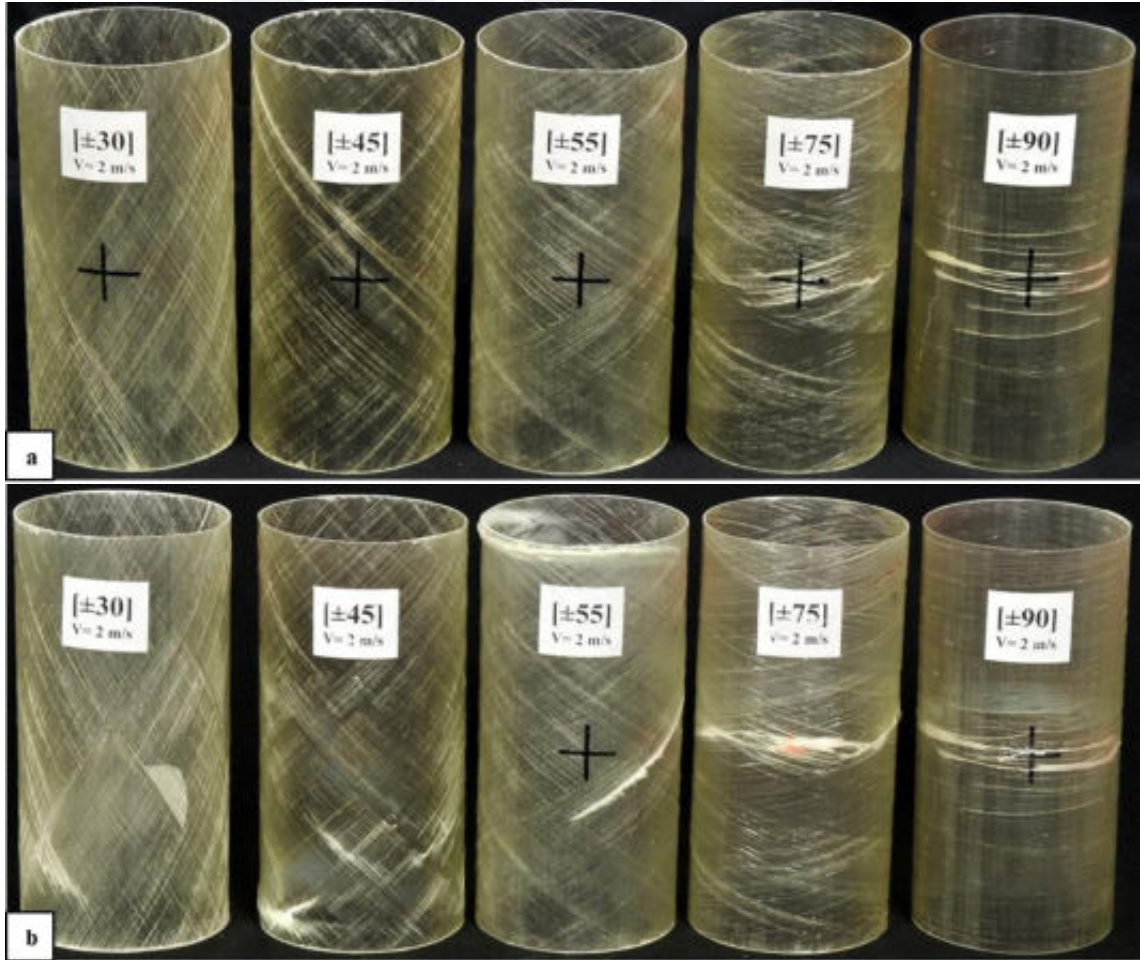
Çizelge 4.4. Darbe hasarlı CTP borularına uygulanan basma deneyinde elde edilen veriler

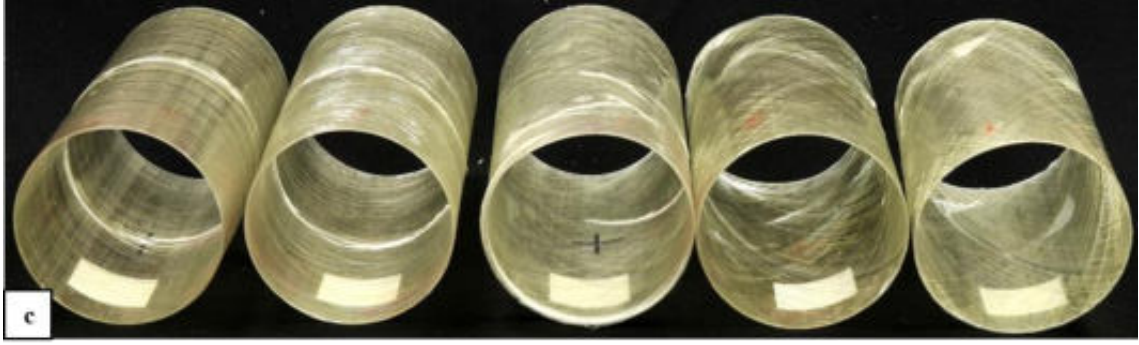
Tabaka Sayısı	Sarım Açısı	Darbe Hızı (m/s)	Max. Kuvvet (kN)	Gerilme (N/mm ²)	Deplasman (mm)
2	[±30°]	2	11.228	20.02	3.291
	[±45°]	2	11.577	20.64	4.941
	[±55°]	2	12.848	22.9	3.513
	[±75°]	2	8.584	15.3	3.799
	[±90°]	2	7.469	13.31	4.475
4	[±30°] ₂	2	40.661	72.48	2.703
	[±45°] ₂	2	36.485	65.04	5.599
	[±55°] ₂	2	36.87	65.73	4.999
	[±75°] ₂	2	22.583	40.26	2.999
	[±90°] ₂	2	28.934	51.58	2.006
6	[±30°] ₃	2	57.738	102.93	2.771
	[±45°] ₃	2	60.049	107.05	5.326
	[±55°] ₃	2	58.847	104.9	4.183
	[±75°] ₃	2	56.443	100.62	5.549
	[±90°] ₃	2	41.829	74.57	3.309

Şekil 4.42’de CAI deneyi sonrası farklı sarım açılarının 2 tabaka üzerinde ki etkisi görülmektedir. Genel olarak 2 tabakalı numunelerde tabaka sayısının az olması sebebiyle elyaf açısının etkisi gözlenmemiştir. CAI deneyinde darbe hasarının etkisi v[±75°] ve v[±90°] sarım açısına sahip numunelerde görülmüştür. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı numunelerde lokal burkulma etkisi ile oluşan hasarlar meydana getirmiş ve maksimum kuvvete ulaştıktan sonra malzemenin kendini toparlamaya çalışması ilerlemeli bir hasarın gerçekleşmesinden kaynaklı olduğunu göstermektedir. v[±55°] sarım açısına sahip numunelerin maksimum kuvvet değeri diğer 2 tabakalı numunelere kıyasla daha büyük bir değere ulaşmıştır. 2 tabakalı numunelerin maksimum kuvvet değerleri 4 ve 6 tabakalı numunelerin değerlerine göre daha az olduğu görülmüştür. 2 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.43’te gösterilmiştir.



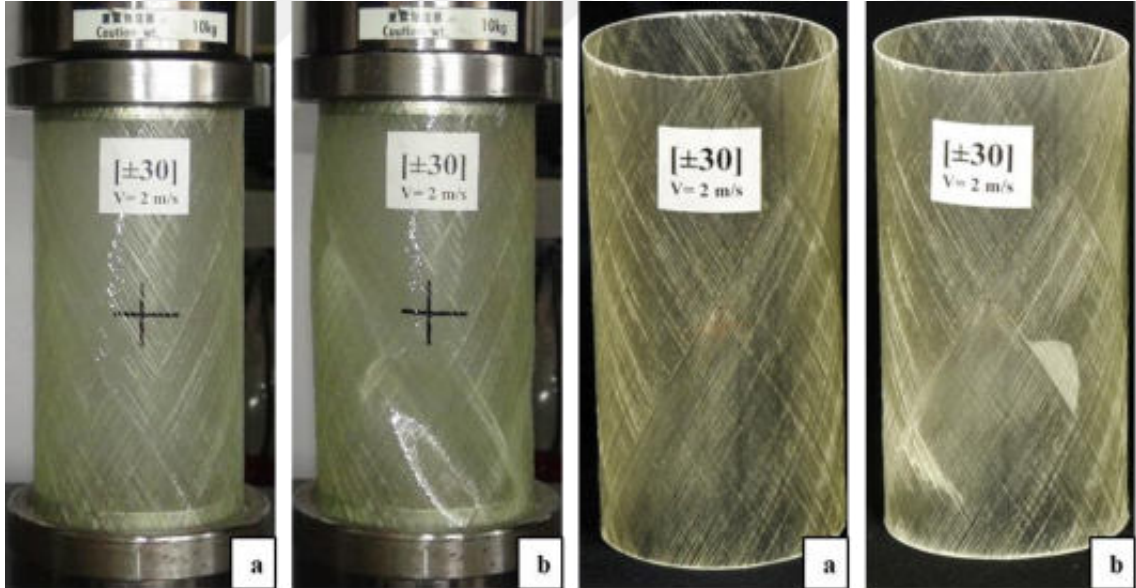
Şekil 4.42. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.43. 2 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı

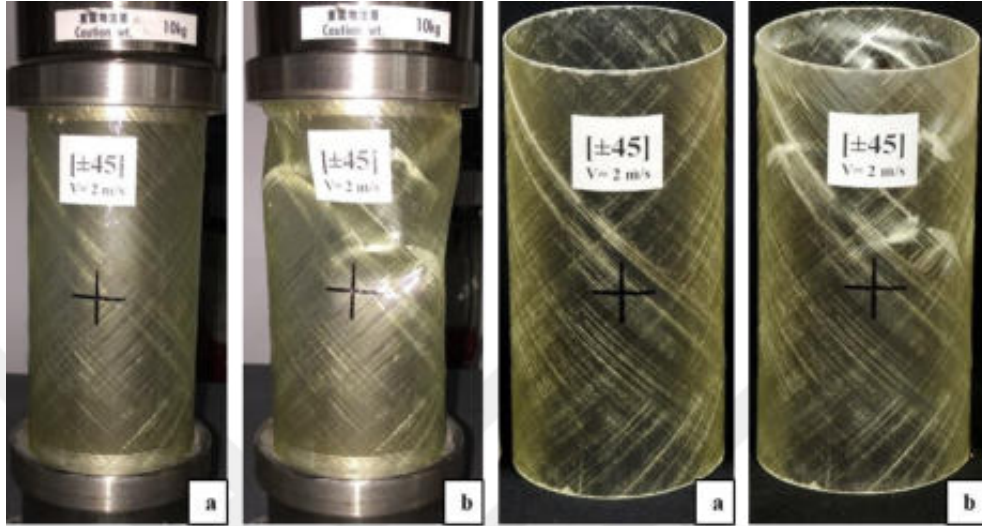
- $v[\pm 30^\circ]$ sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra artan kuvvet etkisiyle lokal burkulmalar meydana gelmiş ve numunede burkulmanın meydana geldiği hasar bölgelerinde matris çatlakları ve delaminasyon (tabaka ayrılması) olduğu gözlenmiştir. Numunede darbenin etkisi görülmemiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 11.228 kN, 3.291 mm, 20.02 N/mm²'dir. Şekil 4.44'te $v[\pm 30^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.44. 2 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

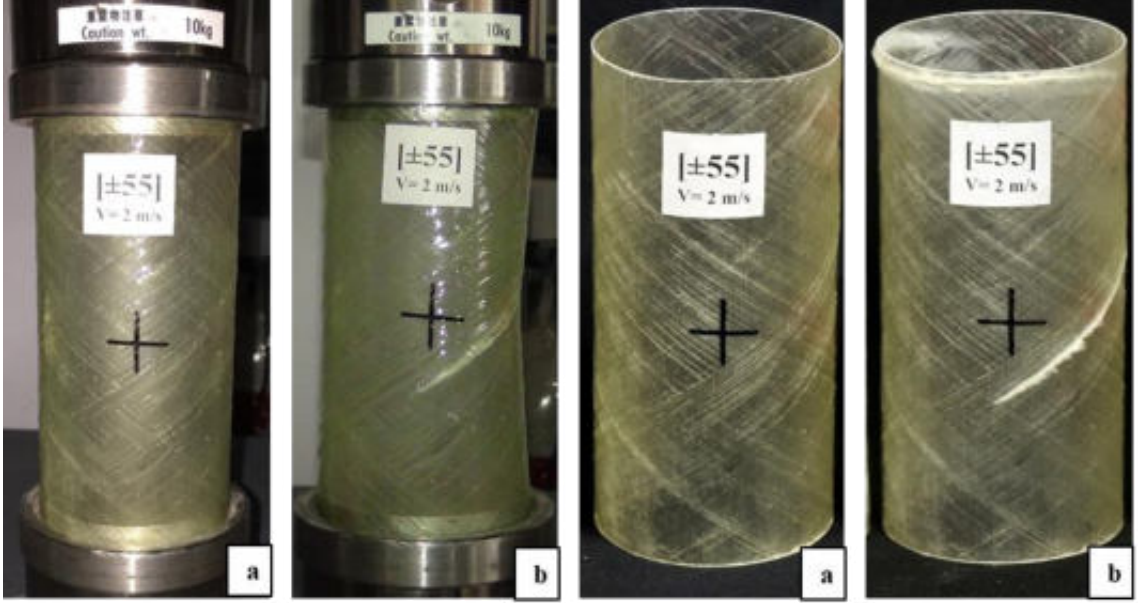
- $v[\pm 45^\circ]$ sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra artan kuvvetle lokal burkulma hasarları meydana gelmiştir. Burkulan bölgelerde matris çatlakları ve ardından tabaka ayrılmalarının olduğu gözlenmiştir. Numunede

darbenin etkisi görülmemiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 11.577 kN, 4.941 mm, 20.64 N/mm²'dir. Şekil 4.45'te v[±45°] sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



