

**Metalik Tüp Kesitli Yüksek Mukavemetli
Hafif Kompozit Kiriş Tasarımı, Analizi ve Üretimi**

Proje No: 110M054

Prof.Dr. Kenan GENEL
Yrd.Doç.Dr. Akın Oğuz KAPTI
Yrd.Doç.Dr. İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN

EKİM 2012
SAKARYA

ÖNSÖZ

Bu proje, çelikten üretilmiş taşıyıcı kirişlere alternatif olarak kullanılacak, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti iyileştirilmiş yeni taşıyıcı kompozit kiriş tasarımları geliştirilmeye yöneliktir. Proje çerçevesinde, tasarım, modelleme, analiz, üretim ve test çalışmaları yürütülmüştür. Mümkün olduğunca yurt içinden temin edilebilen malzemeler kullanılarak, ülkemizin kendi öz kaynaklarıyla üretilen ve ilgili tüm sektörler tarafından rahatlıkla kullanılabilen, yüksek dayanıma sahip, hafif, ucuz kompozit kirişler geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, takviyesiz duruma göre yük taşıma kabiliyetinde 16,5 kat ve enerji absorbe etme kabiliyetinde 11 kata varan artışlar sağlayan kompozit kirişler elde edilmiştir.

Proje çalışmaları **TÜBİTAK-Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu**'nun desteğiyle gerçekleşmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR LİSTESİ

ŞEKİLLER LİSTESİ

TABLolar LİSTESİ

ÖZET

ABSTRACT

PROJE ANA METNİ

1. GİRİŞ	22
1.1. Projenin amacı ve kapsamı	24
1.2. Kiriş yapılarında yük taşıma kabiliyeti-hafiflik ilişkisi	25
1.3. Doğal frekans değerleri	33
1.4. Kompozit yapılar için hasar kriterleri	34
2. ANALİZ ÇALIŞMALARINA GİRİŞ	36
2.1. Üç nokta eğme simülasyonu ve modelin pilot deneyle doğrulanması	36
2.2. Üç nokta eğme ve darbe deneyleri için sonlu eleman modelleri	46
2.3. Hasar kriteri analizleri	47
3. DENEYSEL ÇALIŞMALARINA GİRİŞ	49
3.1. Deney düzeneklerinin tasarım ve imalat çalışmaları	49
3.1.1. Ön gerilme aparatı	49
3.1.2. Darbe deney düzeneği	51
3.1.3. Burkulma deney düzeneği	53
3.1.4. Üç nokta eğme deney düzeneği	54
3.2. Kullanılan deney malzemeleri	55
3.2.1. Cam elyaf dokuma ve kimyasallar	55
3.2.2. Alüminyum borular	55
3.2.3. Polimerik malzemeler	56
3.3. Deney numunelerinin hazırlanması	56
3.3.1. Çekme deneyi numuneleri	56
3.3.2. Farklı elyaf yönlenmesine sahip numuneler	59
3.3.3. Yüzey pürüzlülüğü etkisinin incelenmesinde kullanılan numuneler	61
3.3.4. Polimerik malzemelerle ve PVC köpükle takviye edilen numuneler	61

3.3.5.İçten takviye edilen numuneler	62
3.3.6.İçten ve dıştan takviye edilen kompozit numuneler	64
3.3.7.İçten ve dıştan takviye edilen kare kesitli numuneler	66
4. ANALİZ BULGULARI ve TARTIŞMA	67
4.1. Üç nokta eğme deneyi simülasyonları	67
4.1.1.Dairesel kesitli tüp giriş	67
4.1.2.Ön gerilmeli tüp giriş	69
4.1.3.Kompozit numuneler	72
4.1.3.1. Tüp+Kestamit	72
4.1.3.2. Tüp+Kestamit+Polipropilen(3,5)	73
4.1.3.3. Tüp+Kestamit+Polipropilen(6,5)	74
4.1.3.4. Tüp+Kestamit+Polipropilen(dolu)	75
4.1.3.5. Dıştan cam elyaf takviyeli kompozit numuneler	76
4.1.4.Kare kesitli tüp girişin üç nokta eğme deneyi simülasyonu	80
4.2. Darbe deneyi simülasyonları	82
4.2.1.Dairesel kesitli tüp giriş	82
4.2.2.Tüp+Kestamit	84
4.2.3.Tüp+Kestamit+Polipropilen(3,5)	86
4.2.4.Tüp+Kestamit+Polipropilen(6,5)	87
4.2.5.Tüp+Kestamit+Polipropilen(dolu)	89
4.2.6.Cam elyaf+Tüp	91
4.2.7.Cam elyaf+Tüp+Kestamit	94
4.2.8.Cam elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen(3,5)	95
4.2.9.Cam elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen(6,5)	97
4.2.10. Cam elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen(dolu)	98
4.2.11. Kare kesitli tüp girişin darbe deneyi simülasyonu	100
4.3. Kompozit girişlerin doğal frekans değerleri	101
5. DENEYSELBULGULAR ve TARTIŞMA	104
5.1. Çekme deneyleri	104
5.1.1.Alüminyum tüp	104
5.1.2.Farklı elyaf yönlenmesine sahip numuneler	107
5.1.3.Polimerik malzemeler	112
5.2. Üç nokta eğme deneyleri	114
5.2.1.Farklı mandrel çaplarıyla yapılan deneyler	114
5.2.2.Farklı çap ve cidar kalınlıklarındaki tüp girişler	114
5.2.3.Takviyesiz tüp	115
5.2.4.Profil takviyeli numuneler	117
5.2.5.İçten takviye edilen kompozit numuneler	118
5.2.5.1. Ø 30 numuneler	118
5.2.5.2. Ø 31 numuneler	123

5.2.6. Dıştan takviye edilen kompozit numuneler	133
5.2.7. İçten ve dıştan takviye edilen kompozit numuneler	136
5.2.7.1. Ø 19 numunelerle yapılan deneyler	136
5.2.7.2. Ø 24 numunelerle yapılan deneyler	138
5.2.7.3. Ø 30 numunelerle yapılan deneyler	139
5.2.7.4. Ø 31 numunelerle yapılan deneyler	145
5.2.7.5. Ø 40 numunelerle yapılan deneyler	148
5.2.8. Enerji absorbe etme davranışı iyileştirilmiş numuneler	149
5.2.9. Ön gerilmeli kompozit kiriş	153
5.2.10. Kare kesitli kompozit kiriş	156
5.2.10.1 İçten Takviyeli Numuneler	156
5.2.10.2 Dıştan Takviyeli Numuneler	158
5.2.10.3 İçten ve Dıştan Takviyeli Numuneler	159
5.3. Darbe deneyleri	163
5.3.1. İçten ve dıştan takviye edilen kompozit numuneler	163
5.3.1.1. Ø 19 numunelerle yapılan deneyler	163
5.3.1.2. Ø 24 numunelerle yapılan deneyler	164
5.3.1.3. Ø 30 numunelerle yapılan deneyler	164
5.3.1.4. Ø 31 numunelerle yapılan deneyler	167
5.3.1.5. Ø 40 numunelerle yapılan deneyler	168
5.3.1.6. PVC köpüklü numunelerle yapılan deneyler	169
5.3.2. Kare kesitli kompozit numuneler	170
5.4. Burkulma deneyleri	171
5.5. Kompozit kirişlerin üç nokta eğme şartları için doğal frekans değerleri	173
6. GENEL SONUÇLAR	177
REFERANSLAR	181
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	184

KISALTMALAR LİSTESİ

T	Tüp giriş
PB	Pultruzyon ürünü boru
K	Kestamid
P	Polyamid
PP	Polipropilen
CE	Cam elyaf
KE	Karbon elyaf
PVC	Polyvinil klörür köpük
YTK	Yük taşıma kabiliyeti.
EAK	Enerji absorbe etme kabiliyeti.
ÖYTK	Özgül yük taşıma kabiliyeti.
ÖEAK	Özgül enerji absorbe etme kabiliyeti.
(rakam)	K, P ve PP için mm cinsinden katman kalınlığı; CE ve KE için katman adedi.

ŞEKİLLER LİSTESİ

- Şekil 1. Geliştirilen kompozit kirişin uygulama alanlarına örnekler: (a) Otomobil şasesi, (b) Kapı içi yan koruyucu çubuklar, (c) Traktör koruma çemberi. 25
- Şekil 2. Atalet momenti değerinin D/t oranı ile değişimi. 25
- Şekil 3. Çelik ve alüminyum malzemede $D=30$ mm için $I/m-D/t$ değişim grafiği 26
- Şekil 4. Alüminyum malzemede farklı çaplar için $I/m-D/t$ değişim grafiği. 26
- Şekil 5. İç içe geçmiş üç farklı silindirik malzemedен oluşmuş delikli kompozit çubuk. 27
- Şekil 6. Dış çapı 31 mm olan farklı cidar kalınlıklarına sahip alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin ve rijitliğin I/m oranına göre değişimi. 28
- Şekil 7. Çeşitli polimerik malzemelerle (K, PP) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m oranıyla değişimi. 29
- Şekil 8. Çeşitli polimerik malzemelerle (P, PP) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m oranıyla değişimi. 29
- Şekil 9. Çeşitli polimerik malzemeler (K, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m oranıyla değişimi. 30
- Şekil 10. Çeşitli polimerik malzemeler (P, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m oranıyla değişimi. 30
- Şekil 11. Çeşitli polimerik malzemelerle (K, PP) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi. 31
- Şekil 12. Çeşitli polimerik malzemelerle (P, PP) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi. 31
- Şekil 13. Çeşitli polimerik malzemeler (K, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi. 32
- Şekil 14. Çeşitli polimerik malzemeler (P, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi. 32
- Şekil 15. Uzunluğu 500 mm ve cidar kalınlığı 0,75 mm olan iki ucundan sabitlenmiş tüpün Mod I için deplasman davranışı ($f=730,18$ Hz). 34
- Şekil 16. Ortotropik tabakada gerilme durumu. 35
- Şekil 17. Alüminyum tüp kirişe (6063-T6, $D/t=48/1$ mm) ait mühendislik ve gerçek çekme eğrileri. 36
- Şekil 18. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çeyrek-simetrik model, (a) Sınır şartları gösterilmiş model, (b) Elemanlara bölünmüş model. 37
- Şekil 19. ($D/t=48/1$ mm) tüp kirişin kuvvet-deplasman grafiği. 37
- Şekil 20. ($D/t=48/1$ mm) tüp ile yapılmış üç nokta eğme deneyinden sonraki numune görünüşleri: a) 0 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, d) 15 mm, e) 21 mm, f) 25 mm, g) 31 mm, h) 35 mm. 37

Şekil 21.	(D/t=48/1 mm) tüpün kuvvet-deplasman grafiği ve beş farklı deplasman için (5, 15, 21, 25 ve 35 mm) tüpün orta kısmının kesit görünümü.	38
Şekil 22.	Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kuvvet-deplasman grafiği.	38
Şekil 23.	Sonlu elemanlar analizi ile üç nokta eğme simülasyonu yapılan (D/t=48/1 mm) alüminyum tüpün Von-Mises gerilme sonuçları.	39
Şekil 24.	T�p kirişin ortasında alt ve üst cidarın i ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı.	40
Şekil 25.	T�p kirişin ortasında mandrel temas bölgesine en yakın mesafedeki alt ve üst cidarın i ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı.	40
Şekil 26.	Farklı deplasman değeri için alt cidarın i ve dış yüzeyindeki gerilme dağılımları.	41
Şekil 27.	T�p kirişin alt cidarındaki akma alanlarını gösteren gerilme dağılımı.	42
Şekil 28.	30 mm çapında ve farklı cidar kalınlıklarındaki t�p kirişlerin kuvvet deplasman grafikleri.	42
Şekil 29.	30 mm çapında ve farklı cidar kalınlıklarındaki t�p kirişlerin D/t oranına bağlı F_{max} eğrisi.	43
Şekil 30.	Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki t�p kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	43
Şekil 31.	Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki t�p kirişlerin çapa bağlı bükülme deplasman eğrisi.	43
Şekil 32.	T�p kiriş malzemesinin akma ve çekme dayanımlarının \pm %10 değiştirildiği durumlar için kuvvet-deplasman eğrileri.	44
Şekil 33.	Akma dayanımı aynı, çekme dayanımı %10 arttırılmış malzemenin kuvvet-deplasman eğrisi.	44
Şekil 34.	Mekanik �zellikleri farklı malzemelerdeki t�p kirişlerin akma dayanımına bağlı F_{max} değişimi.	45
Şekil 35.	D/t:30/1 mm'lik t�p yapıya ait birim Şekil değişimi dağılımı.	45
Şekil 36.	Sonlu eleman analiz modelleri (a) Daire kesitli boş kiriş (\varnothing 31), (b) Kare kesitli boş kiriş, (c-f) İçten takviyeli kompozit kirişler.	46
Şekil 37.	Darbe simülasyonunda kullanılan modeller.	47
Şekil 38.	Dıştan cam elyaf takviyeli 31 mm çaplı kompozit kiriş kombinasyonlarının, Tsai-Wu hasar kriteri uygulanarak üç nokta eğme davranışının incelenmesinde kullanılan, sonlu eleman modelleri: (a) CE+T, (b) CE+T+K(4), (c) CE+T+K(4)+PP(3,5), (d) CE+T+K(4)+PP(6,5), (e) CE+T+K(4)+PP(dolu).	48
Şekil 39.	(a) �n gerdirme aparatı tasarımı, (b) Yarı kesit görünüm, (c) İmalatı yapılmış �n gerdirme düzeneği.	49
Şekil 40.	Revize edilmiş �n gerilme aparatı: (a) Genel görünüm, (b) Tahrik tarafına ait detay görünüm, (c) Boru yataklamasının yapıldığı gerdirme kapakları, (d) Gerdirme işleminde kullanılan 6 mm çaplı elik örgü tel ve konik kafa.	50

- Şekil 41. Ön gerilme düzeneğiyle üç nokta eğme test cihazı üzerinde deneyin yapılması. 50
- Şekil 42. Sarkaç tipi darbe test düzeneği bileşenleri: alt tabla (1), kolonlar (2), kiriş (3), kolon destek profilleri (4), sarkaç kol (5), ana mil (6), askı plakaları (7), ağırlıklar (8), elektrik motoru (9), redüktör (10), zincir-dişli mekanizması (11), mekanik tutucu (12), pnömatik silindirler (13), disk fren (14), pnömatik fren silindiri (15), test numunesi (16), kayar mesnetler (17), destek parçaları (18), mekanik gösterge (19), perde (20). 51
- Şekil 43. İmalatı gerçekleştirilen sarkaç tipi darbe test düzeneğinin genel görünüşü: (a) Sarkaç nötr konumda, (b) Sarkaç çalışma yüksekliğinde. 52
- Şekil 44. Ön denemelerde kullanılan darbe deney numuneleri. 53
- Şekil 45. Burkulma deney düzeneği. 54
- Şekil 46. (a) Üç nokta eğme test cihazı genel görünüşü, (b) Üç nokta eğme deney düzeneği. 54
- Şekil 47. (a) 0° (veya sarıma bağlı olarak 90°) yönlenmeli cam elyaf kumaş, (b) 45° yönlenmeli cam elyaf kumaş, (c) 0°-90° cam elyaf dokuma kumaş. 55
- Şekil 48. Borulardan alınan kuponlar üzerinden Webster sertlik ölçme el aleti. 55
- Şekil 49. Optimum kompozit kiriş tasarımı için akış planı. 56
- Şekil 50. Boru çekme numunesinin hazırlanması: (a) Çapı 19/1 ve 24/1 mm alüminyum borular için hazırlanan tapalar, (b) Boru çekme numunesine tapaların yerleştirilmesi, (c) Boru çekme numunesi. 57
- Şekil 51. Boru çekme deneyi için hazırlanan çeneler ve çekme numunesinin çenelere yerleştirilmesi. 57
- Şekil 52. Çekme deneylerinin yapıldığı çekme cihazı. 58
- Şekil 53. Çapı 31mm olan borudan işlenen çekme numunesi. 58
- Şekil 54. (a) Çekme çeneleri (31 ve 40 mm çaplı borular için), (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi. 58
- Şekil 55. Polimerik malzemelerden (K, P ve PP) çıkartılan silindirik çekme numuneleri. 58
- Şekil 56. (a) Pultruzyon boru için hazırlanan tapalar, (b) Boru çekme numunesi. 59
- Şekil 57. 30 mm çaplı alüminyum borunun çekme deneyi numunesi. 59
- Şekil 58. Deney numunelerinin elle yatırma yöntemiyle düz zemin üzerinde hazırlanışı. 60
- Şekil 59. (a) Cam dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri, (b) Karbon dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri (1: çekme numunesi, 2: basma numunesi, 3: kayma numunesi). 60
- Şekil 60. (a) Tek eksenli cam elyaftan hazırlanan deney numuneleri, (b) Tek eksenli karbon elyaftan hazırlanan deney numuneleri (1: boyuna çekme numunesi, 2: boyuna basma numunesi, 3: kayma numunesi, 4: enine çekme numunesi, 5: enine basma numunesi). 61
- Şekil 61. PVC köpük malzemenin basma-sıkıştırma deneyi. 62

Şekil 62.	PVC köpük takviye (a) PVC köpük, (b) PVC köpük+kestamit.	62
Şekil 63.	Dıştan cam elyaf ve içten PVC köpük takviyelerin montaj öncesi görünümü.	62
Şekil 64.	PB ve çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilen (D/t:31/1) alüminyum tüpler.	63
Şekil 65.	PB kullanılmadan, çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilen (D/t:31/1) alüminyum tüpler.	64
Şekil 66.	Soldan sağa sırasıyla kullanılan PP, K ve PB'nin alüminyum tüpe yerleştirilmesi.	64
Şekil 67.	Dıştan ve içten takviye edilerek üretilen kombinasyonlar (a) Dıştan cam elyaf takviyeli, (b) Dıştan karbon elyaf takviyeli kombinasyonlar.	65
Şekil 68.	Numune hazırlama, (a) Boru etrafına yapılan elyaf dokuma sarımı, (b) Kürleme sonrası bir grup deney numunesinin genel görünüşü.	65
Şekil 69.	30 mm çaplı üç nokta eğme deneyi numuneleri, (a) içten takviyeli, (b) içten takviyeli, (c) dıştan cam elyaf takviyeli, (d) dıştan karbon elyaf takviyeli.	66
Şekil 70.	Darbe deneyi numuneleri	66
Şekil 71.	Kare kesitli kompozit numunelerin hazırlanması, (a) Alüminyum tüp kiriş ve kestamid takozlar, (b) Cam elyaf kumaş.	67
Şekil 72.	(a) El yatırması yöntemiyle numunenin hazırlanması, (b) Vakum torbalama uygulaması.	67
Şekil 73.	Deney ve analiz sonuçlarıyla elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	68
Şekil 74.	Farklı deplasman değerlerinde tüp kirişin orta noktasındaki değişimi gösteren deney ve analize ait sonuçlar (a) 6 mm, (b) 9 mm, (c) 12 mm.	69
Şekil 75.	Ön gerilme uygulanmış modelde sınır şartları ve yükleme durumu.	69
Şekil 76.	Ön gerilmeli kirişte sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.	70
Şekil 77.	(a) Ön gerilmeli modelde gerilme dağılımı (deplasman 9 mm), (b) Ön gerilmemiş modelde gerilme dağılımı (deplasman 12 mm).	70
Şekil 78.	Ön gerilme verilen bir tüp kirişte uygulanan kuvvetin bükülme olayına olan etkisi (a) boru yüzeyinde dış bükey yüzey oluşumu, (b) Bükülmeyle birlikte $F_{ön}$ kuvvetinin yatay bileşenin oluşması.	71
Şekil 79.	Ön gerilme ile deney esnasında gelişen maksimum ön gerilme değişimi.	71
Şekil 80.	T+K(4) yapısının sonlu eleman analizi ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	72
Şekil 81.	T+K(4) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki von-Mises gerilme dağılımı.	72
Şekil 82.	T+K(4)+PP(3,5) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	73
Şekil 83.	T+K(4)+PP(3,5 yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.	73

Şekil 84.	T+K(4)+PP(6,5) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	74
Şekil 85.	T+K(4)+PP(6,5) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.	74
Şekil 86.	T+K(4)+PP(10,5-dolu) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	75
Şekil 87.	T+K(4)+PP(10,5/dolu) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.	75
Şekil 88.	CE+T yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	76
Şekil 89.	Cam elyaf takviyeli 31 mm çaplı tüp kirşin farklı deplasmanlardaki analiz sonuçlarının hasar görüntüleri: (a) 1 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, (f) 25 mm.	77
Şekil 90.	CE+T yapısı için farklı deplasmanlara ait Tsai-Wu hasar parametreleri: (a) 15 mm, (b) 25 mm.	78
Şekil 91.	CE+T+K(4) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 14 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.	78
Şekil 92.	CE+T+K(4)+PP(3,5) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 13 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.	79
Şekil 93.	CE+T+K(4)+PP(6,5) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 12,5 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.	79
Şekil 94.	CE+T+K+PP(dolu) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.	80
Şekil 95.	Kare kesitli tüp kirişe ait deney ve analiz sonuçları.	81
Şekil 96.	Deplasmana bağlı olarak mafsal bölgesinde oluşan Von-Mises gerilmeleri.	81
Şekil 97.	2,75 ve 7 mm deplasmanlarda oluşan gerilme dağılımı.	82
Şekil 98.	Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T).	83
Şekil 99.	Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	84
Şekil 100.	Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T, B: K).	84
Şekil 101.	Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	85
Şekil 102.	Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T, B: K, C: PP/3,5).	85
Şekil 103.	Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	87
Şekil 104.	Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: PP/6,5, B: K, C: T).	87
Şekil 105.	Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	88
Şekil 106.	Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: K, B: PP/dolu, C: T).	89
Şekil 107.	Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	90

Şekil 108. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	90
Şekil 109. Dıştan cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin darbe simülasyonu modelleri: (a) CE+T, (b) CE+T+K, (c) CE+T+K+PP(3,5), (d) CE+T+K+PP(6,5), (e) CE+T+K+PP(dolu).	91
Şekil 110. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişimi (1: T, 4: CE).	92
Şekil 111. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	93
Şekil 112. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K).	94
Şekil 113. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	95
Şekil 114. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).	95
Şekil 115. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	96
Şekil 116. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).	97
Şekil 117. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	98
Şekil 118. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).	99
Şekil 119. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	99
Şekil 120. Simülasyonda kullanılan modeller.	100
Şekil 121. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim.	100
Şekil 122. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.	101
Şekil 123. D/t:19/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	104
Şekil 124. D/t:24/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	104
Şekil 125. D/t:24/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.	105
Şekil 126. D/t:30/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	105
Şekil 127. D/t:30/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.	105
Şekil 128. D/t:31/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	105
Şekil 129. D/t:31/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.	106
Şekil 130. D/t:31/1 mm ve sertliği 95-100 HB olan alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	106
Şekil 131. D/t:40/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	106
Şekil 132. 40x40x1,5 kare kesitli alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	107
Şekil 133. Pultruzyon ürünü borunun gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	107
Şekil 134. Cam elyaftan hazırlanan çekme numunesine deneyin uygulanışı.	108
Şekil 135. Dokuma elyafların çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	108
Şekil 136. Tek eksenli boyuna çekme numunelerinin çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	108

Şekil 137. Tek eksenli enine çekme numunelerinin çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	109
Şekil 138. Dokuma elyafların basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	109
Şekil 139. Tek eksenli boyuna basma numunelerinin basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	109
Şekil 140. Tek eksenli enine basma numunelerinin basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	110
Şekil 141. Dokuma elyafların (45° yönlü) kayma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	110
Şekil 142. Tek eksenli numunelerin kayma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.	110
Şekil 143. Dokuma elyaflardan hazırlanan numunelerin deney sonrası hasar durumları: (a) CE, (b) KE, (1: çekme numunesi, 2: basma numunesi, 3: kayma numunesi).	111
Şekil 144. Tek eksenli elyaflardan hazırlanan numunelerin deney sonrası hasar durumları: (a) CE, (b) KE, (1: boyuna çekme numunesi, 2: boyuna basma numunesi, 3: kayma numunesi, 4: enine çekme numunesi, 5: enine basma numunesi).	111
Şekil 145. Kestamite ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	112
Şekil 146. Polyamite ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	112
Şekil 147. Polipropilene ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.	113
Şekil 148. Polimerik malzemelerden hazırlanan numunelerin çekme deneyi sonrası hasar durumları.	113
Şekil 149. D/t:31/1 mm'lik tüp kirişte, farklı mandrel çapları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.	114
Şekil 150. En büyük kuvvet değerinin (F_{max}) mandrel çapına bağlı olarak değişimi.	114
Şekil 151. Farklı çap ve cidar kalınlığındaki tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	115
Şekil 152. En büyük kuvvetin (F_{max}) D/t oranına göre değişimi.	115
Şekil 153. Üç nokta eğme deneyine tabii tutulmuş bir grup numunenin görünümü.	116
Şekil 154. Farklı sertlik değerlerine sahip tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	116
Şekil 155. Yüksek sertlikteki (95-100HB) numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası görünümleri, (a) İnce cidarlı (1 mm), (b) Kalın cidarlı (2 mm).	116
Şekil 156. İçten kanatlı profil takviyeli tüp kiriş, (a) Sadece kanatlı profil, (b) Kanatlı profil+K.	117
Şekil 157. Kanatlı profil takviyeli tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	117
Şekil 158. Boş tüpün PB, P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	118
Şekil 159. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta P ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	118

- Şekil 160. Boş tüpün PB, P ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 119
- Şekil 161. PB, P ve PP'li kombinasyonların üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşleri. 119
- Şekil 162. Üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşler: (a) T+PB(3)+P(2), (b) T+PB(3)+P(11-dolu). 120
- Şekil 163. Boş tüpün PB, K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 120
- Şekil 164. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta K ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 121
- Şekil 165. Boş tüpün PB, K ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 121
- Şekil 166. PB, K ve PP'li kombinasyonların üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşleri. 123
- Şekil 167. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri: (a) T+PB(3)+K(2)+PP(3), (b) T+PB(3)+K(8). 123
- Şekil 168. Boş tüpün K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 124
- Şekil 169. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri. 124
- Şekil 170. Boş tüpün P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 125
- Şekil 171. Boş tüpün PB, P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 127
- Şekil 172. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta P ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 128
- Şekil 173. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri: (a) PB(2)+P(8), (b) PB(2)+P(12,5-dolu). 128
- Şekil 174. PP kalınlığının üç nokta eğme davranışına olan etkisi. 129
- Şekil 175. Boş tüpün (\emptyset 31) PB, K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 129
- Şekil 176. Boş tüpün (\emptyset 31) PB ve üç farklı kalınlıkta K ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 130
- Şekil 177. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri: (a) PB(2)+K(8), (b) PB(2)+K(12,5-dolu). 130
- Şekil 178. Boş tüpün (\emptyset 31) PB, K ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 131
- Şekil 179. PB(2)+K(2)+PP(10,5-dolu) numunenin cidarında oluşan yırtılma. 131
- Şekil 180. Farklı yönlenmelerde iki katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 133
- Şekil 181. Farklı yönlenmelerde dört katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 134