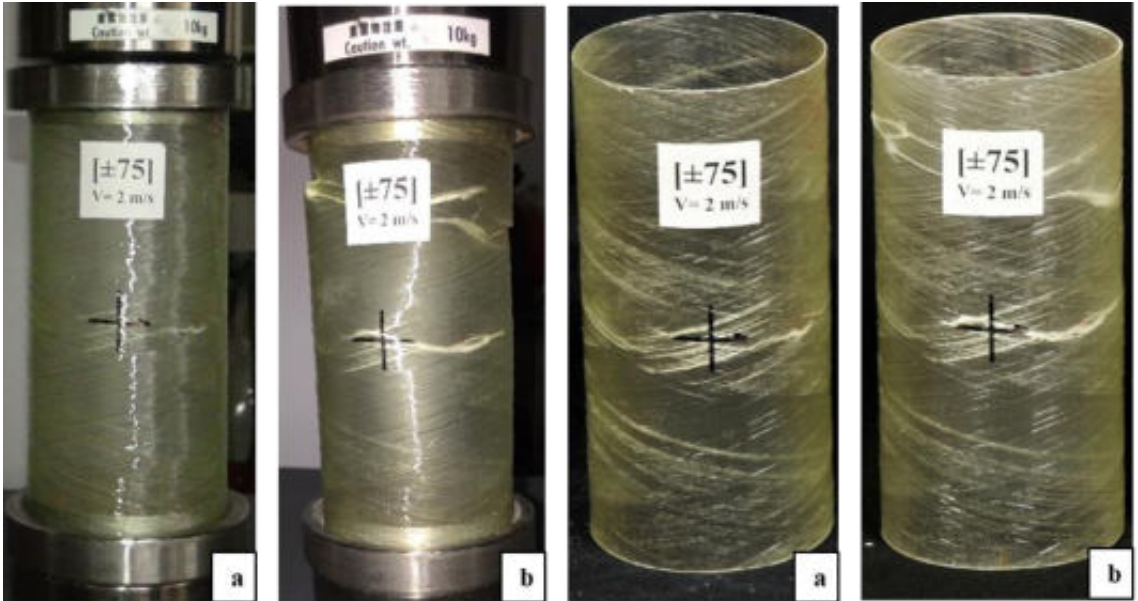
Şekil 4.45. 2 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- v[±55°] sarım açısına sahip numuneye yük uygulanmaya başladıktan sonra artan kuvvet etkisiyle burkulma meydana gelmiştir ve renklenmelere sebep olmuştur. Burkulma hasarı tabaka çatlaklarına ve elyaf kırılmasına neden olmuştur. Numunede darbenin etkisi görülmemiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 12.848 kN, 3.513 mm, 22.90 N/mm²'dir. Şekil 4.46'da v[±55°] sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



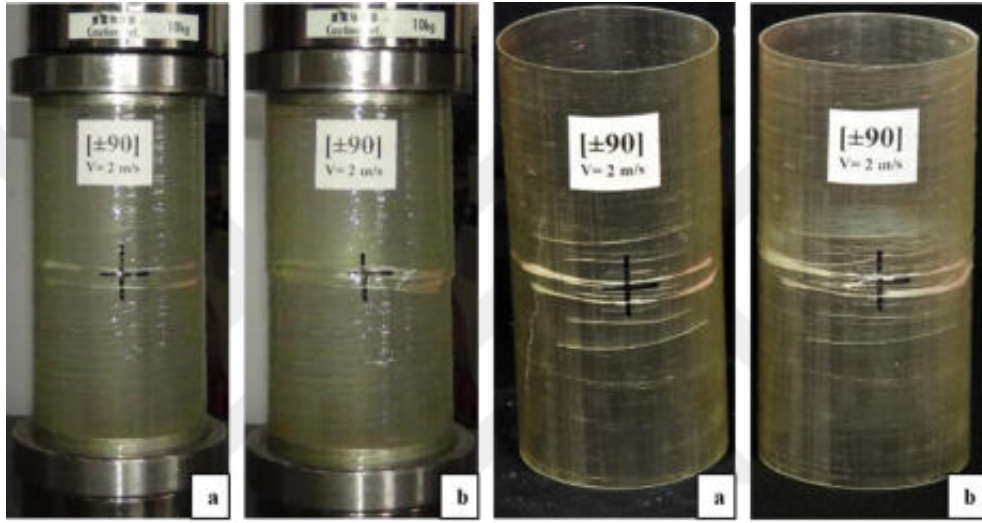
Şekil 4.46. 2 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 75^\circ]$ sarım açısına sahip numunede öncelikle burkulma meydana gelmiştir. Bu numunede öncesinde hasar aldığı darbe noktasından başlayan matris çatlakları ve elyaf kopmaları oluşmuştur. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 8.584 kN, 3.799 mm, 15.30 N/mm^2 'dir. Şekil 4.47'de $v[\pm 75^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



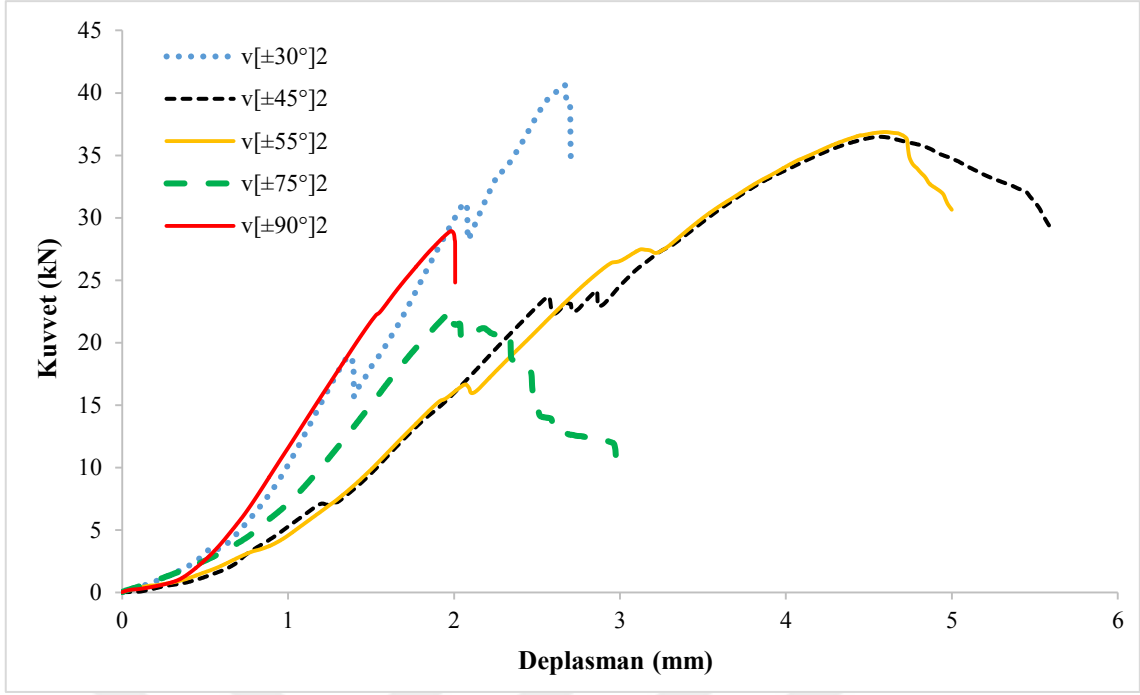
Şekil 4.47. 2 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 90^\circ]$ sarım açısına sahip numunede yükleme elyaf açısına dik doğrultuda olduğu için numune sünek bir davranış göstermemiş ve burkulma meydana gelmemiştir. Numunenin hasar aldığı darbe bölgesinde tabaka ayrılması ve elyaf kopması oluşmuştur. Deney sonucunda maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 7.469 kN, 4.475 mm, 13.31 N/mm^2 'dir. Diğer 2 tabakalı darbeli numunelere göre bu numunenin maksimum kuvvet değeri daha az çıkmıştır. Şekil 4.48'de $v[\pm 90^\circ]$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.

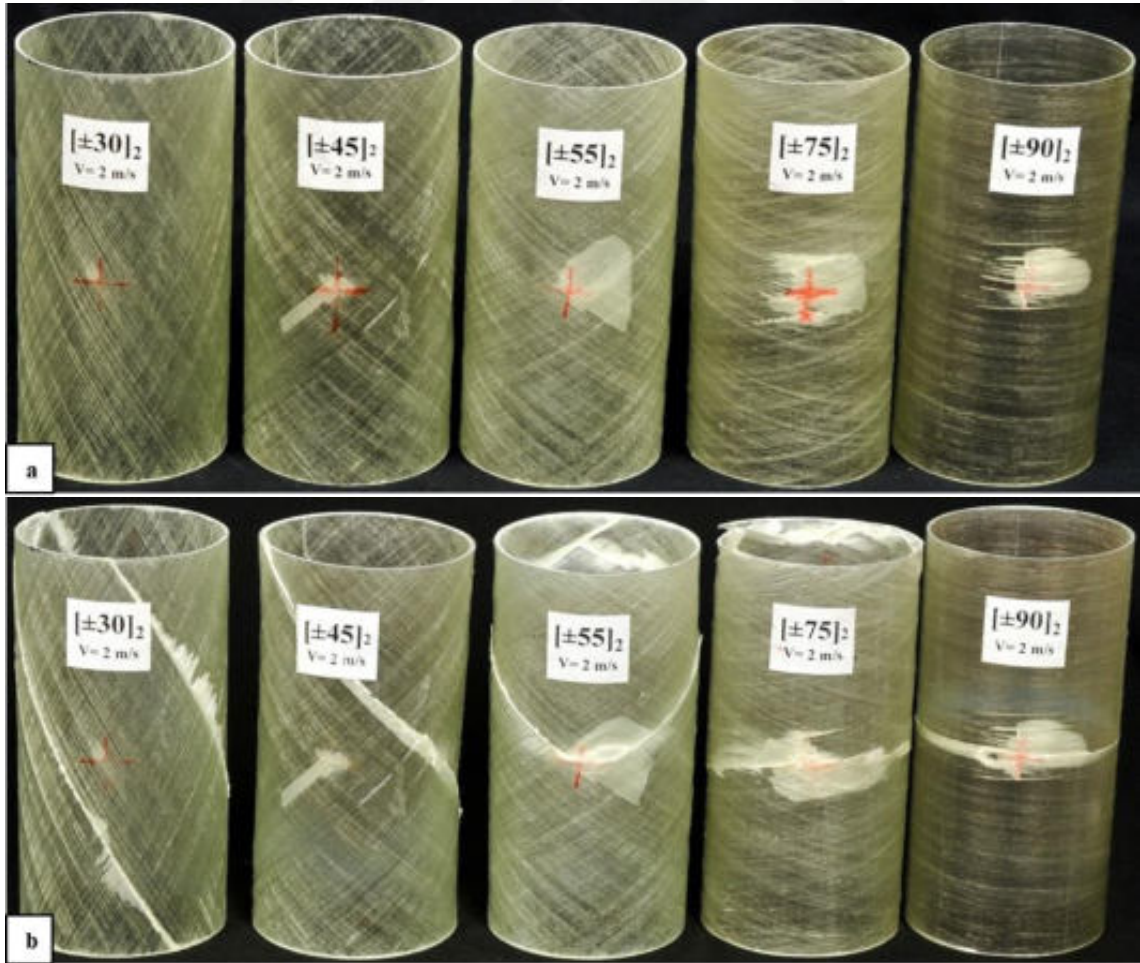


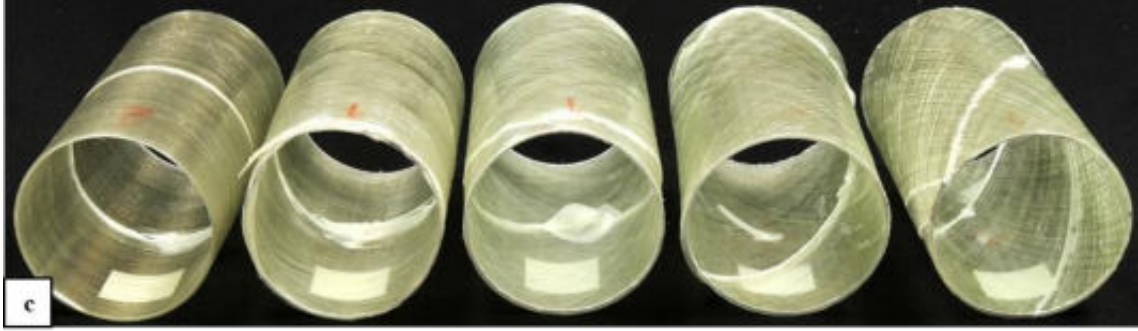
Şekil 4.48. 2 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.49'da basma deneyi sonrası farklı sarım açılarının 4 tabaka üzerindeki etkisi görülmektedir. 4 tabakalı numunelerde süneklik etkisi azalmış ve burkulma görülmemiştir. Basma deneyinde darbenin etkisi $v[\pm 55^\circ]_2$, $v[\pm 75^\circ]_2$ ve $v[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunelerde görülmüştür. Deney sonucunda elde edilen verilere göre $v[\pm 30^\circ]_2$ sarım açısına sahip numune diğer numunelere göre 40.661 kN değeriyle en büyük maksimum kuvvete ulaşmıştır. 4 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.50'de gösterilmiştir.



Şekil 4.49. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.50. 4 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı

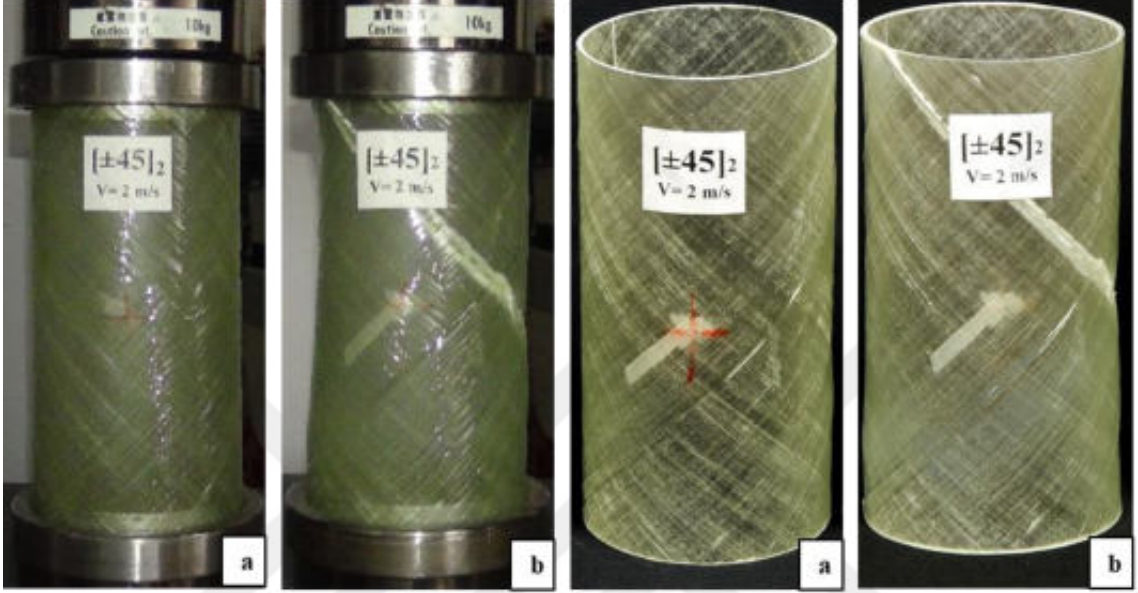
- $v[\pm 30^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunede darbenin etkisi görülmemiştir. Yükleme ile beraber sarım açısı doğrultusunda numune boyunca matris çatlakları ve elyaf yarıлма hasarları meydana gelmiştir. Maksimum kuvveti gördüğü noktada yıkımsal bir hasar sonucu ani bir düşüş ile sonlanmıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 40.661 kN, 2.703 mm, 72.49 N/mm²'dir. Şekil 4.51'de $v[\pm 30^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.51. 4 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