- Şekil 182. Farklı yönlenmelerde beş katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri. 134
- Şekil 183. Ø19x180 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numuneler: (1:T, 2:T+K, 3:CE+T, 4:CE+T+K, 5: KE+T, 6:KE+T+K). 136
- Şekil 184. Ø19x180 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri. 136
- Şekil 185. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø19x180 mm numunenin deney sonrası görünüşü. 137
- Şekil 186. Ø24x250 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri. 138
- Şekil 187. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø24x250 mm numunenin deney sonrası görünüşü. 139
- Şekil 188. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (K kalınlığının etkisi). 139
- Şekil 189. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri. 140
- Şekil 190. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PP kalınlığının etkisi). 140
- Şekil 191. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup CE'li numunenin deney sonrası görünüşü. 141
- Şekil 192. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış CE'li numunelerde kırılma bölgesi resimleri: (a) CE+T+PB+K(2), (b) CE+PB+K+PP(6), (c) CE+T+PB+K(11-dolu). 141
- Şekil 193. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri. 141
- Şekil 194. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (K kalınlığının etkisi). 142
- Şekil 195. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PP kalınlığının etkisi). 142
- Şekil 196. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup KE'li numunenin deney sonrası görünüşü. 143
- Şekil 197. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış KE'li numunelerde kırılma bölgesi resimleri: (a) KE+PB+K(2), (b) KE+PB+K+PP(6), (c) KE+PB+K(11-dolu). 143
- Şekil 198. Ø31 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri. 145

Şekil 199. Ø31 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.	146
Şekil 200. Ø40 mm olan alüminyum tüp ile oluşturulan kompozit kirişler.	148
Şekil 201. Ø40 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.	148
Şekil 202. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø40 mm numunenin deney sonrası görünüşü.	149
Şekil 203. PVC köpük malzeme boyunun kuvvet-deplasman grafiğine olan etkisi.	150
Şekil 204. Alüminyum boruya PVC köpük (108 mm) yapının takviye edildiği numune.	151
Şekil 205. K ve farklı boylardaki kısmi köpük malzemenin kuvvet-deplasman grafiğine etkisi.	151
Şekil 206. Dıştan elyaf, içten PVC köpük takviyenin kompozit tüpün kuvvet-deplasman davranışına etkisi.	152
Şekil 207. Ön yükleme esnasında boruda oluşan deformasyon, (a) alın kısmında oluşan deformasyon, (b) cidarda oluşan deformasyon.	153
Şekil 208. Alın yüzeyi ve K montajı iyileştirilmiş tüp yapıdaki ön yükleme kuvveti ve uygulanan eğme kuvvetinin deplasmanla değişimi.	154
Şekil 209. Önceki ön gerilmeli deney sonuçlarıyla, alın yüzeyi ve K bilezik montajı iyileştirilmiş tüp yapıya ait eğme kuvveti-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.	155
Şekil 210. Ön gerilme uygulaması için boruya montajlı portatif düzenek tasarımı.	155
Şekil 211. Ön gerilmeli/siz ve K bilezikli/siz takviyeli tüp yapıların kuvvet-deplasman eğrileri.	156
Şekil 212. Kare kesitli tüpte mafsal oluşumu.	157
Şekil 213. Takviyesiz ve içten K ile takviyeli kare kesitli kompozit kirişlerin eğme davranışları.	157
Şekil 214. Takviyesiz kare kesitli kirişin üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşü.	158
Şekil 215. İçten K takoz ile takviyeli kare kesitli kirişin üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşü.	158
Şekil 216. Dıştan CE takviyeli kare kesitli kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.	159
Şekil 217. CE takviyeli numunelerde oluşan hasar: 5: 2 kat CE, 6: 4 kat CE, 7: 6 kat CE.	159
Şekil 218. 2 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.	160
Şekil 219. 2 kat CE ve K takoz takviyeli kirişlerin yandan ve üstten görünüşleri.	160
Şekil 220. 2 kat CE ve 210 mm K takoz takviyeli kirişte mesnet tarafından oluşturulan hasar.	160

Şekil 221. 4 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.	161
Şekil 222. 4 kat CE ve K takoz takviyeli kirişlerin yandan ve üstten görünüşleri.	161
Şekil 223. 6 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.	162
Şekil 224. 6 kat CE ve K takoz takviyeli kirişin yandan ve üstten görünüşleri.	162
Şekil 225. Çapı 19 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.	163
Şekil 226. Çapı 24 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.	164
Şekil 227. Çapı 30 mm olan içten takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.	165
Şekil 228. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan (KE) takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri	166.
Şekil 229. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan (CE) takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri	167
Şekil 230. Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri: (a) CE'lı numuneler, (b) KE'lı numuneler.	168
Şekil 231. Çapı 40 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.	169
Şekil 232. İçten K ve PVC köpük takviyeli kirişlerin darbe deney sonucu hasara ait görüntüler.	169
Şekil 233. Kare kesitli içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri.	170
Şekil 234. Burkulma deneyi, (a) Takviyesiz kirişte oluşan bükülme, (b) Elyaf takviyeli kirişte oluşan bükülme.	171
Şekil 235. Burkulma deneyine tabi tutulmuş numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri.	171
Şekil 236. Burkulma deneyine tabi tutulmuş bir grup deney parçası.	172
Şekil 237. Burkulma davranışı, (a) Takviyesiz yapı, (b) İçten takviyeli yapı.	173
Şekil 238. Bağlantı aparatları: (a) Boş numuneler için, (b) Dolu numuneler için.	173
Şekil 239. Proje kapsamında üzerinde çalışılan tüp yapıların çapları ve yapılan takviyeye bağlı olarak elde edilen eğme kuvvetleri.	180

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.	Takviyesiz tüpte (çap 31 mm) farklı uzunluk ve cidar kalınlığı değerleri için hesaplanan doğal frekans değerleri.	34
Tablo 2.	Deney numunesi standartları.	60
Tablo 3.	Deney numunesinin içten takviyesi için planlanan kombinasyonlar.	63
Tablo 4.	Deney numunesi yüzeyine yapılacak elyaf takviyesi için öngörülen kombinasyonlar.	64
Tablo 5.	İçten ve dıştan takviye edilmiş 31 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.	102
Tablo 6.	İçten ve dıştan takviye edilmiş, PB takviyeli, 30 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.	102
Tablo 7.	İçten ve dıştan takviye edilmiş, 19, 24 ve 40 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.	103
Tablo 8.	Dokuma ve tek eksenli elyafların çekme, basma ve kayma deneyi sonuçları.	111
Tablo 9.	İçten profil ve kestamit takviyeli tüp kirişlerin üç nokta eğme deneyi sonuçları.	117
Tablo 10.	İçten takviye edilen (T, K, P, PP) kompozit kirişlere ait deneysel veriler.	122
Tablo 11.	İçten takviye edilen (T, PB, K, P, PP) kompozit kirişlere ait deneysel veriler.	126
Tablo 12.	Dıştan takviye edilmiş kompozit kirişlere ait deneysel veriler.	135
Tablo 13.	İçten ve dıştan takviyeli $\varnothing 19 \times 180$ mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.	137
Tablo 14.	İçten ve dıştan takviyeli $\varnothing 24 \times 250$ mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.	138
Tablo 15.	Çapı 30 mm olan tüp kirişe içten ve dıştan takviye edilerek oluşturulan numunelerin üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	144
Tablo 16.	Çapı 31 mm olan tüp kirişe içten ve dıştan takviye edilerek oluşturulan numunelerin üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	147
Tablo 17.	İçten ve dıştan takviyeli $\varnothing 40 \times 320$ mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.	149
Tablo 18.	EAK iyileştirilmiş kompozit yapı için incelenen kombinasyonlar.	152
Tablo 19.	Dıştan ve içten takviye edilmiş kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi sonuçları.	162
Tablo 20.	Çapı 19 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	163
Tablo 21.	Çapı 24 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	164
Tablo 22.	Çapı 30 mm olan borunun içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	165
Tablo 23.	Çapı 30 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	166

Tablo 24.	Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	167
Tablo 25.	Çapı 40 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	168
Tablo 26.	İçten K ve PVC köpük takviyeli kirişlerin darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.	169
Tablo 27.	40x40x1,5 mm kare kesitli numunelerin darbe deneyi sonuçları.	170
Tablo 28.	Farklı kombinasyonlar için elde edilen burkulma kuvveti ve $F_{max}/ağırlık$ oranı değerleri	172
Tablo 29.	Polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş, 31 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.	174
Tablo 30.	Polimerik malzemelerle içten ve dıştan takviye edilmiş, 31 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri	174
Tablo 31.	PB takviyeli 30 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.	175
Tablo 32.	19, 24 ve 40 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.	176
Tablo 33.	Kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.	176

ÖZET

METALİK TÜP KESİTLİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ HAFİF KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI, ANALİZİ VE ÜRETİMİ

Araç ağırlıklarının azalması hem çevre kirliliği ve hem de otomobillerin performansı açısından önemli bir konudur. Ağırlıkta azalma sağlamak için yüksek dayanıma sahip çelikler kullanarak boyutların küçültülmesi yoluna gidilmiş, alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi hafif malzemelerin kullanımı ise sınırlı düzeyde kalmıştır. Örneğin, otomobillerdeki yan koruma çubukları, tamponlar, traktörlerdeki emniyet çemberleri gibi yüksek mukavemet ve tokluğu gerekli kılan uygulamalarda ince taneli ve yüksek akma sınırına sahip çelikler kullanılmaktadır. Çelik taşıyıcılar yerine uygun şekilde üretilmiş kompozit kirişlerin kullanılması hafiflik ve emniyet açısından önemli avantajlar sağlama potansiyeli taşımaktadır.

Bu projede, ince cidarlı alüminyum tüpün ilave takviye malzemeleriyle içeriden ve dışarıdan desteklenmesi, tüpün atalet momentinin artırılması, ön gerilme vererek hasara neden olan çekme gerilmesinin büyüklüğünün azaltılması, hasar başlangıç mekanizmasının geciktirilmesi, ve bu çalışmaların sonucunda, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti iyileştirilmiş yeni taşıyıcı kompozit kiriş tasarımları geliştirilmesi amaçlanmıştır. Proje çalışmalarında mümkün olduğunca yurt içinden temin edilebilen malzemeler kullanarak, ülkemizin kendi öz kaynaklarıyla üretilebilecek, beklentilere cevap verebilecek, her sektör tarafından rahatlıkla kullanılacak, yüksek dayanıma sahip, hafif ve ucuz bir kompozit kiriş geliştirilmesine çalışılmıştır.

Kompozit kirişi oluşturmak için kullanılan bileşenler, ince cidarlı alüminyum tüp, kestamit, polyamit, polipropilen, pvc köpük, çelik tel, cam elyaf, karbon elyaf ve polyester reçine olmuştur. Çok katmanlı yapıdaki bir tüp kiriş için, elastiklik modülü, özgül ağırlığı, boyutları ve sıralaması optimize edilmiş, en az sayı ve miktarda ilave malzeme kullanarak, yukarıda belirtilen hususları sağlayacak, özgül mukavemet değeri yüksek bir kiriş elde edilmesine çalışılmıştır. Pek çok farklı kombinasyondaki numuneler için sonlu elemanlar analizi çalışmaları yapılmış, doğal frekans değerleri belirlenmiş, üretilen numunelerin çekme, üç nokta eğme, burkulma ve darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, takviyesiz duruma göre yük taşıma kabiliyetinde 17,5 kat ve enerji absorbe etme kabiliyetinde 11 kata varan artışlar sağlayan kompozit kirişler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit tüp kiriş; eğme dayanımı; darbe dayanımı; enerji absorbe etme kabiliyeti, elyaf takviye.

ABSTRACT

THE ANALYSES, DESIGN AND PRODUCTION OF LIGHT-WEIGHT HIGH-STRENGTH METALLIC TUBULAR COMPOSITE BEAM

The reduction in weight of the vehicles is a significant objective in automotive industry for both environmental and performance considerations. The short-term reduction in weight could be achieved by shortening in part dimensions simply using higher strength steels, while the usage of light materials such as aluminum and magnesium alloys is limited. Some applications require high strength with toughness, such as lateral bars and bumpers in vehicles and safety hoop in tractors. These kinds of components are generally being manufactured using materials such as fine grain steel alloys, which typically have high yield strength. Instead of a beam made of steel, the usage of composite beams designed and produced properly have potential of providing important advantages with respect to the lightness and safety of the structure.

In this project, it is aimed that to reinforce the thin section aluminum tubular beam by additional reinforcing materials used internally and externally, to increase the moment of inertia of the beam, to decrease the magnitude of the bending stress causing the failure, to delay failure mechanism by loading the pre-stressing, and to achieve a new composite beam having the increased load carrying and energy absorption capacity. The materials obtained from within the country were used as much as possible, in order to develop the cheap, light weight, high-strength composite beam which can be used by different sectors in the country.

The constituents of the beam are thin section aluminum tube, polyamide, polipropilen, pvc foam, high-strength steel wire, glass fiber, carbon fiber and polyester. Project studies were performed to generate a high specific-strength beam having multilayer cross-section with the usage of minimum additional reinforcing materials having the optimized properties of the elastic modulus, specific weight, dimensions and the use order in the tube. For the various specimen combinations, the finite element analyses were performed, the natural frequencies were determined, and the tensile, bending, buckling and impact experiments of produced specimens were realized. At the end of the project studies, compared with the unreinforced structure, the new composite beams which provide improvements 17,5 times in load carrying capacity, and 11 times in energy absorbing capacity, were generated.

Keywords: Composite tubular beam; bending strength; impact strength; energy absorption capacity; fiber reinforcement.

1. GİRİŞ

Yüksek mukavemetin yanı sıra tokluğun da ön plana çıktığı kritik parçalarda hafif metallerin tek başlarına kullanılmaları mümkün olmamaktadır. Taşıtlarda yan koruma çubuğu, araç tamponu ve emniyet çemberinin örnek olarak verilebileceği bu tür uygulamalarda ince taneli ve yüksek akma sınırına sahip çelikler kullanılmaktadır. Çeliğin yerini almak üzere tasarlanacak kompozit çubuk ya da kirişlerin, sadece özgül mukavemet değerlerinin değil aynı zamanda özgül enerji absorbe etme kabiliyetlerinin de yeterince yüksek olması istenmektedir (Michael 2007).

Tüp kesitli olarak üretilmiş veya içi boşaltılmış parçaların atalet momenti/ağırlık oranlarının yüksek olması nedeniyle, literatürdeki çalışmaların bu tür parçalar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir (Khurram 2006, Liu 2006, Mamalis 2006). Liu ve ark. ince cidarlı dairesel kesitli tüplerin eğme zorlanması altındaki davranışını sayısal ve analitik olarak incelemiş ve doğrusal olmayan malzeme davranışının modellenmesinde ve tasarım safhasında sonlu elemanlar tekniğinin başarıyla kullanılabilmesine dikkat çekmişlerdir (Liu 2008). Poonaya ve ark. yaptıkları deneysel çalışmalar kapsamında, 21-41 aralığında değişen altı farklı D/t (çap/cidar kalınlığı) oranı için çelik tüp kirişlerin eğme davranışını incelemiş ve analitik problem çözümü ile deneysel verilerin kabul edilebilir bir aralıkta değiştiğini vurgulamışlardır. Ayrıca kurulan teorik model ile kirişte plastik ağırlıklı gerçekleşen hasar mekanizmasının önceden tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir (Poonaya 2009).

Hilditch ve ark. alüminyum (7075-T6, 6063-T6) ve magnezyum (AZ31) alaşımlarına uyguladıkları statik eğme deneylerinin sonuçlarından hareketle yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetini araştırarak, tercih edilecek en iyi performansın 7075-T6 alüminyum alaşımı olduğuna ve AZ31 magnezyum alaşımının sergilediği eğme kuvveti ve absorbe ettiği enerji miktarının, yakın akma sınırına sahip 6063 alaşımına göre daha yüksek olduğuna dikkat çekmişlerdir (Hilditch 2009). Bu çalışmalarda malzemelerin mekanik özelliklerinin karakterize edilmesinde statik eğme testlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Diğer taraftan, eksenel yükleme durumunda parça davranışının incelendiği çalışmalara da rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda, eksenel zorlanma esnasında cidarın eksen boyunca düzgün bir şekilde kırılması için parça geometrisinde alınacak önlemler incelenmiş ve deformasyon boyunca kirişte yutulan enerji miktarları tahmin edilmeye çalışılmıştır (Arnold 2004, Cho 2008). Zeinoddini ve ark. eksenel olarak verilen yüklemenin çelik tüp kirişin yandan çarpmaya karşı dayanımına etkisini incelemiş ve bu yüklemenin çarpma hasarını kısmen azalttığını ifade etmişlerdir (Zeinoddini 2008).

Enerji absorbe etme kabiliyetini iyileştirmeyi hedefleyen çalışmalarda özellikle metal petek yapının sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Araçlarda, çarpışma durumu dikkate alınarak gerçekleştirilen bu tür çalışmalarda, kare ve daire kesitli yapı elemanlarının kullanıldığı, tüp içerisine metal köpük veya metal petek doldurulduğu görülmektedir (Seitzberger 2000, Santosa 2001, Hansen 2001, Weigang 2001, Güden 2006). Bu tür çalışmalarda ana taşıyıcı yapının kendisinden daha düşük dayanıma sahip, ancak düzgün boşluk içeren ve bu yapısıyla da kiriş ağırlığını çok fazla arttırmayan malzemelerden yararlanılmaktadır. Heung-Soo tarafından yapılan bir çalışmada, çelikten imal edilmiş kutu prizma içerisine konulan alüminyum köpük takviyenin etkisi hem numune bazında hem de gerçek otomobil karoser aksamı içinde kullanılarak incelenmiş, çarpma etkisinde birim ağırlık başına absorbe edilen enerjinin içi boş yapı için 0,46 kJ iken, takviye edilen yapıda bu değer 0,63 kJ olduğu belirlenmiştir (Kim 2001). Benzer bulguların diğer araştırmacılar tarafından da literatürde rapor edildiği görülmektedir (Chen 2002, Shahbeyk 2004). 6063-T7 ve 6060 malzemenin kare kesitli kirişlerin, alüminyum esaslı köpük ve petek yapıyla takviye edilmelerinin boş kirişe göre akma sınırını önemli ölçüde arttırdığı, özgül enerji absorbe etme kabiliyetini köpük ve petek yapılarla sırasıyla 1,8 ve 2 kat oranında iyileştirdiği ifade edilmiştir (Santosa 1999, Hansen 2000). Güden ve ark. alüminyum köpük doldurulmuş altıgen ve kare alüminyum tüp

kirişlerin yarı statik basma davranışlarını incelemiş ve içerisine çok sayıda tüpün yerleştirildiği kirişin enerji absorbe kabiliyetinin daha yüksek olduğunu tespit etmiştir (Güden 2006). Farklı metallere üretilen (alüminyum, pirinç ve titanyum) tüp kirişler kullanılarak deneylerin tekrarlandığı, dolgu malzemesi olarak alüminyum köpüğün dışında polimer köpüğün kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Hall 2002, Aktay 2006). Enerji absorbe etme kapasitesinin incelendiği bazı çalışmalarda taşıyıcı tüp kiriş olarak metal yerine elyaf takviyeli plastiklerin, dolgu malzemesi olarak da polimer esaslı (PMI, PUR, PVC) köpüklerin kullanıldığı görülmektedir (Mamalis 2008). Bu amaçla dolgu malzemesi olarak metal ve polimer köpük dışında talaş tozu ve betonun kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Hatzigeorgiou 2000, Singace 2000).

Metalik tüp kirişin içerisine dolgu malzemesi konmadan, sadece yüzeyinin elyaf takviyeli polimer ile kaplanmasıyla yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetinin artırılmasını hedefleyen çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kompozit yapının çarpma testlerinden başarıyla çıktığı ve takviyesiz yapıya göre ortalama çarpma yükünün 1,8 kat daha yüksek olduğu saptanmıştır (Bambach 2010). Kare kesitli çelik tüpün karbon elyaf takviyeli polimerle kaplanması durumunda mukavemet/ağırlık oranı 2 kat, katlanma (burkulma) direnci ise 4 kat artmıştır (Bambach 2009). Çap/et kalınlığı oranı 25 ve 48 olan alüminyum tüp kirişlerle yapılan benzer bir çalışmada, karbon elyaf takviye oluşturularak yapılan aksel çarpma davranışı incelemesinde yük taşıma kabiliyetinin 1,3 kat arttığı, özgül enerji absorbe etme kabiliyeti üzerinde ise önemli bir değişim görülmediği ifade edilmiştir.

Metalik tüp kesitli kirişlerin, hem içinin çeşitli köpükler ile doldurulması, hem de tüp kiriş yüzeyinin elyaf takviyeli kompozitler ile güçlendirilerek hibrit kompozit kiriş üretilmesi çalışmaları da literatürde mevcuttur. Dal-Woo ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, kutu kesitli alüminyum tüpün etrafına, kompozit kiriş takviye malzemesi olarak cam elyaf sarılarak oluşturulan hibrit kompozit yapı sayesinde, 6063-T5 kirişin yük taşıma kabiliyeti % 125 oranında, enerji absorbe etme kabiliyeti ise % 63 oranında artırılmıştır. Güden ve ark. 25 mm çapındaki cam elyaf katkılı polyester kompozit tüp kirişe alüminyum köpük doldurarak quasi-statik basma testleri yapılmışlardır. Köpük dolu kompozit tüp kirişin yük taşıma kabiliyeti boş kompozit tüp kirişe göre % 57 artmıştır (Güden 2006). 6063-T52 alüminyum tüp kirişler elyaf doğrultusu 45° ve 75° açıyla sarılmış ve içi köpük takviye edilmek suretiyle üretilen kiriş en yüksek dayanım 45° sarım açısı için elde edilmiştir. Köpük dolu hibrit tüp kirişlerin yük taşıma kabiliyeti boş alüminyum kirişlere göre yaklaşık 3,5 kat ve çarpma enerjisi ise 4 kat artırılmıştır.

Yapılan çalışmalarda takviye bileşeni olarak karbon elyafın popülaritesini koruduğu, metal taşıyıcıya dışarıdan karbon dokumanın sarılarak takviye edildiği, bazı çalışmalarda ise içeriden gözenekli metal (genellikle alüminyum) veya gözenekli polimerik malzemeler kullanıldığı görülmektedir. Bunlara ek olarak, özellikle taşıtlarda çarpışmaya karşı koruyucu eleman görevi gördürme maksatlı yapılarda deformasyon esnasında enerji absorbe etme kabiliyetinin artırılmasına yönelik çalışmaların devam etmektedir (Salehghaffari 2011). Eğilme etkisi altındaki kompozit tüplere ait rijitliğin incelendiği bir çalışmada, teorik formülasyon ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve kurgulanan teorik yaklaşımın önemli ölçüde deneysel verilerle uyum sağladığı rapor edilmiştir (Shadmehri 2011). Bir diğer çalışmada sonlu elemanlar yardımıyla silindirik olarak üretilmiş bir kompozit yapının özellikleri değiştirilerek eğilme zorlanmasındaki performansının artırılmasında optimizasyon çalışması yapılmıştır. Analiz sonuçlarından, elyaf yönlendirmesinin değiştirilerek yük taşıma kabiliyetinin artırılacağı ileri sürülmüştür (Blom 2010).

Son yıllarda pultrüzyon ürünü boruların takviye elemanı olarak kullanıldığı görülmektedir. Özellikle inşaat sektöründe doğrudan uygulama alanı bulabilecek, tek başına kagir olarak veya beton yapıda etriye görevi üstlenebilecek uygulamalara ait modellemeye ve deneye dayalı çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır (Zaki 2011, Kotynia 2011, Chakraborty 2011).

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında, tüp kirişin içine ve/veya dışına yapılan malzeme takviyeleriyle mekanik özelliklerin iyileştirilmesinin istendiği, yöntem olarak birbirlerinden çok

fazla farklılık göstermediği, taşıyıcı metalin türünün, ısıl işlemin, takviye edilen malzemelerin ve takviye şeklinin değiştiği görülmektedir.

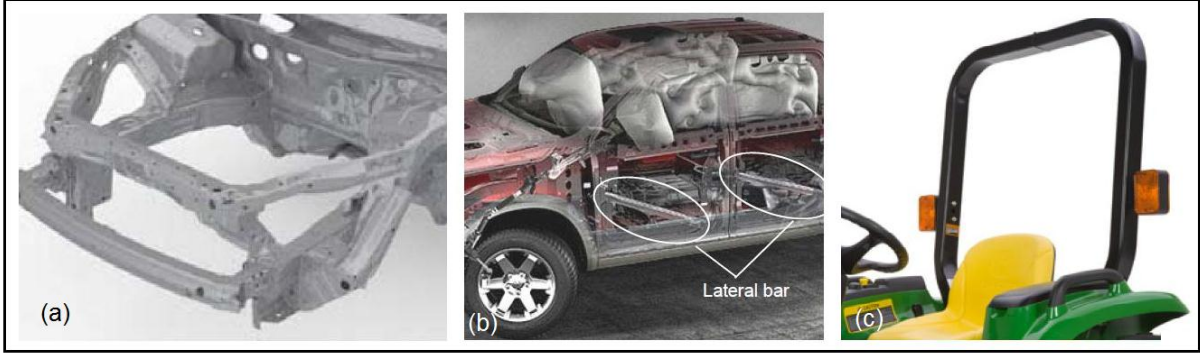
1.1. Projenin Amacı ve Kapsamı

Vinçler ve iş makineleri gibi parça büyüklüğünün ve hafifliğin çok önemli olmadığı uygulamalarda, taşıyıcı çubuklar malzemeleri ve maruz kaldıkları yükleme şartları dikkate alınarak boyutlandırılmakta ve kullanılmaktadır. Daire, kare, dikdörtgen kesitli içi boş kirişler, ağırlıktan sağladıkları tasarruf nedeniyle özellikle tercih edilmektedir. Ancak, otomobillerdeki kapı içi koruma çubukları ve kaporta kagir yapısı gibi, kiriş görevi göreceğ yapının olabildiğince küçük boyutlarda olmasının ve yüksek dayanımın özellikleri göstermesinin beklendiği uygulamalarda klasik yaklaşım yetersiz kalmaktadır.