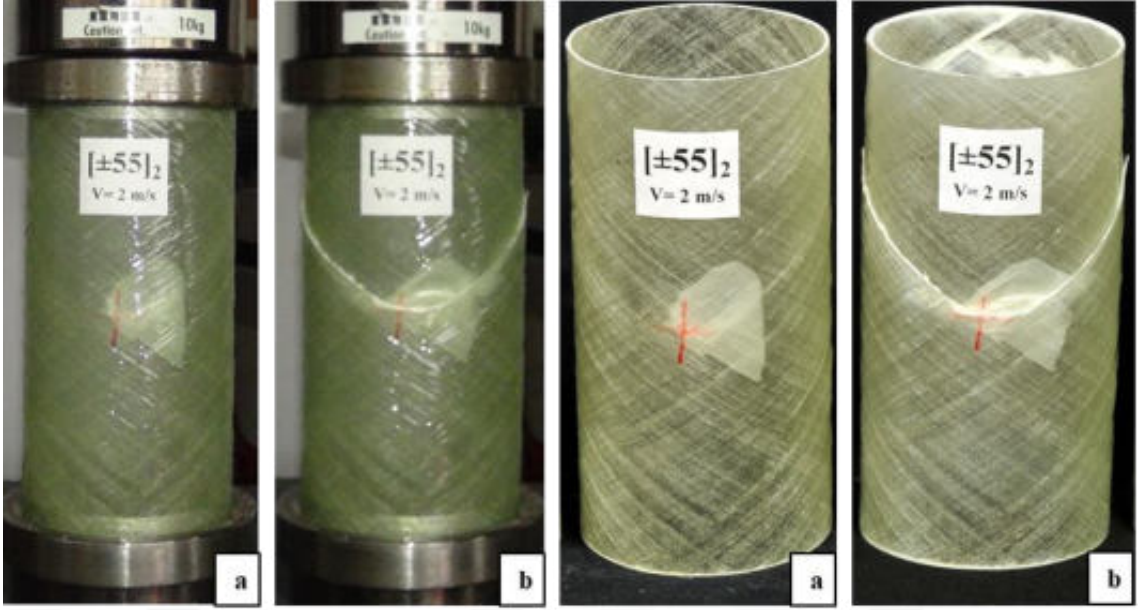
- $v[\pm 45^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunede darbe etkisi görülmemiştir. Artan kuvvet etkisiyle beyazlaşma ve açı doğrultusunda elyaf yarıлма hasarları meydana gelmiştir. Ayrıca darbe hasarı alınan noktadaki delaminasyon elyafın sarım açısı doğrultusunda

artış göstermiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 36.485 kN, 5.599 mm, 65.04 N/mm²'dir. Şekil 4.52'de $v[\pm 45]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



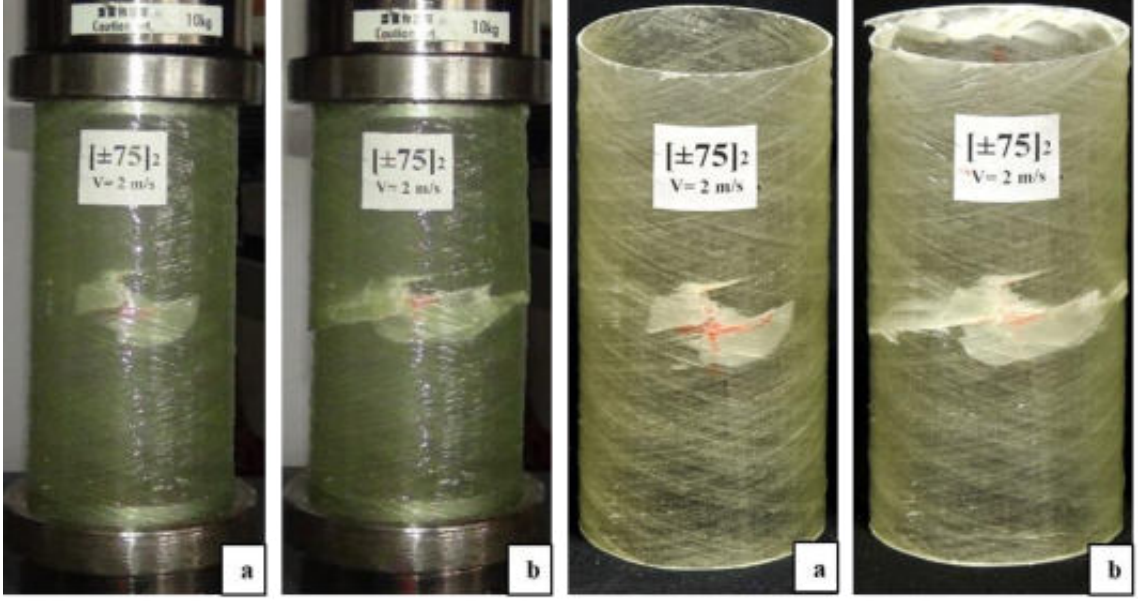
Şekil 4.52. 4 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 55]_2$ sarım açısına sahip numunede darbe etkisi görülmüştür. Darbe kuvvetiyle delaminasyon hasarı aldığı bölgeden başlayarak artış göstermiş ve açı doğrultusunda elyaf yarıma hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 36.87 kN, 4.999 mm, 65.73 N/mm²'dir. Şekil 4.53'te $v[\pm 55]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



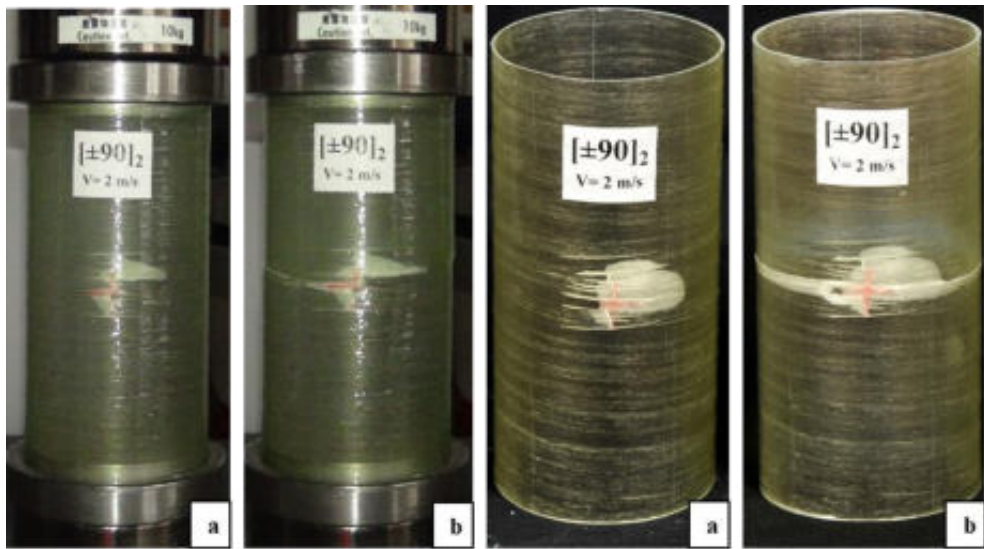
Şekil 4.53. 4 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 75^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunede darbe etkisi görülmüştür. Diğer 4 tabakalı numunelere göre darbe hasarı daha fazla alan kaplaması gevrek kırılmayı engellemiştir. Maksimum kuvvetten sonra ilerlemeli bir hasar olarak sonuç hasarına ulaşmıştır. Darbe kuvvetiyle oluşan delaminasyon sonucu tabakaların ayrı ayrı çalışmasıyla bu bölgede matris çatlaklarına ve elyaf yarıma hasarlarına sebep olmuştur. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 22.583 kN, 2.999 mm, 40.26 N/mm²'dir. Şekil 4.54'te $v[\pm 75^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



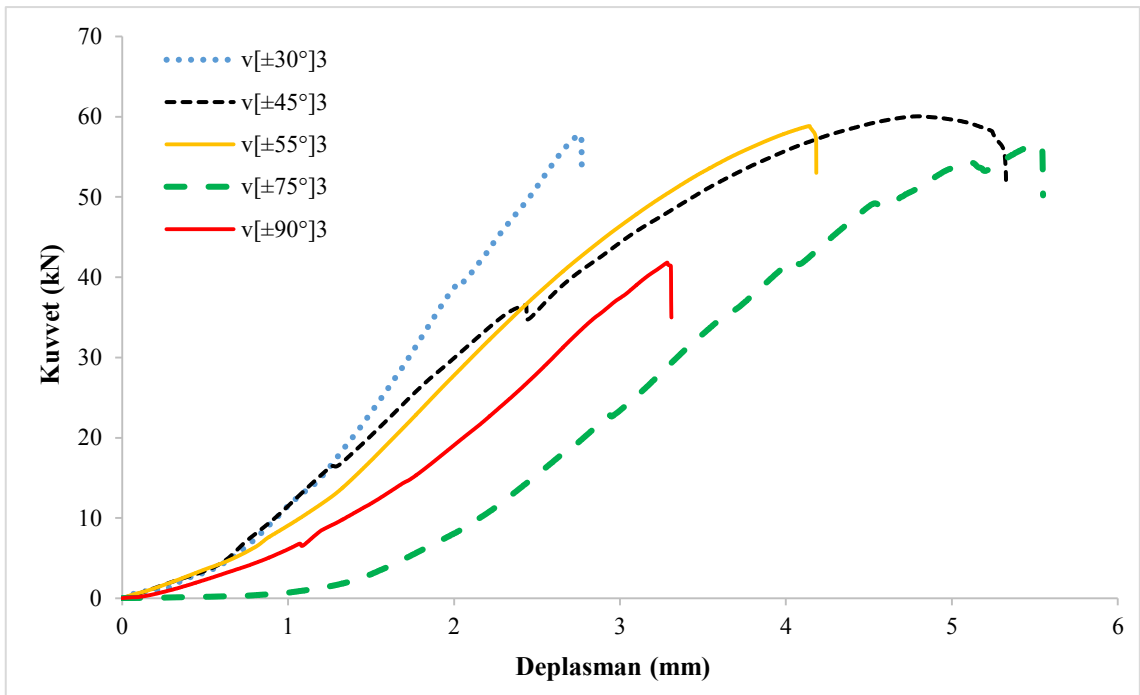
Şekil 4.54. 4 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunede darbe etkisi görülmüştür. Numunenin aldığı yük maksimum değere ulaştığında kuvvette ani bir düşüş yaşanmış ve sonuç hasarına uğramıştır. Darbe bölgesinde delaminasyonun etkisiyle sarım açısı doğrultusunda elyaf yarıma hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 28.934 kN, 2.006 mm, 51.58 N/mm²'dir. Şekil 4.55'te $v[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.

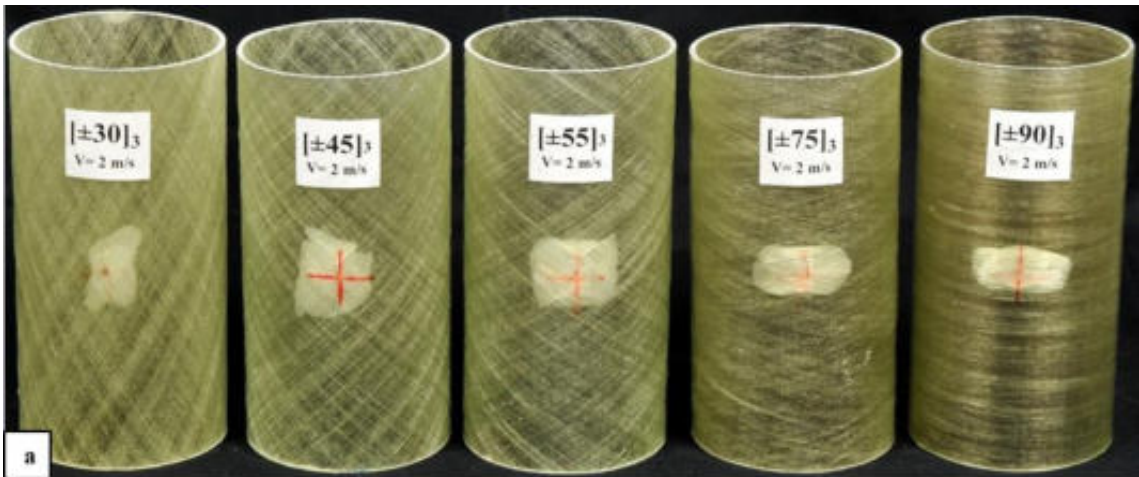


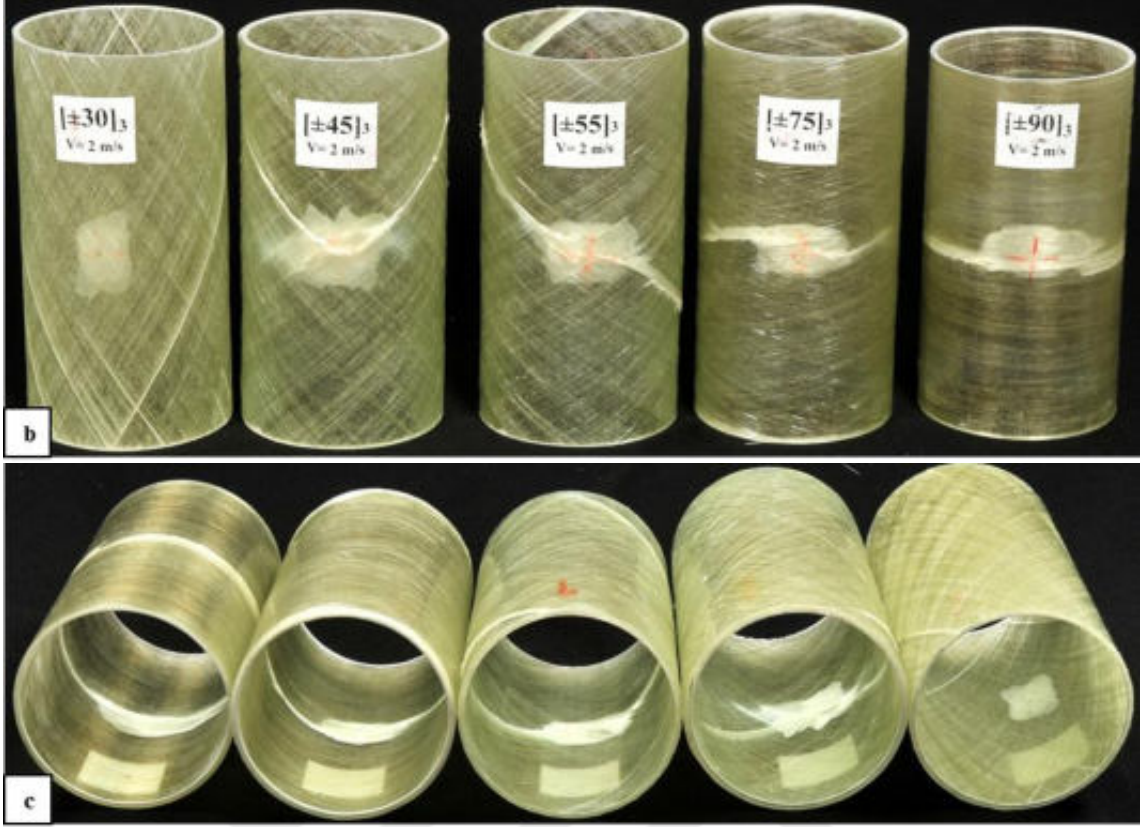
Şekil 4.55. 4 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numunelerin a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.56'da basma deneyi sonrası farklı sarım açılarının 6 tabaka üzerindeki etkisi görülmektedir. 6 tabakalı numunelerde süneklik etkisi görülmemiştir. Basma deneyinde darbenin etkisi $v[\pm 45^\circ]$, $v[\pm 55^\circ]_2$, $v[\pm 75^\circ]_2$ ve $v[\pm 90^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunelerde görülmüştür. Deney sonucunda elde edilen verilere göre $v[\pm 45^\circ]_2$ sarım açısına sahip numune diğer numunelere göre 60.049 kN değeriyle en büyük maksimum kuvvete ulaşmıştır. En küçük maksimum kuvvet değeri ise 41.829 kN değerini alan $v[\pm 90^\circ]_3$ sarım açısına sahip numune olmuştur. 6 tabakalı numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.57'de gösterilmiştir.



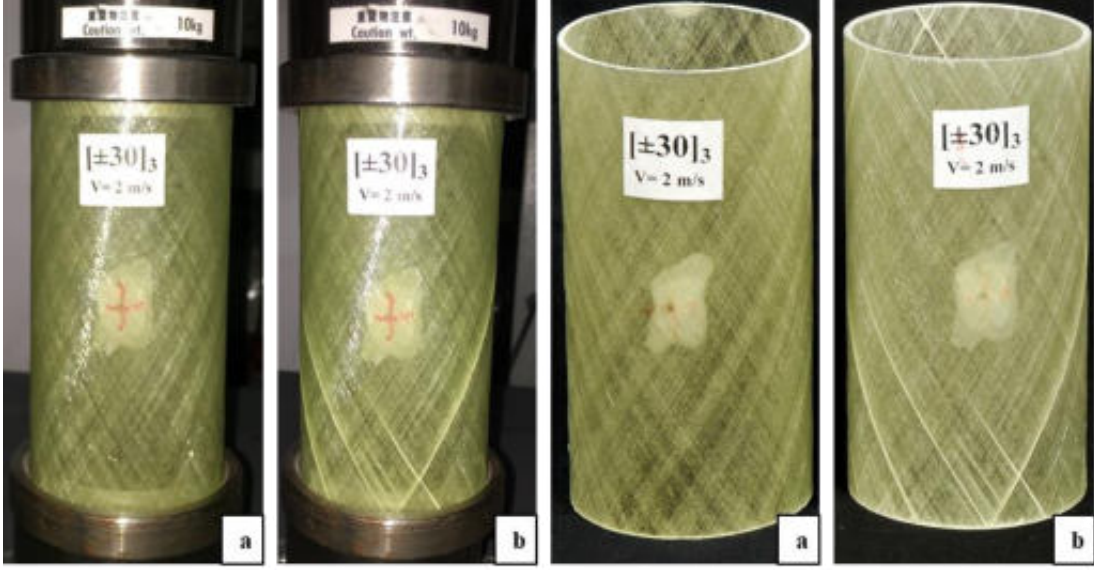
Şekil 4.56. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeleri numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





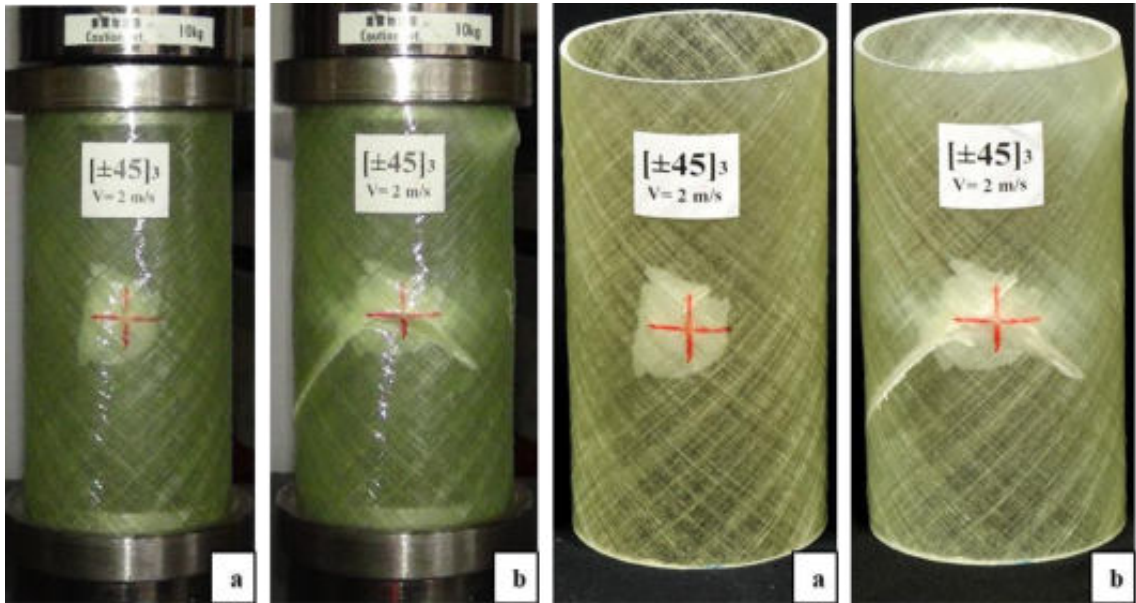
Şekil 4.57. 6 tabakalı (30°), (45°), (55°), (75°), (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi b) deney sonrası c) iç hasarı

- $v[\pm 30^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede darbe etkisi görülmemiştir. Maksimum kuvvete eriştikten sonra ani bir düşüşle sonuç hasarına ulaşmıştır. Eksenel yüklemeye beraber elyaf açısı doğrultusunda matris çatlakları ve bütün numuneyi dolaşan elyaf doğrultusunda yarıлма hasarı meydana gelmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 57.738 kN, 2.771 mm, 102.93 N/mm²'dir. Şekil 4.58'de $v[\pm 30^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



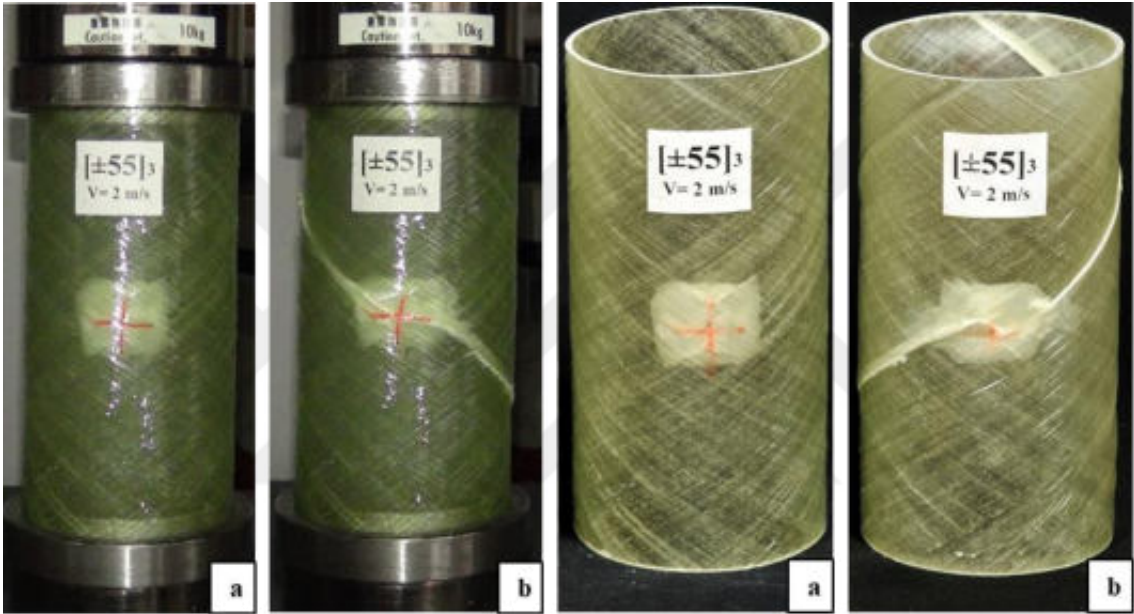
Şekil 4.58. 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 45^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede darbe hasarının etkisi görülmüştür. Darbe hasarının olduğu bölgede delaminasyon artarak sarım açısı doğrultusunda elyaf doğrultusunda yarıma hasarı meydana gelmiştir. Numunenin üst başlığında lokal beyazlaşmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 60.049 kN, 5.326 mm, 107.05 N/mm^2 'dir. Şekil 4.59'da $v[\pm 45^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



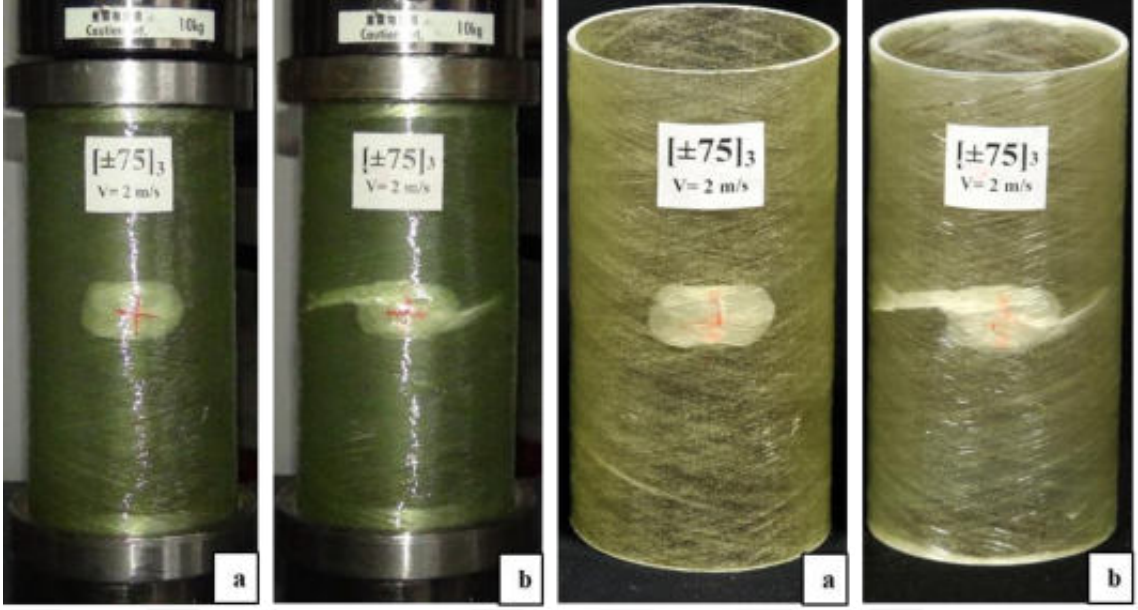
Şekil 4.59. 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 55^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede darbe hasarının etkisi görülmüştür. Maksimum kuvvete eriştiğinde ani bir düşüş yaşanmış ve yıkımsal bir hasarla sonuç hasarına ulaşmıştır. Darbe hasarı aldığı bölgeden başlayıp numune boyunca devam eden sarım açısı doğrultusunda matris çatlakları ve elyaf doğrultusunda yarıлма hasarları gözlenmiştir. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 58.847 kN, 4.183 mm, 104.90 N/mm²'dir. Şekil 4.60'ta $v[\pm 55^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



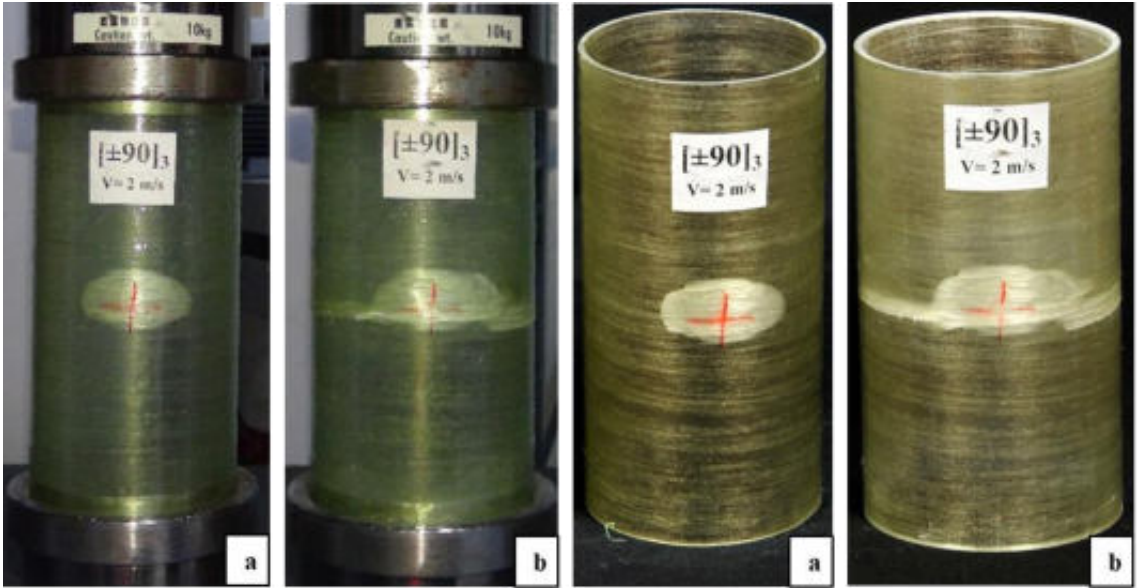
Şekil 4.60. 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

- $v[\pm 75^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede darbe hasarının etkisi görülmüştür. Darbenin etkisiyle oluşan delaminasyon basma kuvvetiyle artış göstererek sarım açısı doğrultusunda yarıılması ile yıkımsal hasara uğramıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 56.443 kN, 5.549 mm, 100.62 N/mm²'dir. Şekil 4.61'de $v[\pm 75^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.61. 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