Taşıtlarda ağırlığın azaltılması daha az yakıt tüketimi ve daha az çevre kirliliği anlamına gelmektedir. Hafif araç tasarımı raylı ulaşım araçlarında, özellikle hızlı tren uygulamalarında, büyük önem arz etmektedir. Gövde ve taşıyıcı sistemin alüminyum panelden oluştuğu uygulamaların yurt dışında hızla yaygınlaştığı bilinmektedir. Çarpışma durumunda en az hasarla bu durumun atlatmasına yönelik çalışmalar otomotiv sektöründe üzerinde yoğun çalışılan bir konuyu oluşturmaktadır. Çarpışma durumu için tampon ve bunu destekleyen kutu kafes yapıların yeterli dayanımla birlikte enerji absorbe etme davranışlarının artırılması araç güvenlik testlerinde temel başarı kriterlerinden birisini oluşturmaktadır. Bu kriterlerin karşılanması noktasında, mevcut yapıların başka malzemelerle desteklenmesi zorunluluğu daha da belirgin hale gelmektedir. Bu projede, yukarıda değinilen gereksinimlerden yola çıkarak ve belirtilen temel noktalar dikkate alınarak, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetleri artırılmış, yüksek mukavemetli ve hafif kompozit kiriş yapıların tasarım ve üretimlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Proje çalışmaları yürütülürken kullanılacak olan malzemelerin mümkün olduğunca yurt içi imkanlar değerlendirilerek temin edilmesi bir prensip olarak belirlenmiştir. Böylece, her sektör tarafından taşıyıcı ve emniyet amaçlı olarak rahatlıkla kullanılacak, yüksek mekanik dayanım beklentilerine cevap verebilecek ve düşük maliyetlerle temin edilebilecek çubuk/kiriş yapıların geliştirilmesine çalışılmıştır. Ana yapı olarak ince cidarlı tüp kesite sahip metalik yapı düşünülmüştür. Bu ana yapı üzerinde takviye edici bir takım yaklaşımlar ve ilave malzemeler uygulanarak, kirişin atalet momentinin artırılmasına, takviye malzemesinin yükün taşınmasına ortak edilmesine, en az sayı ve miktarda ilave malzeme kullanılarak özgül mukavemet değeri yüksek kiriş elde edilmesine, hasar başlangıç mekanizmasının geciktirilmesine, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Projede yürütülen analiz çalışmalarının ve deneysel çalışmaların sonuçlarından hareketle darbe sönümlemenin ön plana çıktığı ve yük taşıma kabiliyetinin önemli olduğu durumlar için kompozit kiriş kombinasyonları önerilmiştir.

Proje konusu küresel düzeyde bir konudur ve geniş bir sektöre hitap etmektedir. Geliştirilen kompozit kiriş, uygulanmakta olan taşıyıcı kiriş/çubuklara göre daha hafif ve aynı zamanda yüksek yük taşıma ve darbe sönümleme kabiliyetine sahiptir. Otomotiv ve raylı taşımacılıkta kullanılan taşıyıcı ve emniyet amaçlı yapı elemanlarından, aşırı zorlanan tarım makineleri parçalarına kadar bir çok sahada uygulanabilecektir. Flambaj direncini arttırması nedeniyle basma yüküne maruz tüp kesitli taşıyıcı elemanlarda da kullanılabilir. Geliştirilen kompozit kirişin uygulanabileceği araç şasesi, kapı içi yan emniyet çubukları, traktör koruma çemberi gibi tipik uygulama alanları Şekil 1'de verilmiştir.

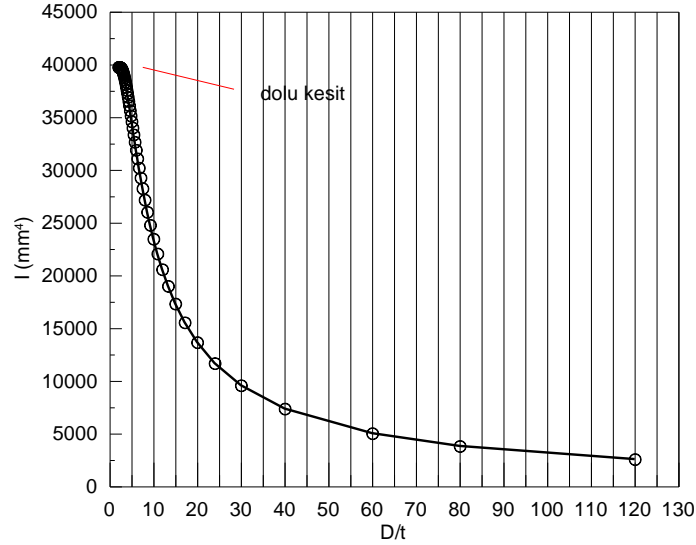


Şekil 1. Geliştirilen kompozit kirişin uygulama alanlarına örnekler: (a) Otomobil şasesi, (b) Kapı içi yan koruyucu çubuklar, (c) Traktör koruma çemberi.

1.2. Kiriş Yapılarda Yük Taşıma Kabiliyeti-Hafiflik İlişkisi

İçi boş ince cidarlı yapılar genelde hafifliğin önemli olduğu ancak taşıma yükünün çok büyük olmadığı uygulamalar için uygundur. Bu tür yapıların boyutları çap D ve cidar kalınlığı t üzerinden tanımlanmaktadır. Aşağıda silindirik ince cidarlı tüp yapının kiriş olarak kullanılabilirliği sistematik olarak ele alınmıştır.

Şekil 2'den de görüldüğü gibi ince cidarlı yapıların içi dolu kesite göre atalet değerleri artan D/t ile azalmaktadır. Kirişin yük taşıma kabiliyetinin yüksek ve aynı zamanda da hafif olması için atalet momenti değeri I ile kütlesi m dikkate alınmış ve karşılaştırma kriteri olarak I/m oranı kullanılmıştır. Projenin pilot deneylerinde ağırlıklı olarak 30 mm çaplı tüp kullanıldığından incelemeler öncelikle bu çap için yapılmıştır.



Şekil 2. Atalet momenti değerinin D/t oranı ile değişimi.

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \quad (1)$$

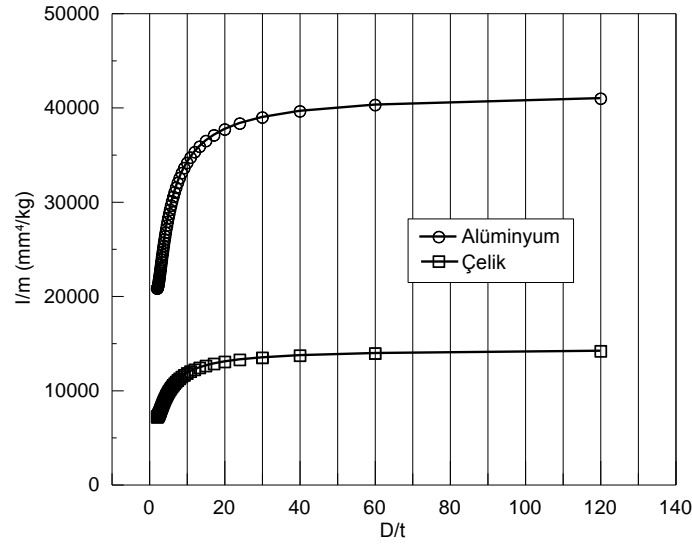
$$m = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot \rho \cdot L \quad (2)$$

Dairesel kesit için sırasıyla Denklem 1 ve 2'de verilen atalet momenti ve kütle ifadeleri oranlanıp gerekli düzenlemeler yapıldığında Denklem 3 elde edilmektedir. Burada $1/\rho$ ifadesi malzemeye ait bir çarpan, diğerleri ise tamamen geometriye ait büyüklüklerdir. I/m oranının maksimize edilmesi durumunda hafif ve yük taşıma kabiliyeti yüksek kiriş tasarlanmış olacaktır.

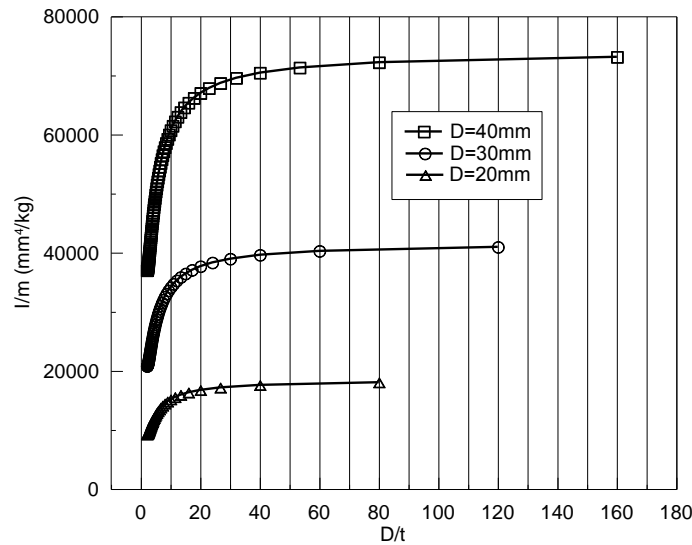
$$\frac{I}{m} = \frac{1}{\rho} \frac{(D^2+d^2)}{16.L} \quad (3)$$

30 mm çaplı çelik ve alüminyum tüp kirişlerde, farklı D/t değerleri için I/m değerleri hesaplanmış ve elde edilen grafikler Şekil 3'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, hafif yapı tasarımı açısından alüminyumun daha uygun bir malzeme seçimi olduğu anlaşılmaktadır. D/t 'nin küçük değerlerinde I/m 'in hızlı bir şekilde arttığı, $D/t=10$ 'dan sonra artış hızını azaldığı dikkat çekmektedir. $D/t=20$ 'den sonra artış hızındaki azalma şiddetlenmektedir. $D/t=50$ ve sonrasında ise eğri önemli oranda yatıklaşmakta ve daha ince cidarlı yapının tercih edilmesi için pratik bir nedenin kalmamaktadır.

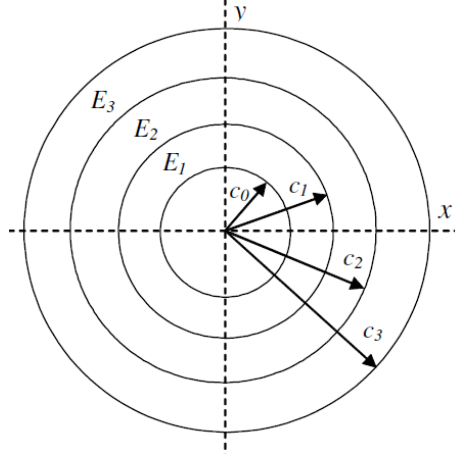
Literatürde yük taşıma amaçlı ince cidarlı yapılarda $15 < D/t < 80$ tavsiye edilmektedir (Elchalakani 2002). Şekil 3'den anlaşılacağı gibi alüminyum için $15 < D/t < 50$ seçilmesi uygun olacaktır. Yapılan çalışmalarda bu oranın söz konusu aralıkta yoğunlaştığı görülmektedir. Şekil 4'te ise üç farklı çap için $I/m-D/t$ değişimi verilmiştir. Kiriş parçasının iç kısmının boşaltılmış olmasının, dolu durumlarına göre sağladığı üstünlük büyük çaplar için daha fazladır. Diğer bir deyişle küçük çaplı parçanın içerisinin boşaltılmış olması I/m oranında önemli artış sağlamamaktadır (Şekil 4).



Şekil 3. Çelik ve alüminyum malzemede $D=30$ mm için $I/m-D/t$ değişim grafiği.



Şekil 4. Alüminyum malzemede farklı çaplar için $I/m-D/t$ değişim grafiği.



Şekil 5. İç içe geçmiş üç farklı silindirik malzemeden oluşmuş delikli kompozit çubuk.

Proje çalışmalarının ana çerçevesini oluşturan dairesel kompozit kiriş tasarımında, akma sınırı, özgül ağırlık ve elastiklik modülü değerleri önemlidir. Genel yaklaşım olarak parçanın merkezine doğru bu büyüklüklerin azalan bir sırada bulunması öngörülmektedir. Şekil 5'teki gibi farklı malzemelerden oluşan bir kiriş için

$$E_3 > E_2 > E_1, \rho_3 > \rho_2 > \rho_1, \sigma_y^3 > \sigma_y^2 > \sigma_y^1 \quad (4)$$

olmak üzere eğilme momenti altındaki bir kirişin kesitindeki herhangi bir nokta için normal gerilme denklemi

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (5)$$

ile verilmektedir. Burada M eğilme momenti, y tarafsız eksene olan mesafe, I ise kesit atalet momentidir. Analiz edeceğimiz kesitte üç katman olduğu kabul edilerek atalet momentini

$$I = \frac{\pi}{4} \left[(C_1^4 - C_0^4) + \frac{E_2}{E_1} (C_2^4 - C_1^4) + \frac{E_3}{E_1} (C_3^4 - C_2^4) \right] \quad (6)$$

formülü ile hesaplanabilir. Herhangi bir malzeme katmanındaki herhangi bir nokta için eğilme normal gerilmeleri

$$\sigma_1 = \frac{My}{I} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \frac{My}{I} \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \frac{My}{I} \left(\frac{E_3}{E_1} \right) \quad (9)$$

denklemleriyle bulunabilir. Şekilde gösterilen kesite sahip bir kompozit tüpün birim uzunluk başına kütlesi

$$m = \pi [(C_1^2 - C_0^2)\rho_1 + (C_2^2 - C_1^2)\rho_2 + (C_3^2 - C_2^2)\rho_3] \quad (10)$$

ile bulunur. Burada yapının ağırlığını minimize ederek maksimum mukavemete sahip bir tasarım gerçekleştirilmeye çalışılacaktır. σ_y ilgili malzemenin akma gerilmesi olmak üzere, optimizasyonda aşağıdaki şartların sağlanması gereklidir.

$$\sigma_1 = \frac{MC_1}{I} \leq \sigma_y^1 \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{E_2}{E_1} \right) \frac{MC_2}{I} \leq \sigma_y^2 \quad (12)$$

$$\sigma_3 = \left(\frac{E_3}{E_1} \right) \frac{MC_3}{I} \leq \sigma_y^3 \quad (13)$$

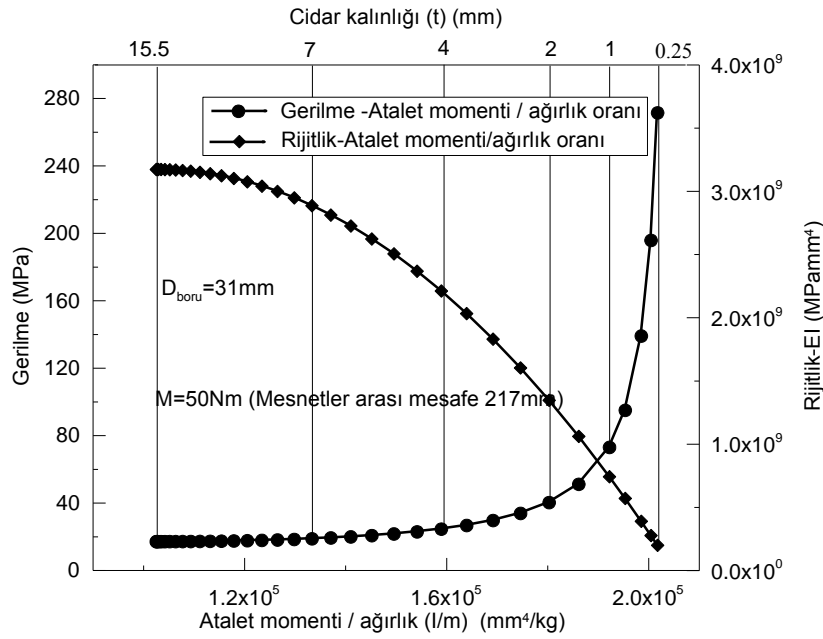
(I/m) oranı ve M değeri maksimum olan kiriş kombinasyonu belirlenecektir. Tasarlanan her bir kompozit yapının rijitliği

$$Rijitlik = \sum_i^n E_i I_i \quad (14)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada, n katman sayısı, E elastiklik modülü, I kirişi oluşturan her bir bileşenin atalet momentidir

Yukarıdaki verilen teorik bilgiler yardımıyla dairesel kesitli bir kirişe içeriden yapılacak takviye için polyamit, kestamit, polipropilen ve pultrüzyon ürünü malzemeler, dışarıdan yapılacak takviye için de cam elyaf takviye edilmiş epoksi malzemeler öngörülmüştür. Elastiklik modülü değerleri, özgül kütleleri dikkate alınarak her bir kombinasyon için I/m oranları saptanmıştır. Daha sonra 50 Nm eğme momenti için 31 mm çaplı alüminyum tüpün yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m ile değişimi veren grafikler üretilmiştir. Kirişin rijitlik değerleri de hesaplanarak grafik ortamına taşınmıştır. Hesaplamaların 31 mm çap için yapılmasının ana nedeni dairesel kesit için geliştirilebilecek bütün kombinasyonların öncelikle bu çap için optimize edilecek olmasıdır.

İlk olarak takviyesiz tüp yapı için I/m bağılı olarak, gerilmenin ve rijitliğin değişimi Şekil 5'de verilmiştir. İçi boş kiriş yapıda artan cidar kalınlığı ile gerilme düşmekte ve $D/t=6$ mertebelerinde ($t=5$ mm) sonra kalınlıktaki artış gerilme üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. (I/m) oranının maksimize edilmesi açısından konu irdelenirse, hafif yapı tasarımı için $D/t>15$ değerlerinde ($t\approx 2$ mm) tüp yüzeyinde gerilme artış eğilimine girmekte, $D/t>30$ sonrasında artış çok daha fazladır. Diğer taraftan rijitlik açısından I/m 'in büyük değerleri için rijitlik sürekli azalmaktadır (Şekil 6).

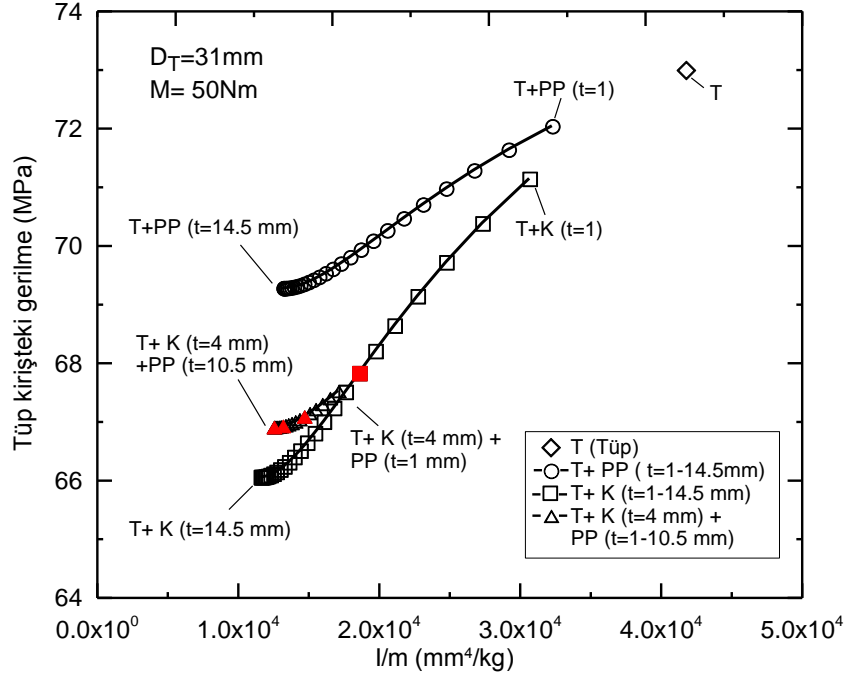


Şekil 6. Dış çapı 31 mm olan farklı cidar kalınlıklarına sahip alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin ve rijitliğin I/m oranına göre değişimi.

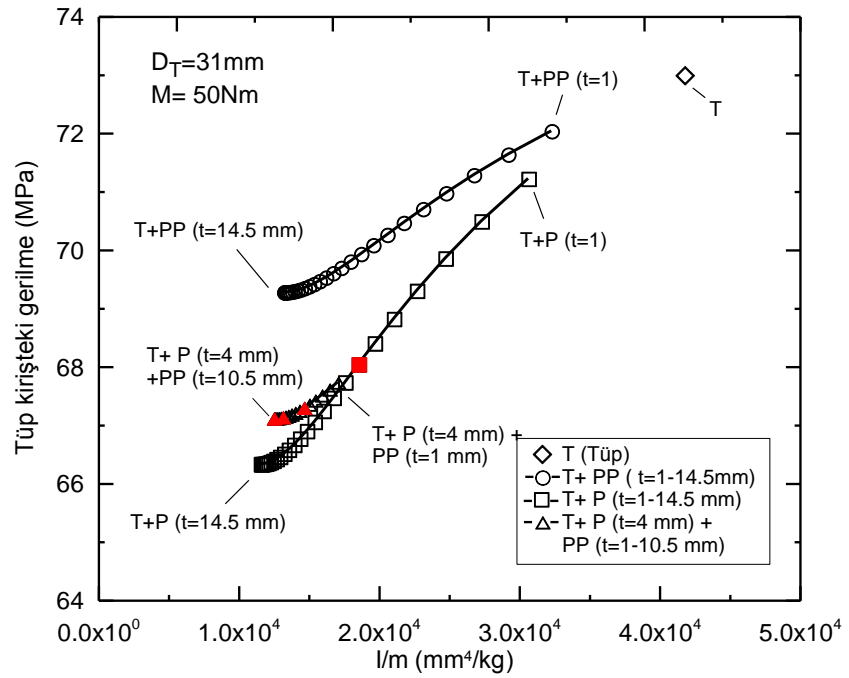
DeneySEL çalışmalarında, Şekil 6'da $D=31$ mm için incelenen yapının farklı malzemelerle takviye edilmesi durumunda, gerilmeye nasıl bir değişim ortaya çıkacağını anlamak amacıyla kompozit yapıya ait aşağıdaki grafikler üretilmiştir. Bu grafiklerden (Şekil 7-10) hareketle deney kombinasyonlarına karar verilmiş, özellikle grafiklerde kırmızıyla işaretlenmiş şartlardaki numunelerin hazırlanmasına çalışılmıştır. Alüminyum tüp kiriş (T), kestamit (K), polyamit (P), polipropilen (PP) ve pultrüzyon ürünü boruya (PB) ait elastiklik modül değerleri literatürden alınarak hesaplamalarda kullanılmıştır.

Şekil 7, 8, 9 ve 10'da çeşitli polimerik malzemeler (K: kestamit, P: polyamit, PP: polipropilen, PB: pultrüzyon ürünü boru) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin (T) yüzeyinde oluşan gerilmenin I/m oranıyla değişimi verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, ilave edilen malzemelerin elastik modülleriyle ilişkili olarak tüp kiriş yüzeyinde oluşan gerilmenin azaldığı görülmüştür. Bu tasarımda temel nokta, I/m oranı yüksek hafif bir kiriş elde etmek ve aynı

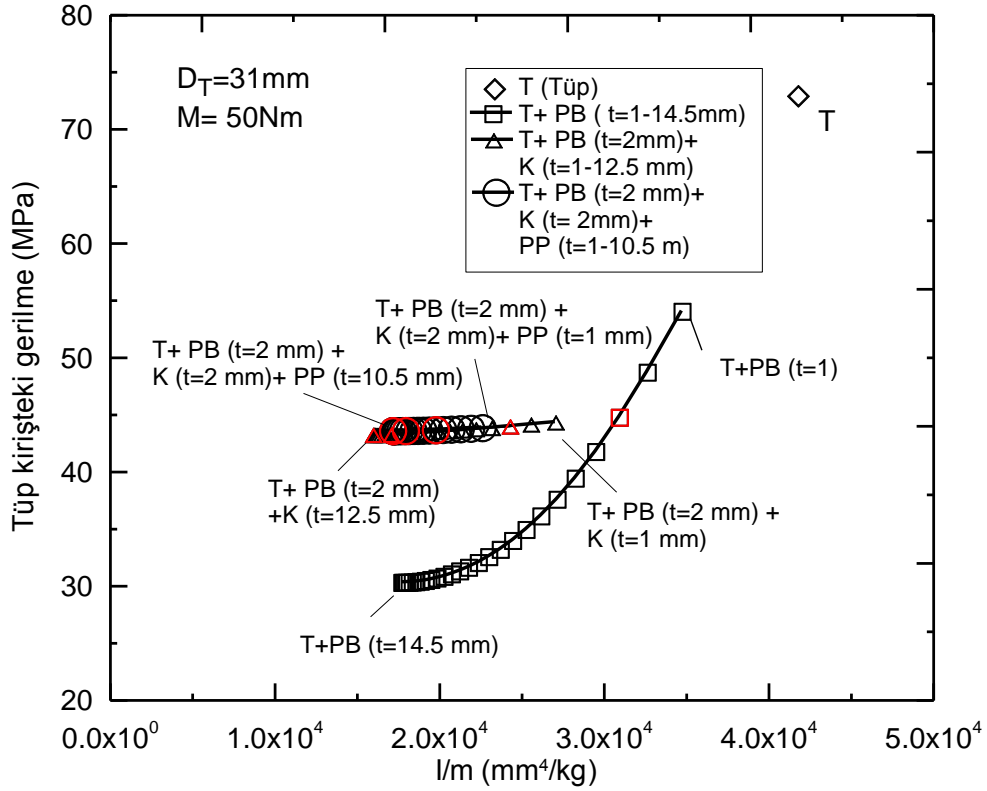
zamanda tüp kiriş yüzeyinde oluşan gerilmeyi mümkün olduğunca düşürmek olduğundan grafiklerde kırmızı renkle işaretlenmiş olan noktalar için deneyler yapılacaktır.



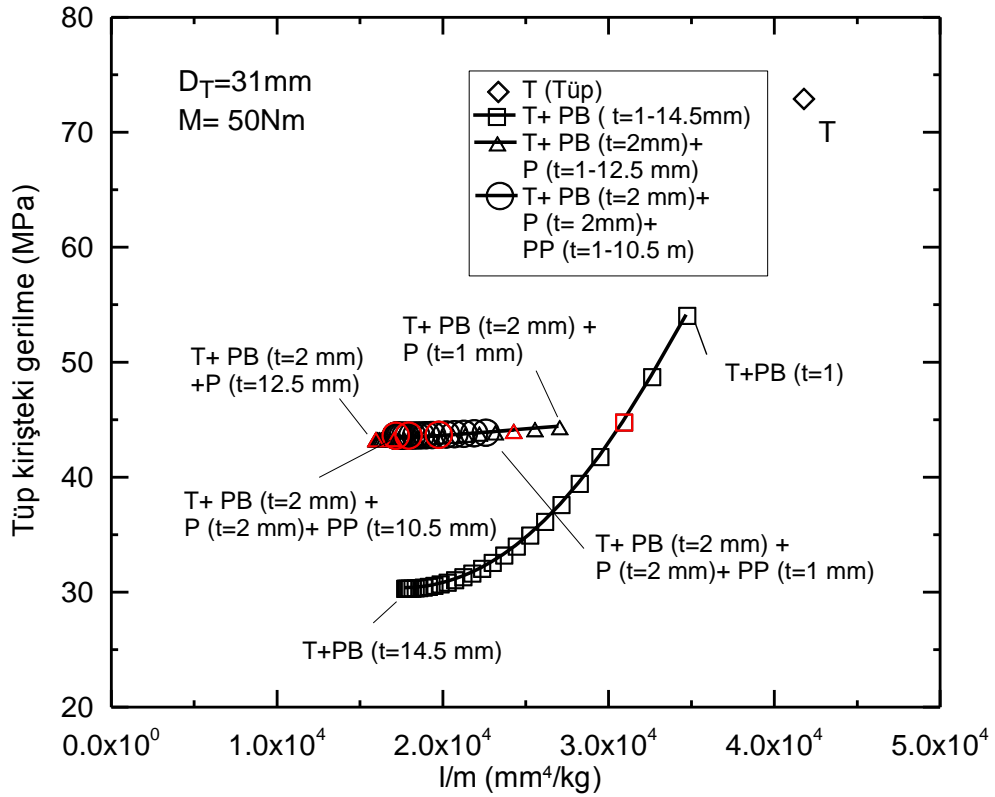
Şekil 7. Çeşitli polimerik malzemelerle (K, PP) takviye edilmiş alüminyum tük kirişin (D/t:31/1) yüzeyinde oluşan gerilmenin l/m oranıyla değişimi.