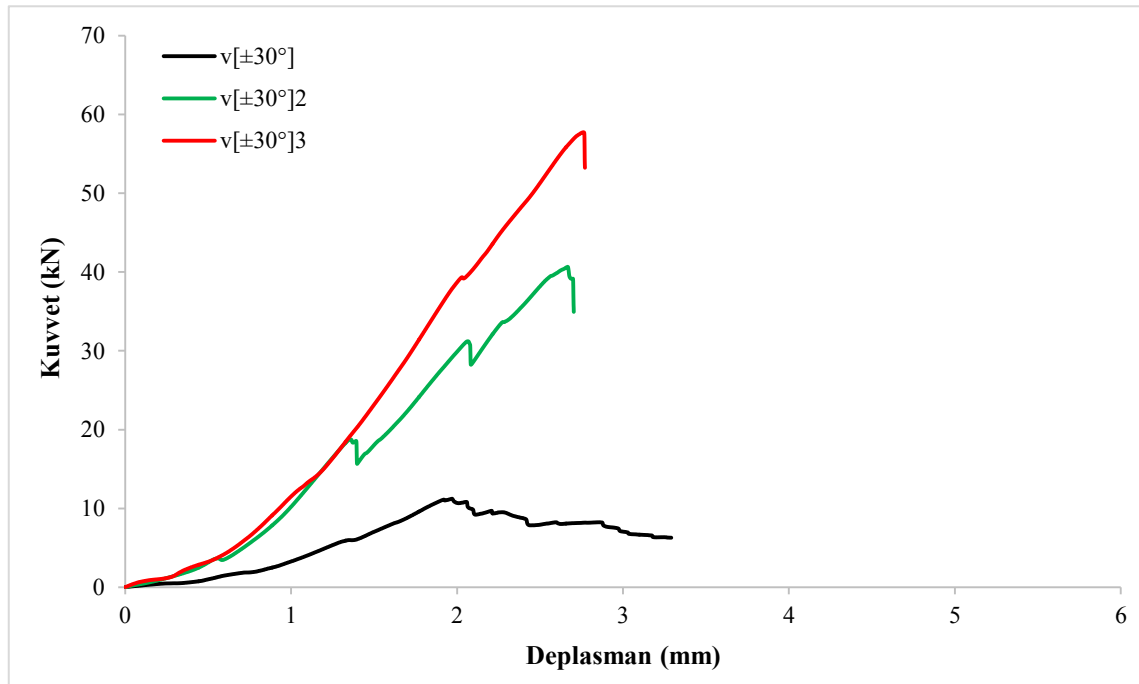
- $v[\pm 90^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede darbe hasarı etkisi gözlenmiştir. Darbe etkisiyle oluşan hasar üzerinde sarım açısı doğrultusunda yarılması ile yıkımsal hasara uğramıştır. Deney sonucunda numunede maksimum kuvvet, maksimum deplasman ve basınç gerilmesi değerleri sırasıyla 41.829 kN, 3.309 mm, 74.57 N/mm²'dir. Şekil 4.62'de $v[\pm 90^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunenin basma deneyi öncesi ve sonrası fotoğrafları verilmiştir.



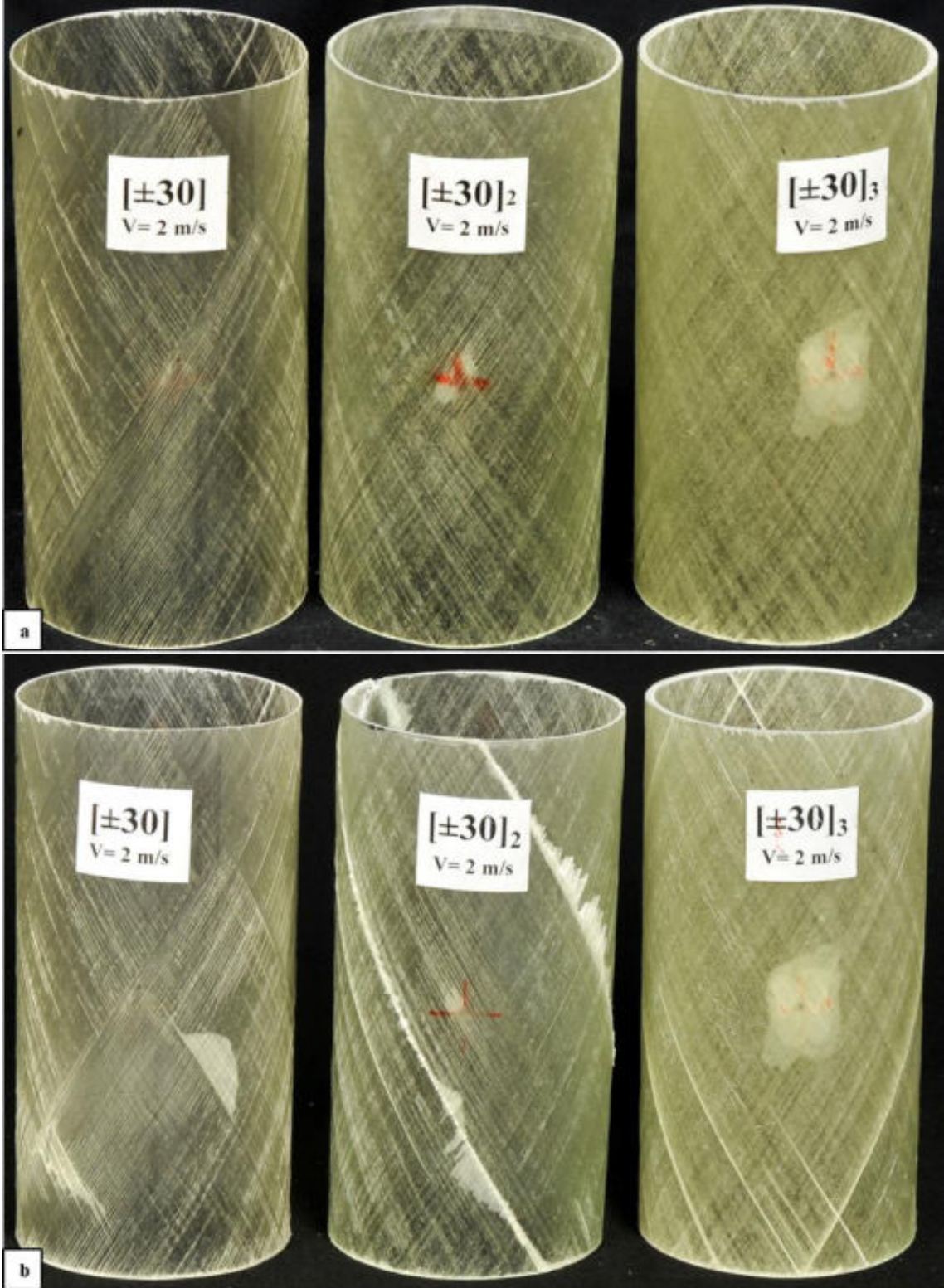
Şekil 4.62. 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Darbe hasarı almış numunelerin tabaka sayısının sarım açısının üzerinde etkisini gösteren CAI deneyi sonuçları Şekil 4.63, 4.65, 4.67, 4.69, 4.71’de kuvvet-deplasman grafiği olarak verilmiştir. Basma kuvveti altında numunelerin zamana bağlı deformasyon durumları ve taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Elde edilen deney sonuç verilerine göre darbeli numunelerde de tabaka sayısındaki artış maksimum kuvvet değerini arttırmaktadır. Yani tabaka sayısı arttıkça numunenin yük taşıma kapasitesi artmaktadır.

Şekil 4.63’te basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 30^\circ$ elyaf açısına sahip darbeli numuneler üzerinde ki etkisi görülmektedir. Bu numunelerin hiçbirinde darbe hasarı etkisi görülmemiştir. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı darbeli numunelerde sünek bir davranış oluşturmuş ve burkulma etkisi ile oluşan delaminasyon hasarı meydana getirmiştir. 4 ve 6 tabakalı darbeli numuneler daha rijit davranmış ve tabaka sayısındaki artışın eksenel kuvvete tepkisinde olumlu bir etken olduğu görülmüştür. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük değere, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almış $\pm 30^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 11.228 kN, 40.661 kN ve 57.738 kN ‘dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.64’te gösterilmiştir.



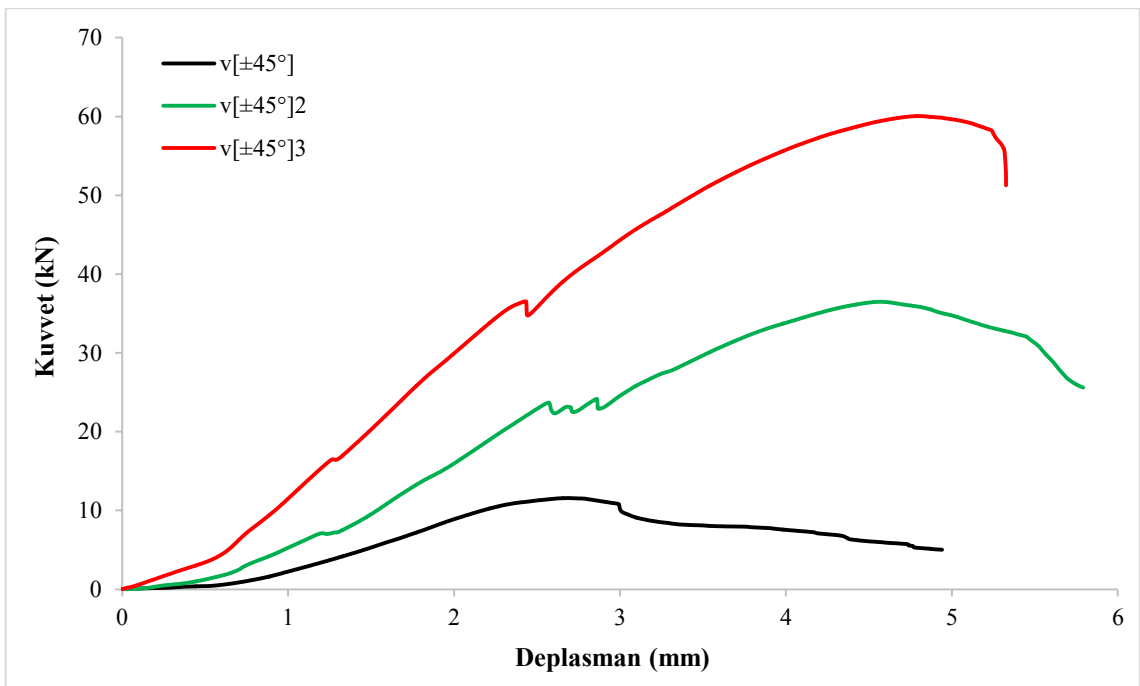
Şekil 4.63. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



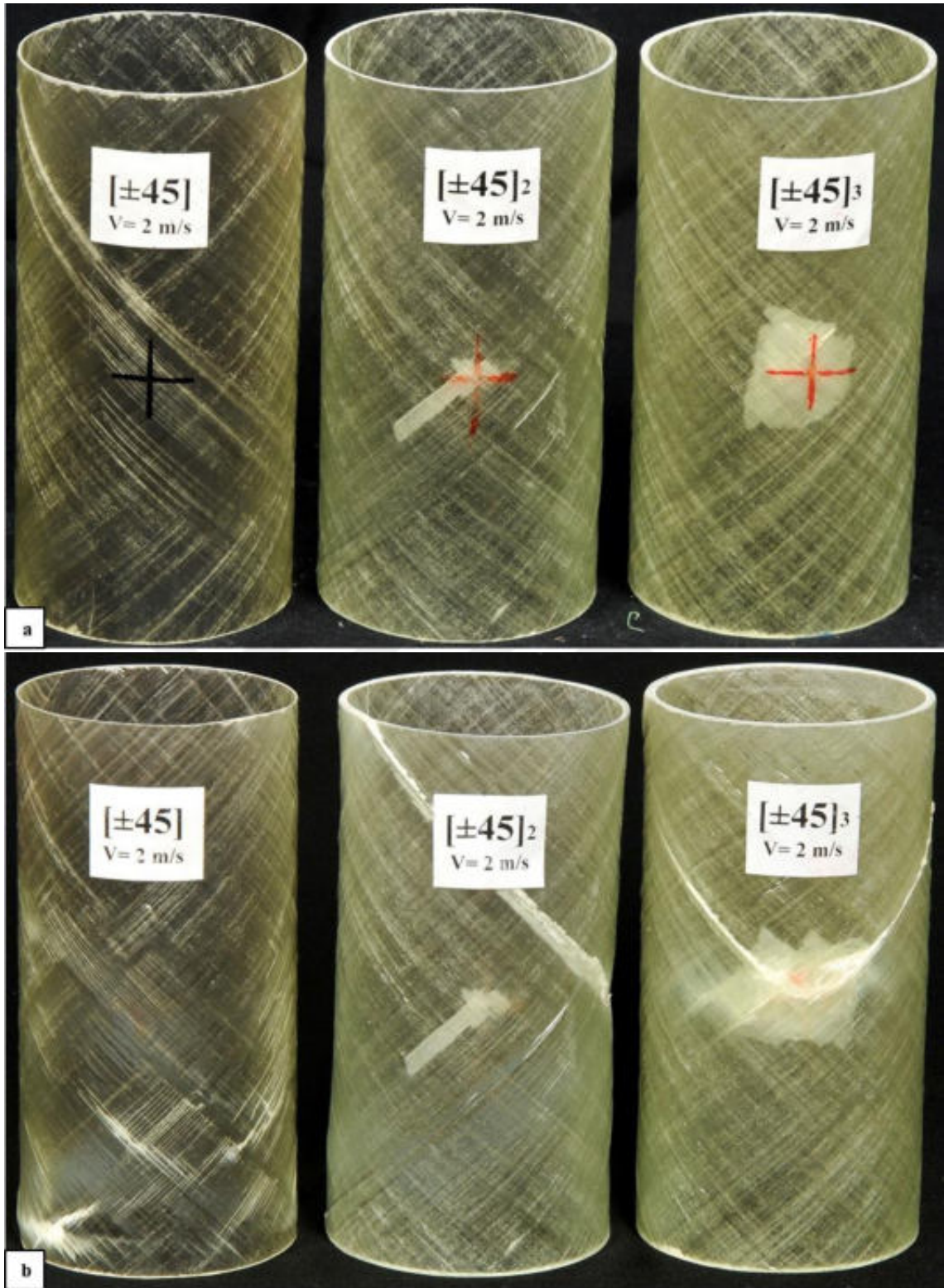
Şekil 4.64. 2, 4 ve 6 tabakalı (30°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.65'te basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 45^\circ$ elyaf açısına sahip darbeli numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. Darbenin etkisi sadece 6 tabakalı numunede görülmüştür. Eksenel basma kuvveti 2 tabakalı darbeli numunelerde

sünek bir davranış oluşturmuş ve burkulma etkisi ile oluşan matris çatlaması ve beyazlaşma meydana getirmiştir. 4 ve 6 tabakalı darbeli numuneler daha rijit davranmış ve tabaka sayısındaki artışın aksenal kuvvete tepkisinde olumlu bir etken olduğu görülmüştür. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük değere, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almış $\pm 45^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 11.577 kN, 36.485 kN ve 60.049 kN'dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.66'da gösterilmiştir.