Şekil 8. Çeşitli polimerik malzemelerle (P, PP) takviye edilmiş alüminyum tük kirişin (D/t:31/1) yüzeyinde oluşan gerilmenin l/m oranıyla değişimi.

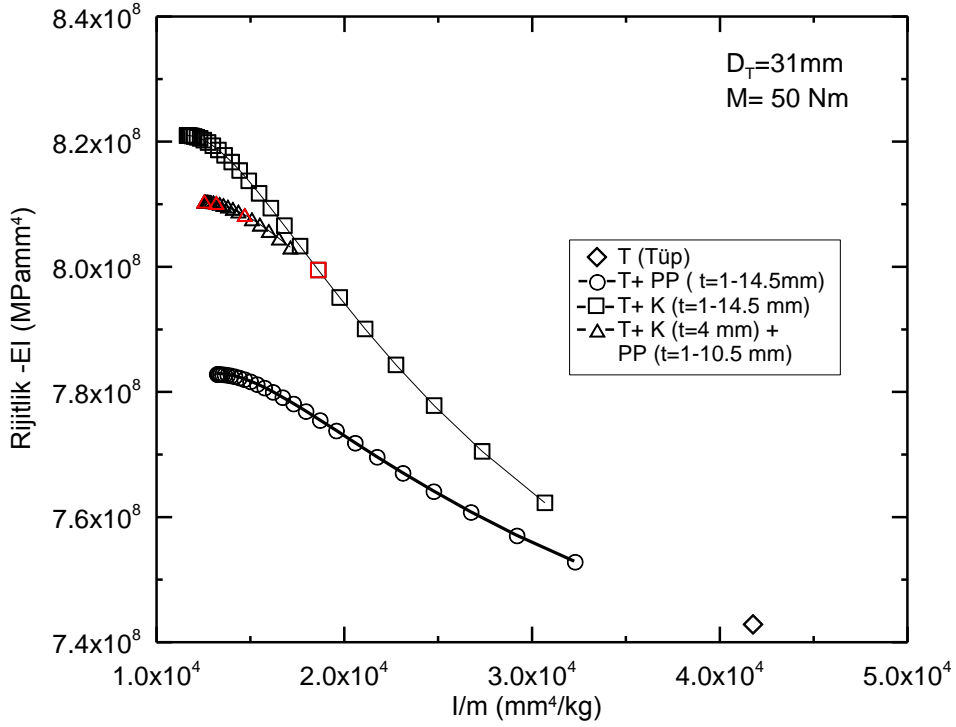


Şekil 9. Çeşitli polimerik malzemeler (K, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin l/m oranıyla değişimi.

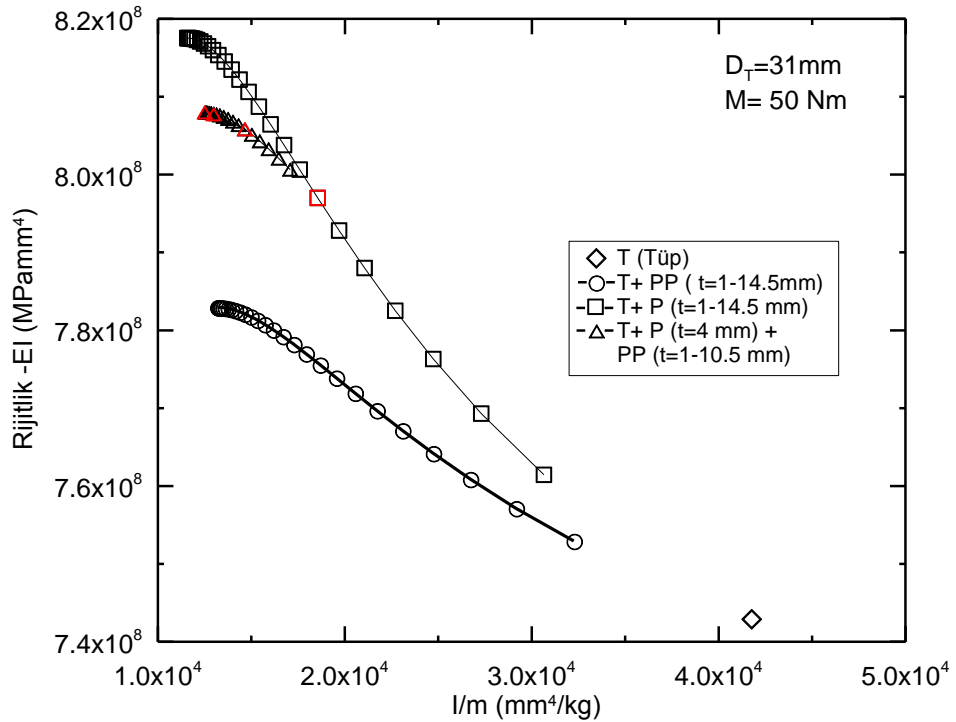


Şekil 10. Çeşitli polimerik malzemeler (P, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum tüp kirişin ($D/t:31/1$) yüzeyinde oluşan gerilmenin l/m oranıyla değişimi.

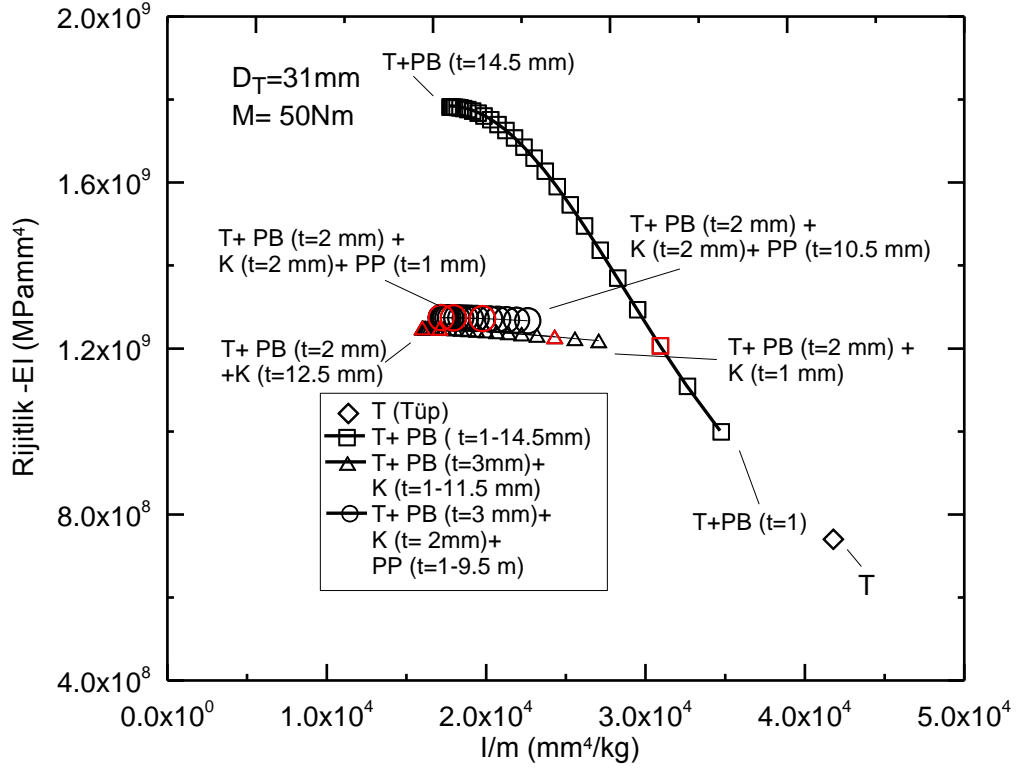
Şekil 11,12, 13 ve 14'de çeşitli polimerik malzemeler ve pultrüzyon ürünü boruyla takviye edilmiş tüp kirişin rijitliğinin I/m oranıyla değişimi incelenmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, elastik sınırlar içerisinde takviye malzemelerinin ilave edilmesiyle rijitliğin arttığı görülmektedir.



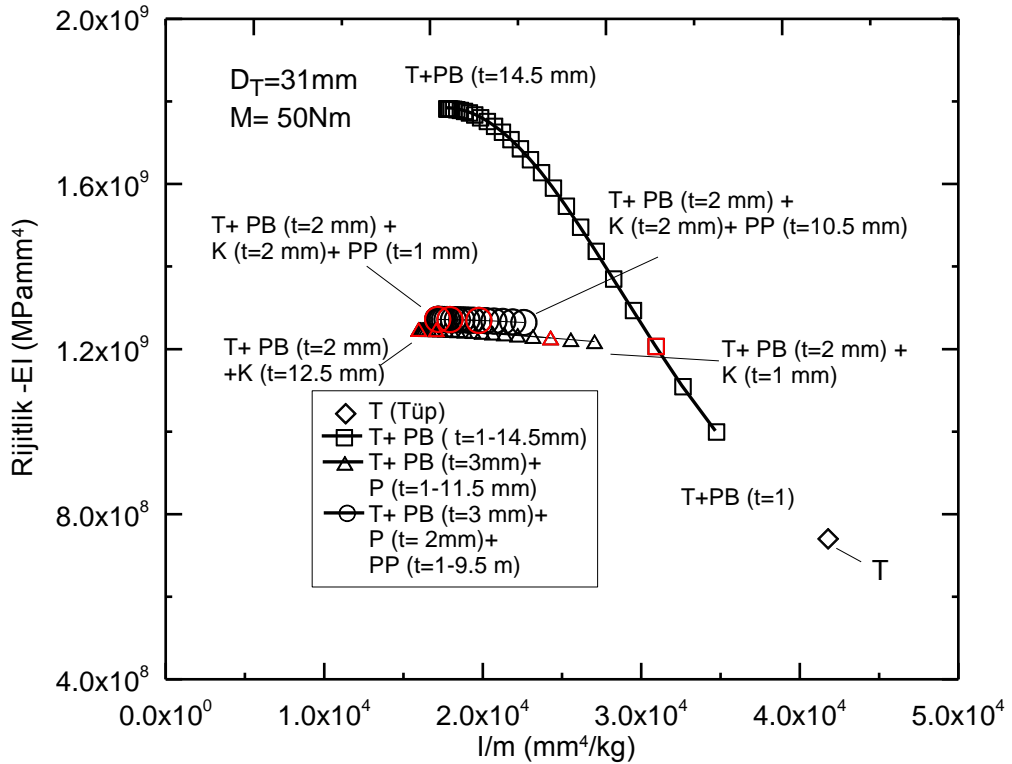
Şekil 11. Çeşitli polimerik malzemelerle (K, PP) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi.



Şekil 12. Çeşitli polimerik malzemelerle (P, PP) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi.



Şekil 13. Çeşitli polimerik malzemeler (K, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi.



Şekil 14. Çeşitli polimerik malzemeler (P, PP, PB) takviye edilmiş alüminyum kirişin ($D/t:31/1$) rijitliğinin I/m oranıyla değişimi.