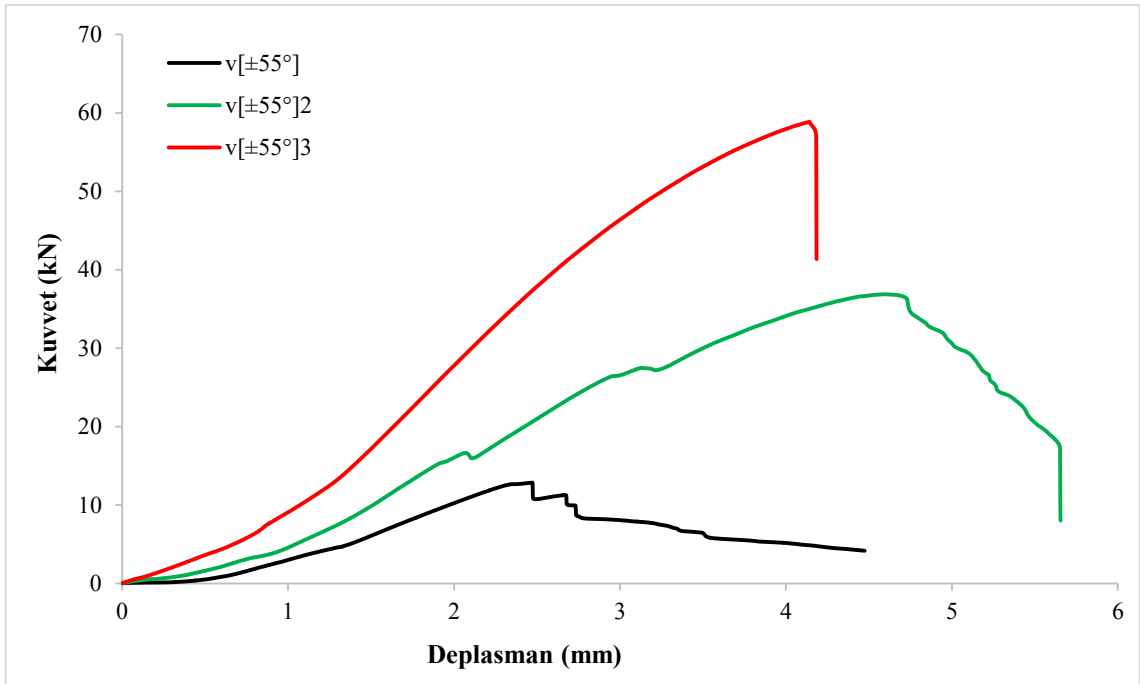
Şekil 4.65. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



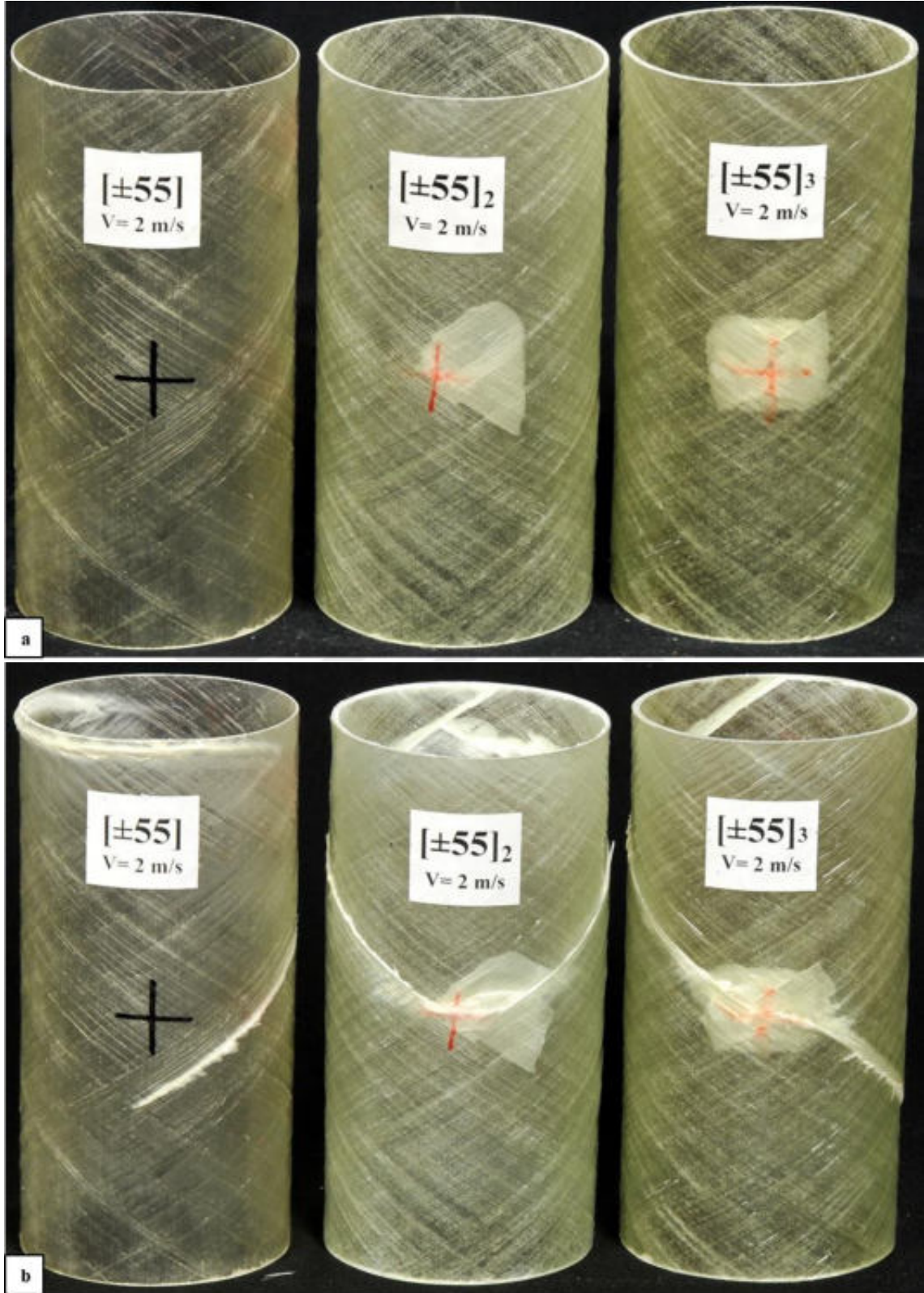
Şekil 4.66. 2, 4 ve 6 tabakalı (45°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.67’de basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 55^\circ$ elyaf açısına sahip darbeli numuneler üzerindeki etkisi görülmektedir. Darbe etkisi 4 ve 6 tabakalı numunelerde görülmüştür. Aksenal basma kuvveti 2 tabakalı darbeli numunelerde sünek

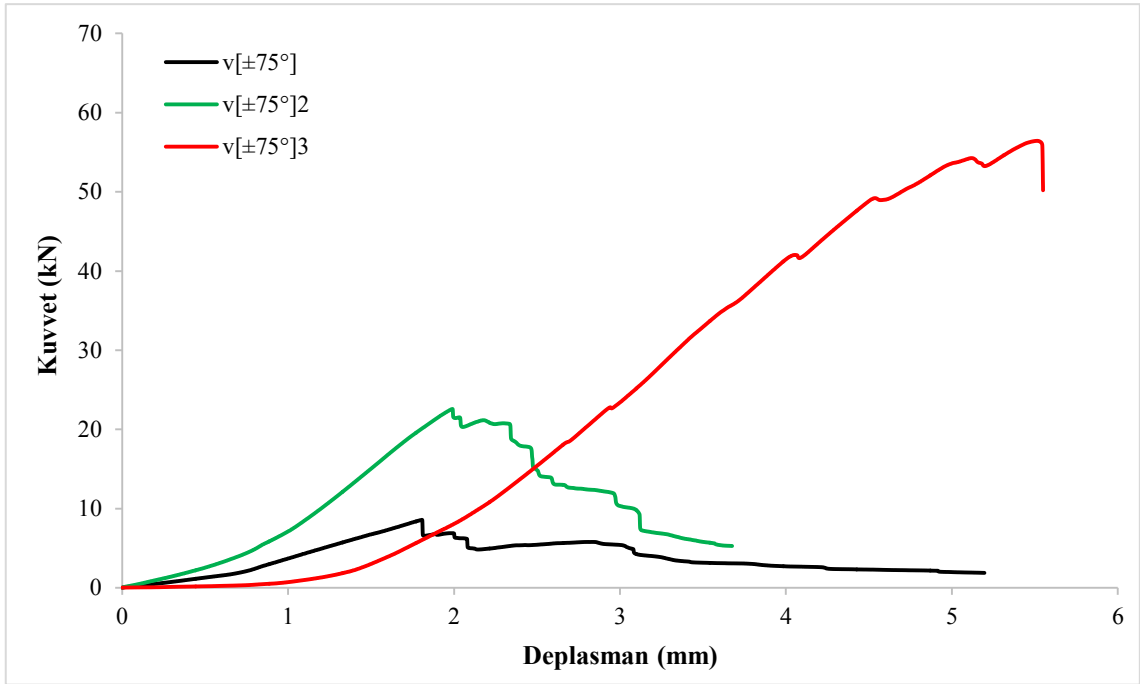
bir davranış oluşturmuş ve burkulma etkisi ile oluşan elyaf yarıлма hasarı meydana getirmiştir. 4-6 tabakalı darbeli numuneler daha rijit davranmış ve tabaka sayısındaki artışın aksenal kuvvete tepkisinde olumlu bir etken olduğu görülmüştür. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almış $\pm 55^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 12.848 kN, 36.870 kN ve 58.847 kN'dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.68'de gösterilmiştir.



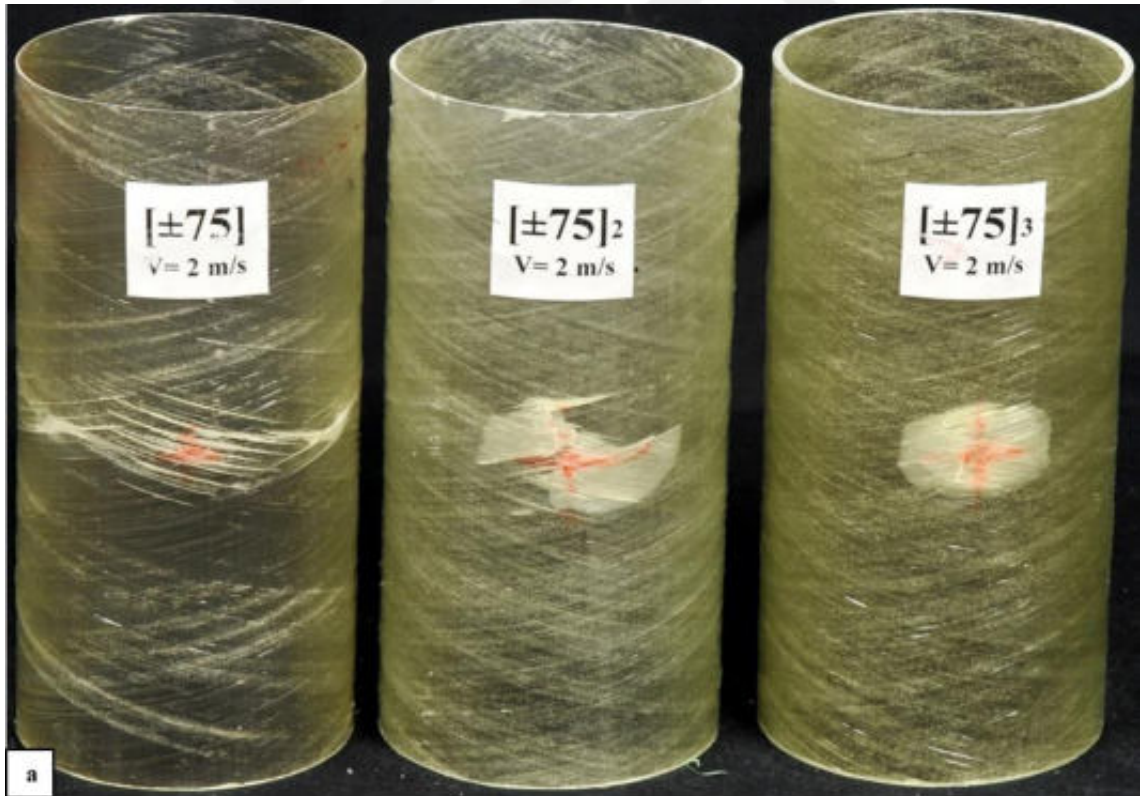
Şekil 4.67. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 4.68. 2, 4 ve 6 tabakalı (55°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası



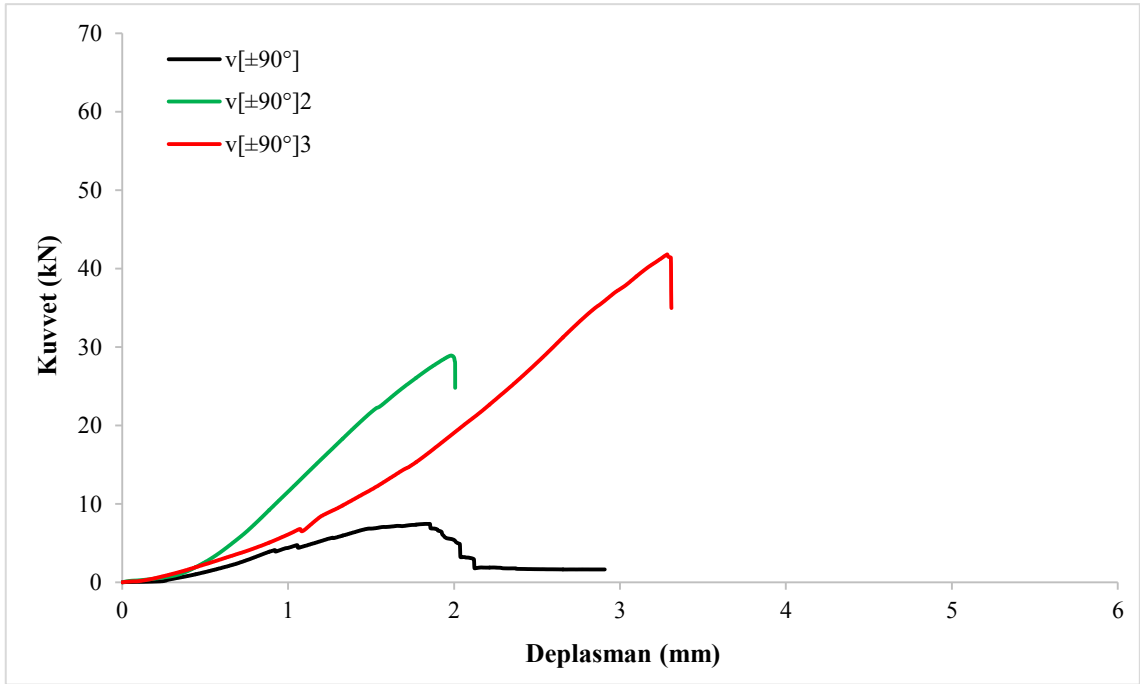
Şekil 4.69. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği



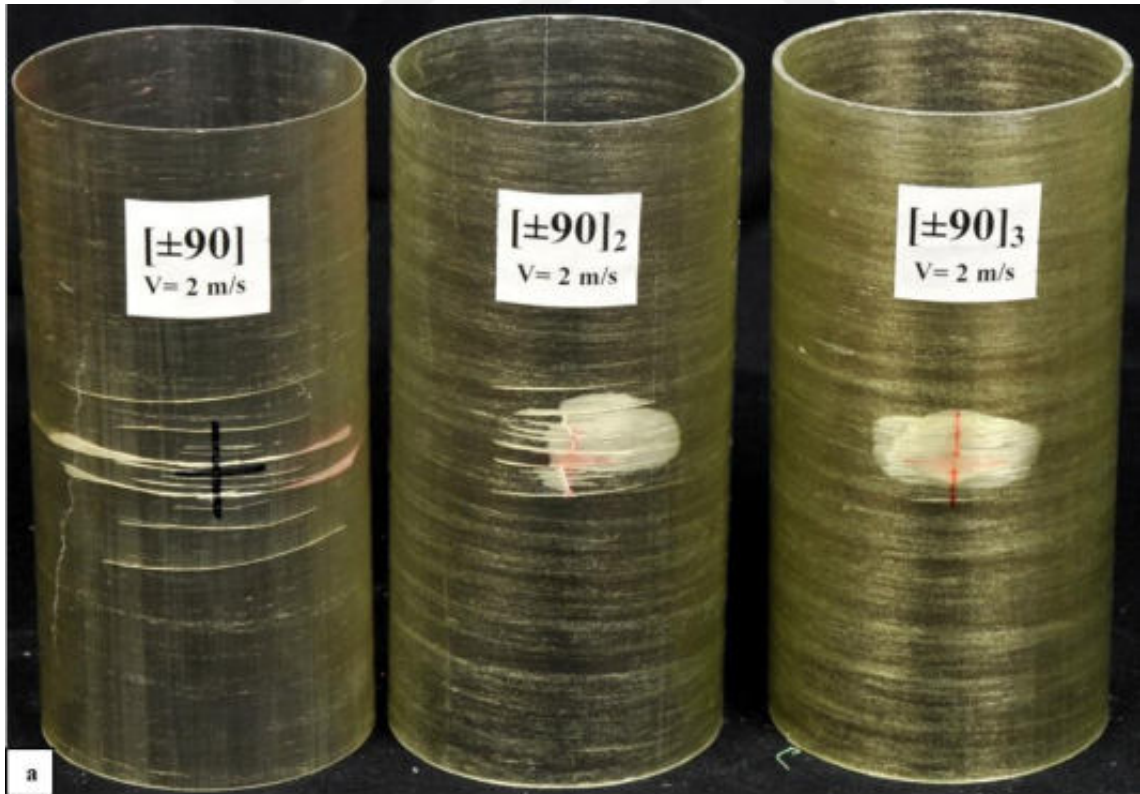


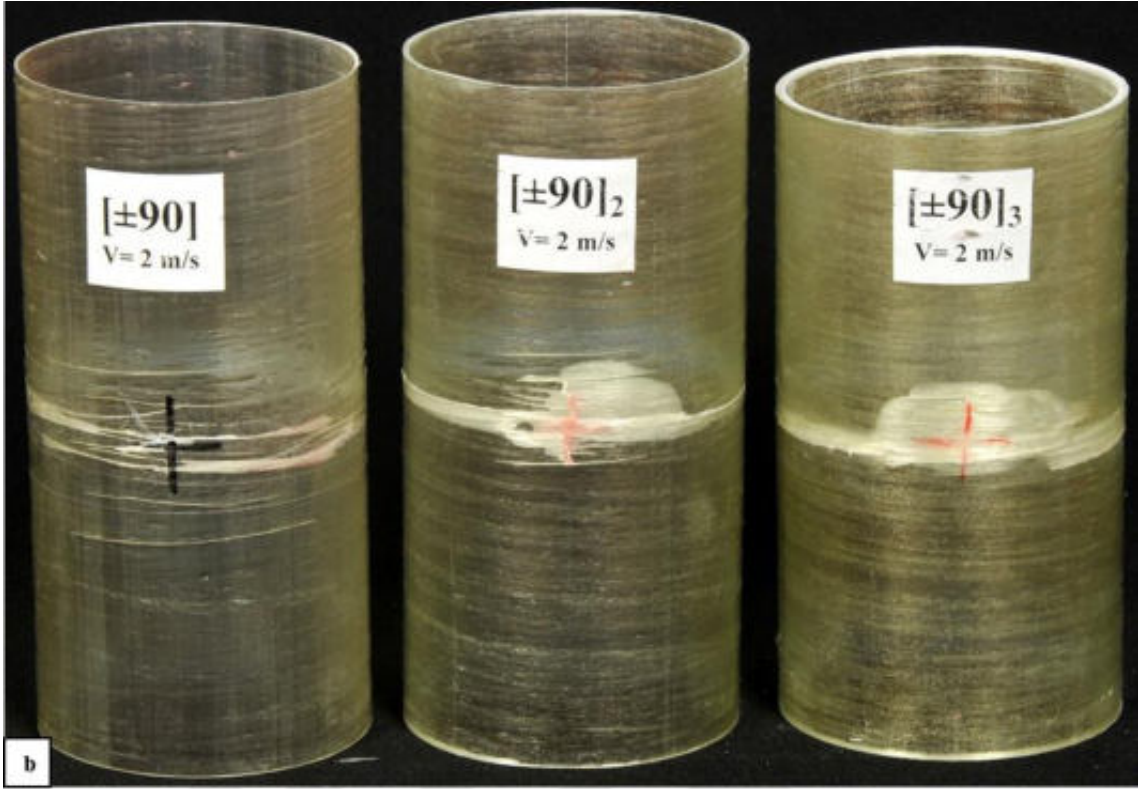
Şekil 4.70. 2, 4 ve 6 tabakalı (75°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

Şekil 4.71’de basma deneyi sonrası farklı tabaka sayılarının $\pm 90^\circ$ elyaf açısına sahip darbeli numuneler üzerinde ki etkisi görülmektedir. Darbenin etkisi 2, 4 ve 6 tabakalı numunelerin hepsinde görülmüştür. Eksenel basma kuvveti altında 2, 4 ve 6 tabakalı darbeli numuneler rijit davranmış ve tabaka sayısındaki artışın eksenel kuvvete tepkisinde olumlu bir etken olduğu görülmüştür. 2 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en küçük, 6 tabakalı numunenin maksimum kuvvet değerinin en büyük değere ulaştığı görülmektedir. 2, 4 ve 6 tabakalı darbe hasarı almış $\pm 90^\circ$ elyaf açısına sahip numunelerin basma deneyi sonucu ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri sırasıyla 7.469 kN, 28.934 kN ve 41.829 kN’ dur. Bu numunelerin basma deneyinden önceki ve sonraki fotoğrafları Şekil 4.72’de gösterilmiştir.



Şekil 4.71. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli numunelerin kuvvet-deplasman grafiği





Şekil 4.72. 2, 4 ve 6 tabakalı (90°) elyaf sarım açısına sahip darbeli basma deneyi numuneleri a) deney öncesi ve b) deney sonrası

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

- Bütün sarım açılarında kendi içinde kıyaslandığında 2,4 ve 6 tabakalı numunelerde tabaka artışının darbe cevabını önemli bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle 6 tabakalı numunelerde tabaka artışıyla beraber kompozit boruların yapısal mukavemetindeki artış darbe cevaplarında da artışın gerçekleşmesine sebep olmuştur.
- Düşük tabakalı borularda sabit tutulan temas hızında hemen hemen bütün CTP borularında burkulmanın etkisiyle tepki kuvvetlerinin düştüğü görülmüştür. Sarım açısına bakıldığında 2 tabakalı numunelerde sarım açısı arttıkça tepki kuvvetinde artış gözlemlendi fakat maksimum tepe kuvvetinin $[\pm 55^\circ]$ sarım açılı boruda olduğu, $[\pm 55^\circ]$ den sonra tepe kuvvetlerinde düşüşler gerçekleştiği görülmüştür. Sarım açısı bakımından değerlendirildiğinde; tabaka sayısı arttıkça tepki kuvvetlerinde farklı değişimler gözlemlenmiştir. Örneğin 6 tabakalı numunelerde maksimum temas kuvveti 2393.21 N, 4 tabakalı numunelerde bütün sarım açısına sahip CTP borularda temas kuvveti değerleri birbirine yakinken en yüksek temas kuvveti 1648,96 N elde edilmiştir. Tabaka artışıyla beraber özellikle 6 tabakalı numunelerde karşılaştırma yapıldığında maksimum tepe kuvvetin $[\pm 90^\circ]$ 'de olduğu görülmüştür. 4 tabakalı numuneler kendi içerisinde karşılaştırıldığında en yüksek temas kuvvetinin $[\pm 45^\circ]$ 'de olduğu gözlemlenmiştir.
- Darbe ile ilgili genel bir değerlendirme yapılacak olursa gerek sarım açısının etkisi gerek tabaka sayısının artışının etkisi CTP borularda düşük hızlı darbe cevabını değiştirmektedir. Bunun yanında bu değişimler hasar analizi açısından değerlendirildiğinde tabaka sayısının artışı düşük hızlı darbe hasarının belli bir noktaya yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Fakat oluşan hasarlar tabaka sayısı artsa dahi sarım açısının etkisine bağlı olarak gelişmiştir.
- Düşük hızlı darbe hasarında 2 tabakalı numunelerde darbe hızının yüksek olmasından dolayı burkulmanın etkisiyle darbe davranışı ve hasar gelişimi net olarak anlaşılmamıştır. Bu durumda sarım açısının etkisi daha belirgin olmuştur. Tabaka sayısı artışıyla gerek darbe davranışı gerekse hasar gelişimi anlamlı hale gelmiştir. Özellikle 6 tabakalı numunelerde darbe hızının etkisiyle delaminasyon, matris çatlağı, yarıma, lokal burkulma, bölgesel beyazlaşma, debonding hasarı gibi oluşan hasarlar

net olarak görülmüştür. Tabaka sayısı arttıkça darbe hasarının belirginleştiği tespit edilmiştir. Bu hasar belirginleşmesi, özellikle delaminasyon hasarlarının oluşması basma deneylerinde hasar gelişimi açısından etkisini bariz şekilde göstermiştir.

- Absorbe edilen enerji açısından karşılaştırıldığından 2 tabakalılarda en yüksek absorbe edilen enerji $[\pm 30^\circ]$ 'de 11.160 J, 4 tabakalılarda $[\pm 90^\circ]$ 'de 6.467 J, 6 tabakalılarda da $[\pm 75^\circ]$ 'de 8,011 J şeklinde gerçekleşmiştir. Buradan anlaşıldığı üzere tabaka sayısının artışıyla sarım sayılarının darbe cevabının değiştiği ve bunun üzerine absorbe edilen enerjilerinde değiştiği anlaşılmaktadır.
- Genel olarak düşük hızlı darbe grafikleri incelendiğinde tabaka sayısının artışıyla darbe grafiklerinde gerek kuvvet-zaman gerek kuvvet-deplasman ve gerek enerji-zaman grafiklerinde malzeme davranışının değişmesiyle istenmeyen davranışların azaldığı görülmüştür. Özellikle 2 tabakalı numunelerde burkulmanın etkisi kuvvet-deplasman grafiklerinde kapanmanın gerçekleşmesini engellemiştir. Konunun anlaşılması açısından grafikler doğal haliyle verilmiştir.
- Basma deneylerinde filaman sarım CTP boruların sarım açısı etkisini görmek için öncelikle hasarsız numunelerin aksel basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2 tabakalı numunelerde $[\pm 90^\circ]$ 'ye kadar olan numuneler yoğun burkulma hasarından dolayı 12-13 kN aralığında maksimum kuvvete ulaşırken $[\pm 90^\circ]$ sarım açılı numunede burkulma gerçekleşmemiş ve maksimum kuvvet değeri 17,54 kN seviyesine kadar çıkmıştır. Buradan da anlaşıldığı üzere sarım açısına bağlı olarak CTP boruların basma davranışının etkilendiği görülmüştür.
- Tabaka sayısının artışıyla beraber burkulmanın etkisinin azaldığı ve sarım açısının basma davranışında etkisinin belirginleştiği anlaşılmaktadır. 4 tabakalı numunelerde maksimum kuvvetler birbirine yakın olmakla birlikte en yüksek $[\pm 30^\circ]$ sarım açılı numunede gerçekleşmiştir. Fakat deplasman açısından değerlendirildiğinde $[\pm 30^\circ]$ sarım açılı numune en düşük deplasmana sahipken $[\pm 90^\circ]$ sarım açılı numunede en yüksek deplasman değeri elde edilmiştir. 6 tabakalı numunelerde bu durum değişmiş ve en yüksek basma kuvveti $[\pm 55^\circ]$ sarım açısına sahip numunede görülmüştür. Bunun ile beraber en yüksek deplasman $[\pm 45^\circ]$ sarım açılı numunede oluşmuştur.
- 2 tabakalı hasarsız numunelerin basma deneyleri hasar açısından değerlendirildiğinde $[\pm 30^\circ]$ ve $[\pm 45^\circ]$ sarım açılı numunelerde çoklu burkulmalar gerçekleşmiş, burkulma noktalarında delaminasyon ve yarıma hasarları oluşmuştur. $[\pm 55^\circ]$ ve $[\pm 75^\circ]$ sarım açılı numunelerde burkulma basma plakalarına yakın bölgede gerçekleşmiş ve

burkulmanın etkisiyle sarım açıları doğrultusunda yarıлма hasarı görülmüştür. $[\pm 90^\circ]$ sarım açılı numunede burkulma olmaksızın sarım açısı doğrultusunda ezilmeden kaynaklı olarak yarıлма hasarı olduğu görülmüştür.

- Tabaka sayısındaki artışla beraber 4 tabakalı hasarsız numunelerde basma deneyi sonrası hasar davranışlarının $[\pm 90^\circ]_2$ numunesi hariç diğerlerinde değiştiği görülmüştür. Sarım açısı basma eksenine daha paralel olan $[\pm 30^\circ]_2$ numunesinde elyaf doğrultusunda yarıлма hasarları oluşurken $[\pm 45^\circ]_2$ ve $[\pm 55^\circ]_2$ sarım açısına sahip numunelerde basma plaklarına yakın bölgelerde lokal burkulmalarının (elephant foot) etkili olduğu görülmüştür. Farklı olarak $[\pm 75^\circ]_2$ ve $[\pm 90^\circ]_2$ numunelerinde sarım açısının etkisinden dolayı elyaf doğrultularında yarıлма hasarlarının oluşmasıyla sonuç hasarları gerçekleşmiştir.
- Basma deneyi yapılan 6 tabakalı hasarsız numunelerde de 4 tabakalı hasarsız numunelere benzer bir hasar davranışı gerçekleşirken tabaka sayısının artışıyla hasar mekanizmalarında bazı değişiklikler görülmüştür. Özellikle $[\pm 45^\circ]_3$ sarım açısına sahip numunede lokal burulma hasarı daha belirginleşirken $[55^\circ]_3$ sarım açılı numunede lokal burulma hasarı ile beraber boruyu çevreleyen sarım açısı doğrultusunda yarıлма hasarı ve borunun yüzeyinin genelinde elyaf doğrultularında beyazlaşma hasarlarının oluştuğu görülmüştür. $[\pm 75^\circ]_3$ ve $[\pm 90^\circ]_3$ numunelerinde hasarlar basma plağına yakın bölgelerde ezilme hasarı şeklinde gerçekleşmiştir.
- 2 tabakalı darbe ön hasarı bulunan boruların basma deneyinde $[\pm 30^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$ ve $[\pm 55^\circ]$ sarım açılı numunelerde burkulmadan dolayı darbenin etkisi çok görülmediği için hasarsız numuneler gibi davranış sergilemişlerdir. Darbe etkisiyle oluşan elyaf doğrultusundaki matris çatlaklarından dolayı maksimum basma kuvvetlerinde kısmi düşüşler görülmüştür. Fakat $[\pm 75^\circ]$ ve $[\pm 90^\circ]$ numunelerinde oluşan darbe hasarlarının etkisiyle basma deneylerinde kalan mukavemet değerlerinde ciddi bir düşüş olduğu görülmüştür. Bütün numunelerde oluşan hasarları elyaf sarım açılarının yönlendirdiği anlaşılmıştır.
- 4 tabakalı darbe ön hasarlı numunelerde sarım açısının artışıyla beraber darbe hasarının etkisinin de belirginleştiği söylenmişti. Bu durum basma hasarlarına da direkt yansıdığı söylenebilir. $[\pm 30^\circ]_2$ ve $[\pm 45^\circ]_2$ sarım açılı numuneler her ne kadar darbeden etkilense de oluşan basma hasarları darbe bölgesinin dışında gerçekleşmiştir. Bu numunelerin yük taşıma kapasitelerinde belli bir miktar düşüşlerin olduğu görülmüştür. Bununla beraber $[\pm 55^\circ]_2$, $[\pm 75^\circ]_2$ ve $[\pm 90^\circ]_2$ sarım açılı numunelerinin

basma deneylerinde darbe ön hasarlarının, Özellikle delaminasyon hasarlarının daha etkili olduğu ve basma esnasında boruda oluşan hasarı yönlendirdiği görülmüştür. Bu numunelerde basma hasarı darbe hasar bölgesinde başlamış, sarım açıları doğrultularında genişleyerek ilerlemiştir. Özellikle $[\pm 75^\circ]_2$ ve $[\pm 90^\circ]_2$ numunelerinde kalan mukavemetleri önemli ölçüde düşmüştür.

- 6 tabakalı ön hasarlı numunelerde $[\pm 30^\circ]_3$ sarım açılı CTP borunun basma deneyinde geniş bir darbe ön hasarı olmasına rağmen basma hasarı elyaf sarım açıları doğrultusunda yarıлма hasarı şeklinde gerçekleşmiştir ve darbe ön hasarıyla oluşan delaminasyon bölgesinin basma hasarını etkilemediği görülmüştür. Bunun aksine 6 tabakalı diğer bütün numunelerde darbe ön hasarının basma hasarını yönlendirdiği görülmüştür. Sarım açısı dikkate alındığında sarım açısını artışıyla beraber darbenin etkisiyle CTP borularının kalan mukavemetlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Özellikle $[\pm 90^\circ]_3$ sarım açılı numunede darbe ön hasarı bölgelerinde başlayan basma hasarı CTP borunun kalan mukavemetinde yaklaşık %50'lik bir düşüşe sebep olmuştur. $[\pm 90^\circ]_3$ numunesi hariç 6 tabakalı diğer numunelerde maksimum kuvvet değerleri birbirlerine yakın oluşmakla beraber sarım açısının etkisinden dolayı deplasman değerlerinde değişimlerin belirginleştiği görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Bu çalışmada yapılan deneyler aynı boruda, farklı sarım açılarındaki istifleme sıraları dikkate alınarak yapılabilir. Bu çalışmadaki tabaka ve sarım açısı etkisi dikkate alarak böyle bir çalışmanın yapılması kompozit boruların gerek darbe gerek darbe sonrası basma dayanımlarını iyileştirmede kullanılabilir.
- Farklı bir çalışma olarak 6 veya daha üstü tabakalı kompozit borularda darbe davranışı vurucu impaktörün (vurucu tertibatı) şekli değiştirilerek impaktör etkisi incelenebilir.
- Bu çalışmadaki veriler dikkate alındığında 90° 'lik sarım açısına sahip tabakanın CTP borunun orta kısmında istiflenmesiyle iç ve dış kısmında farklı konfigürasyonlarla desteklenerek düşük hızlı darbeye oluşan yarıлма hasarının minimize edilebileceğine CTP borunun darbe sonrası kalan mukavemet değerinin arttırılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1998, Impact on composite structures, *Cambridge University Press*, 140-144.
- Akdemir, A., 1992, Yüzey çatlaklı cam takviyeli plastiklerde gerilmeli korozyon, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Akın, Y., 2018, Cam elyaf takviyeli kompozit boruların mekanik özelliklerine hidrotermal yaşlandırmanın etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 77.
- Arat, M., 2017, Kriyojenik ortam şartlarında filaman sarım CTP boruların düşük hızlı darbe sonrası hasar davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 107.
- Arıcasoy, O., 2006, Kompozit Sektör Raporu, *İstanbul Ticaret Odası*, 4-22.
- Bai, J., Seeleuthner, P. ve Bompard, P., 1997, Mechanical behaviour of $\pm 55^\circ$ filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: I. Microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanisms of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading, *Composites Science and Technology*, 57 (2), 141-153.
- Betts, D., Sadeghian, P. ve Fam, A., 2019, Investigation of the stress-strain constitutive behavior of $\pm 55^\circ$ filament wound GFRP pipes in compression and tension, *Composites Part B: Engineering*, 172, 243-252.
- Betts, D., Sadeghian, P. ve Fam, A., 2021, Experimental and analytical investigations of the flexural behavior of hollow $\pm 55^\circ$ filament wound GFRP tubes, *Thin-Walled Structures*, 159, 107246.
- Ceyhun, V. ve Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, *Mühendis ve Makina*, 44 (516), 35-41.
- Davim, J. P., Reis, P. ve Antonio, C. C., 2004, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Composites Science and Technology*, 64 (2), 289-297.

- Deniz, M. E. ve Karakuzu, R., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes, *Composites Part B: Engineering*, 43 (3), 1130-1138.
- Deniz, M. E., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R. ve Icten, B. M., 2013, Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading, *Composites Part B: Engineering*, 44 (1), 304-312.
- Dil, T., 2016, Polimer matrisli kompozitlerde sarım açısının mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 55.
- Farhood, N. H., Karuppanan, S., Ya, H. H. ve Ovinis, M., 2018, Experimental study of low velocity impact response of carbon/basalt hybrid filament wound composite pipes, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18 (07), 1850089.
- Gemi, D. S., 2019, Filaman sarım CTP borularda darbe sonrası basma (CAI) davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 82.
- Gemi, D. S., Şahin, Ö. S. ve Gemi, L., 2021, Experimental Investigation of the Effect of Diameter upon Low Velocity Impact Response of Glass Fiber Reinforced Composite Pipes, *Composite Structures*, 114428.
- Gemi, L., 2004, Filaman sarım boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 82.
- Gemi, L., 2014, Düşük hızlı darbe hasarlı filaman sarım hibrid boruların iç basınç altında yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 164.
- Gemi, L., Kara, M. ve Avcı, A., 2016, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, *Composites Part B: Engineering*, 106, 154-163.
- Gemi, L., Şahin, Ö. S. ve Akdemir, A., 2017, Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress, *Composites Part B: Engineering*, 119, 196-205.

- Gemi, L., 2018, Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study, *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232.
- Gemi, L., Kayrııcı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S. ve Şahin, Ö. S., 2018, Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes, *Composites Part B: Engineering*, 149, 38-48.
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U. ve Yazman, Ş., 2020, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*, 235, 111737.
- Harris, W., Soutis, C., Gresil, M. ve Atkin, C., 2020, Pressure response and life assessment of filament-wound composite pipes after impact, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3 (4), 365-375.
- Hawa, A., Majid, M. A., Afendi, M., Marzuki, H., Amin, N., Mat, F. ve Gibson, A., 2016, Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes, *Materials & Design*, 89, 455-464.
- Hollaway, L., 2010, A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, *Construction and building materials*, 24 (12), 2419-2445.
- Jefferson Andrew, J., Arumugam, V., Saravanakumar, K., Dhakal, H. N. ve Santulli, C., 2015, Compression after impact strength of repaired GFRP composite laminates under repeated impact loading, *Composite Structures*, 133, 911-920.
- Jones, R. M., 1998, *Mechanics of composite materials*, CRC press, p.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kara, M., 2012a, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP borularının iç basınç altındaki hasar davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 141.

- Kara, M., 2012b, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 141.
- Kara, M., Uyaner, M., Avcı, A. ve Akdemir, A., 2014, Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength, *Composites Part B: Engineering*, 60, 507-514.
- Kara, M. ve Kırıcı, M., 2017, Effects of the number of fatigue cycles on the impact behavior of glass fiber/epoxy composite tubes, *Composites Part B: Engineering*, 123, 55-63.
- Kaw, A. K., 2005, Mechanics of composite materials, CRC press, p.
- Kayalı, E. S., 1996, Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, İTÜ, p.
- Krishnan, P., Majid, M. A., Afendi, M., Gibson, A. ve Marzuki, H. A., 2015, Effects of winding angle on the behaviour of glass/epoxy pipes under multiaxial cyclic loading, *Materials & Design*, 88, 196-206.
- Lau, S. T., Said, M. a. ve Yaakob, M. Y., 2012, On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing: A literature review, *Composite Structures*, 94 (3), 803-812.
- Liu, D., Raju, B. B. ve Dang, X., 1998, SIZE EFFECTS ON IMPACT RESPONSE OF COMPOSITE LAMINATES, *International Journal of Impact Engineering*, 21 (10), 837-854.
- Madenci, E., 2011, Kompozit kirişlerin karışık sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve dinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 67.
- Madenci, E., 2016, Yüksek mertebe kayma deformasyon teorisine dayalı çapraz tabakalı kompozit plakların karışık sonlu eleman yöntemi ile analizi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 130.
- Mallick, P. K., 2007, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, CRC press, p.

- Maziz, A., Tarfaoui, M., Gemi, L., Rechak, S. ve Nachtane, M., 2021, A progressive damage model for pressurized filament-wound hybrid composite pipe under low-velocity impact, *Composite Structures*, 114520.
- Mertiny, P., Ellyin, F. ve Hothan, A., 2004, Stacking Sequence Effect of Multi-angle Filament Wound Tubular Composite Structures, *Journal of Composite Materials*, 38 (13), 1095-1113.
- Metin, M., 2008, E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe hasarının burkulma özelliklerine etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Nunes, F., Correia, J. R. ve Silvestre, N., 2016, Structural behavior of hybrid FRP pultruded beams: Experimental, numerical and analytical studies, *Thin-Walled Structures*, 106, 201-217.
- Ortenzi, A., Carvalho, J. ve Corvi, A., 2017, Comparison between elastic properties of theoretical, computational method and experimental results for filament wound composite pipes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (4), 1375-1390.
- Özütok, A. ve Madenci, E., 2013, Free vibration analysis of cross-ply laminated composite beams by mixed finite element formulation, *International journal of structural stability and dynamics*, 13 (02), 1250056.
- Özütok, A. ve Madenci, E., 2017, Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences*, 130, 234-243.
- Pehlivan, A., 2017, Elyaf sarma ile üretilen kompozit yapıdaki basınçlı kapların değişik yüklemelerde modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, İstanbul, 60.
- Rafiee, R. ve Amini, A., 2015, Modeling and experimental evaluation of functional failure pressures in glass fiber reinforced polyester pipes, *Computational Materials Science*, 96, 579-588.

- Rafiee, R. ve Habibagahi, M. R., 2018, Evaluating mechanical performance of GFRP pipes subjected to transverse loading, *Thin-Walled Structures*, 131, 347-359.
- Reddy, J. N., 2004, Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis, CRC press, p.
- Rosato, D. V. ve Rosato, D. V., 2004, Reinforced plastics handbook, Elsevier, p.
- Saçak, M., 2002, İletken polimerler, *Polimer Kimyası, Ankara Üniversitesi, Gazi Kitabevi, Ankara*.
- Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli*, 118.
- Sebaey, T. ve Mahdi, E., 2016, Crashworthiness of pre-impacted glass/epoxy composite tubes, *International Journal of Impact Engineering*, 92, 18-25.
- Sinha, P., 2006, Composite materials and structures, *Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur*.
- Soykok, I. F., Ozcan, A. R. ve Tas, H., 2019, Evaluation of the failure responses of filament wound and pre-preg wrapped glass fiber/epoxy composite tubes under quasi-static torsional loading, *Materials Research Express*, 6 (5), 055307.
- Sönmez, M., 2009, Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye'den dört örnek firma üzerine bir inceleme, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Supian, A., Sapuan, S., Zuhri, M., Zainudin, E. ve Ya, H., 2020, Crashworthiness performance of hybrid kenaf/glass fiber reinforced epoxy tube on winding orientation effect under quasi-static compression load, *Defence Technology*, 16 (5), 1051-1061.
- Şahin, Y., 2000, Kompozit malzemelere giriş, Gazi kitabevi, p.
- Uddin, M. S., Morozov, E. V. ve Shankar, K., 2014, The effect of filament winding mosaic pattern on the stress state of filament wound composite flywheel disk, *Composite Structures*, 107, 260-275.

- Uyaner, M., Kara, M. ve Şahin, A., 2014, Fatigue behavior of filament wound E-glass/epoxy composite tubes damaged by low velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 61, 358-364.
- Vickers, N. J., 2017, Animal communication: when i'm calling you, will you answer too?, *Current biology*, 27 (14), R713-R715.
- Wang, H. ve Vu-Khanh, T., 1994, Damage extension in carbon fiber/PEEK crossply laminates under low velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 28 (8), 684-707.
- Xia, M., Takayanagi, H. ve Kemmochi, K., 2001, Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure, *Composite Structures*, 53 (4), 483-491.
- Xiao, J., Shi, H., Tao, L., Qi, L., Min, W., Zhang, H., Yu, M. ve Sun, Z., 2020, Effect of Fibres on the Failure Mechanism of Composite Tubes under Low-Velocity Impact, *Materials*, 13 (18), 4143.
- Xing, J., Geng, P. ve Yang, T., 2015, Stress and deformation of multiple winding angle hybrid filament-wound thick cylinder under axial loading and internal and external pressure, *Composite Structures*, 131, 868-877.
- Yozgat, U., 2019, Bazalt elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların düşük hızlı darbe davranışlarının düşük iç basınç altında incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 73.