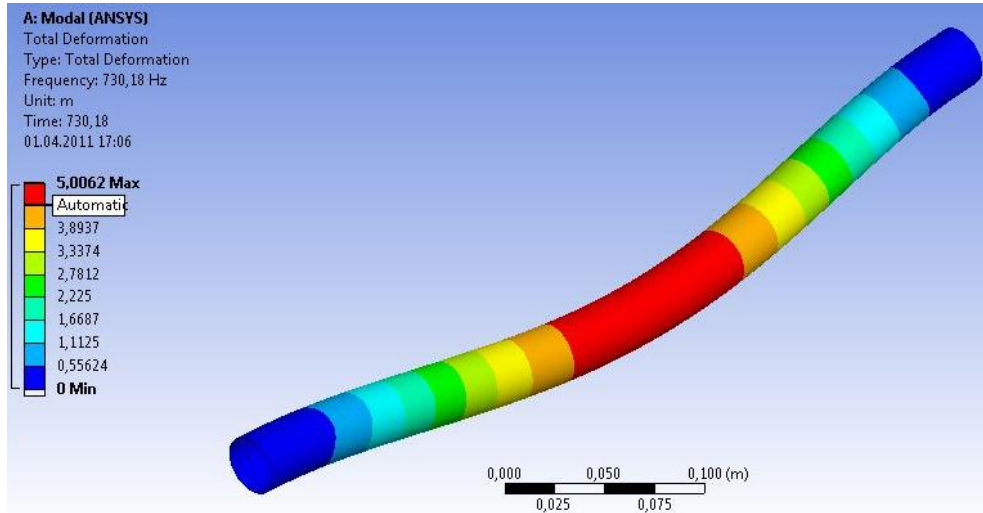
1.3. Doğal Frekans Değerleri

Zorlanma altında yapının kendine ait doğal frekans değerinin, etkisi altındaki dış kuvvetin frekansına çakışması durumunda titreşim genliği sürekli bir şekilde artarak yapının hasarlanmasına neden olmaktadır (rezonans durumu). Proje kapsamında tüp yapının içeriden ve dışarıdan ayrı ayrı ve birlikte takviye edilmesi durumları için frekans değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Mod I titreşimi için düşey doğrultuda serbestliğe sahip basit mesnetlenmiş ve ortadan yükleme (üç nokta eğme test durumu) için eğme deney verilerinden, parça rijitliği ve ağırlıktan hareketle sönümsüz sistem için doğal frekans Denklem 15 ile hesaplanmıştır.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (15)$$

Burada, K ele alınan kirişin eş değer yay sabiti (N/m), m ise kütesidir (kg). Çalışmada ayrıca sonlu eleman modeli kullanılarak titreşim analizi yapılmış ve her iki yöntemle belirlenen büyüklükler karşılaştırılmıştır. Uygulamada titreşim frekansının küçük olması ve rezonans açısından çok daha kritik olması nedeniyle sonlu eleman analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde en küçük frekans değerleri dikkate alınmıştır. Projede ele alınan yapının uygulamada her iki ucundan hareketinin sınırlandırılmış olması nedeniyle sonlu eleman çalışmalarında bu durum dikkate alınmış ve modellemeler bu yönde genişletilmiştir. Analizler $L=275$, 500 ve 750 mm uzunluklar ve $t=0,75$, 1 ve $1,5$ mm cidar kalınlıkları için yapılmıştır. Takviye edilmiş yapılar için de bu analizler tekrarlanmıştır.

İki ucundan sabitlenmiş, 31 mm çaplı takviyesiz yapının, farklı boy ve cidar kalınlıklarında, Mod-I için analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Diğer modlarda belirlenen frekans değerlerinin çok daha yüksek olması ve bunun uygulamada rezonans açısından daha az risk taşıması nedeniyle Mod-I için sonuçların verilmesi yeterli görülmüştür. Tablodaki değerler incelendiğinde, artan uzunlukla, verilen bir cidar kalınlığı için, beklendiği gibi, frekans değerinin hızlı bir şekilde azaldığı, $L=750$ mm için cidar kalınlığının frekans üzerindeki etkisinin azaldığı görülmektedir. 500 mm uzunluğunda ve $0,75$ mm cidar kalınlığındaki tüpün Mod-I için örnek deplasman davranışı Şekil 15'de verilmiştir. Yer değiştirmenin mesnet uçlarından uzaklaştıkça arttığı ve tüpün orta kısmında yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 15. Uzunluğu 500 mm ve cidar kalınlığı 0,75 mm olan iki ucundan sabitlenmiş tüpün Mod I için deplasman davranışı ($f=730,18$ Hz).

Tablo 1. Takviyesiz tüpte (çap 31 mm) farklı uzunluk ve cidar kalınlığı değerleri için hesaplanan doğal frekans değerleri.

Uzunluk (mm)	Cidar kalınlığı (mm)		
	0,75	1	1,5
270	2231 Hz	2199 Hz	3235 Hz
500	730 Hz	715 Hz	725 Hz
750	382 Hz	375 Hz	379 Hz

1.4. Kompozit Yapılar İçin Hasar Kriterleri

Tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin elastiklik özellikleri ve mukavemet değerleri x/y/z eksenleri için tanımlanır. Takviye bileşeni doğrultusunda ve diğer iki doğrultudaki mukavemet değerleri çekme/basma deneyleriyle belirlenir. Bir katmanın malzeme özelliklerinin bilinmesi durumunda, zorlanma esnasında hasarın öncelikle hangi tabaka veya yapıda başlayacağı tahmin edilebilmektedir. Hasar türü, yüklemeye, elyaf yönlenmesine ve numune geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu konuda çeşitli kriterler öne sürülmüştür. Bu kriterlerin çoğu tabakadaki gerilme durumuna dikkate alarak tanımlanmıştır.

Günümüz genel amaçlı sonlu eleman yazılımları ile kompozit malzeme modellemek ve analiz yapmak mümkündür. Bu yazılımlar genellikle, maksimum gerilme, maksimum sekil değiştirme, Tsai-Wu, Hoffman gibi hasar kriterlerini kullanmaktadırlar. Dolayısıyla analizlerde bu kriterler kullanılarak kompozit yapının uygulanan kuvvet altında hasara uğrayıp uğramadığı belirlenir. Özellikle Tsai-Wu ve Hoffman kriterleri birçok tasarımcı tarafından kullanılan hasar kriterleridir. Bu kriterler hasarın seklini tespit edemezler. Uygulanan kuvvete karşılık elde edilen gerilme değerleri kriterlerde yerine konularak malzemenin hasara uğrayıp uğramadığı belirlenir. Ayrıca, genel amaçlı birçok sonlu eleman analiz programlarında kompozit malzemeler için hasar ilerleme modellemesi yapılamamaktadır. Kompozit malzemelerde hasarın oluşması ve ilerlemesi metallere farklıdır.

Kompozit malzemelerde hasar belirli bir sıraya göre meydana gelir. Malzemeye, geometriye, tabaka takviye açısına ve uygulanan yüklemeye şekline bağlı olarak öncelikle mukavemet açısından zayıf tabakaların matris yapısında kırılma meydana gelir. Bu durumda matris yük taşıyamaz ve tüm yük elyaf malzemeye aktarılır. Uygulanan kuvvetin artırılmasına bağlı olarak yapının diğer tabakalarında elyaf hasarı ve elyaf ile matris arasında kayma oluşabilir. Hasarın şekline göre kompozit malzemenin farklı malzeme özellikleri etkilenir ve yük taşıma kapasitesi düşer.

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Ortotropik tabakada, düzlem gerilme şartları için Tsai-Wu hasar teorisi gereğince aşağıdaki denklemin sağlanması durumunda hasar gerçekleşecektir.

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (16)$$

Şekil 16'daki x eksenine göre fiber yönlenme açısı θ 'da tek yönlü elyaf içeren ortotropik tabakanın düzlem gerilme şartları göz önüne alındığında elastik özellikleri E_{11} , E_{22} , G_{12} ve ν_{12} ile gösterilen dört sabitle belirlenir ve dayanım özellikleri şu beş faktörle gösterilir:

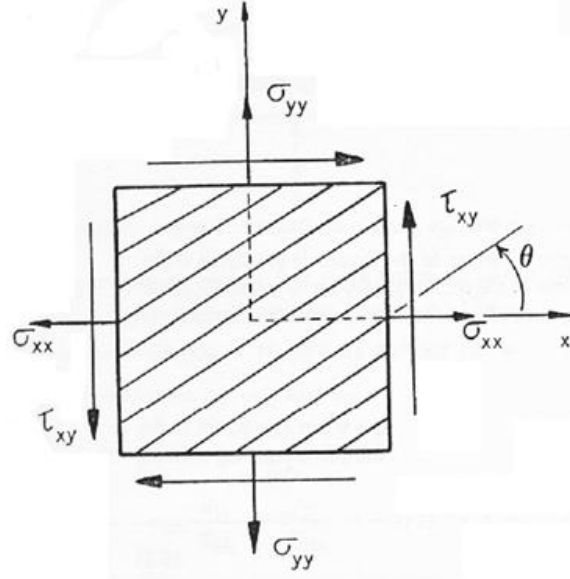
X_t = fiber yönündeki çekme dayanımı

Y_t =fiber yönüne dik doğrultudaki çekme dayanımı

X_c =fiber yönündeki basma dayanımı

Y_c =fiber yönüne dik doğrultudaki basma dayanımı

S =düzlem kayma dayanımı



Şekil 16. Ortotropik tabakada gerilme durumu.

Aşağıdaki eşitliklerde F_1 ve F_2 dayanım katsayıları olmak üzere F_{12} , σ_{11} ve σ_{22} arasındaki dayanım etkileşim terimidir. F_1 , F_2 , F_{11} , F_{22} ve F_{66} genel malzeme özellikleri olan çekme basma ve kayma dayanım özellikleriyle hesaplanabilir. F_{12} 'nin hesaplanması için iki eksenli teste ihtiyaç vardır. Örneğin, iki eksenli çekme testinde hasar halinde $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$ olur.

$$F = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} F = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} F_6 = 0 \quad (17)$$

$$F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c} F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c} F_{66} = -\frac{1}{S^2} \quad (18)$$

Eşitlik 16 kullanılarak şu ifade yazılabilir:

$$(F_1 + F_2)\sigma + (F_{11} + F_{22} + 2F_{12})\sigma^2 = 1 \quad (19)$$

$$F_{12} = -\frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right] \quad (20)$$

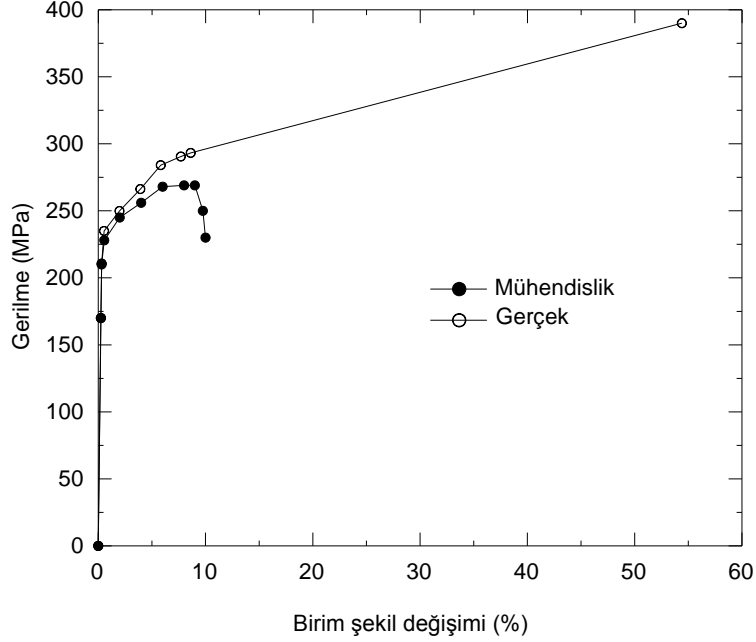
Burada, iki eksenli çekme testini gerçekleştirmek her zaman çok kolay olmadığından F_{12} 'nin aşağıdaki aralıkta olması beklenir. Deneysel verilerin eksikliğinde, eşitlik 21'in alt sınırı F_{12} için sıklıkla kullanılır.

$$-\frac{1}{2}(F_{11}F_{22})^{1/2} \leq F_{12} \leq 0 \quad (21)$$

2. ANALİZ ÇALIŞMALARINA GİRİŞ

2.1. Üç Nokta Eğme Simülasyonu ve Modelin Pilot Deneyle Doğrulanması

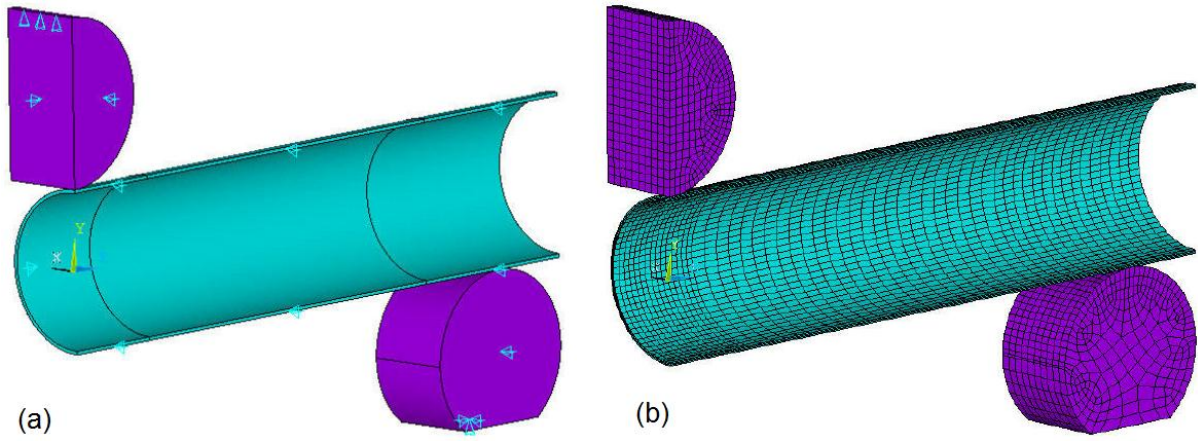
Tüp kesitli kirişin deformasyon davranışını ve dolayısıyla hasar mekanizmasını detaylı bir şekilde incelenmek amacıyla, 6063-T6 alaşımından üretilmiş 50 mm çaplı boru yüzeyinden cidar kalınlığı 1 mm olacak şekilde talaş kaldırılmıştır ($D/t=48$). Bu borudan çekme numunesi çıkartılarak ekstansometre kontrollü çekme deneyleri yapılmış ve deney verileri sonlu eleman modellemesinde kullanılmıştır. Şekil 17'de 6063-T6 malzemeye ait mühendislik ve gerçek çekme eğrileri verilmiştir. Bu bölümde, sonlu eleman modelinin kurgulanmasına ait bilgiler ve modelin doğrulanmasında kullanılan pilot üç nokta eğme deneyi sonuçları incelenmiştir.



Şekil 17. Alüminyum tüp kirişe (6063-T6, $D/t=48/1$ mm) ait mühendislik ve gerçek çekme eğrileri.

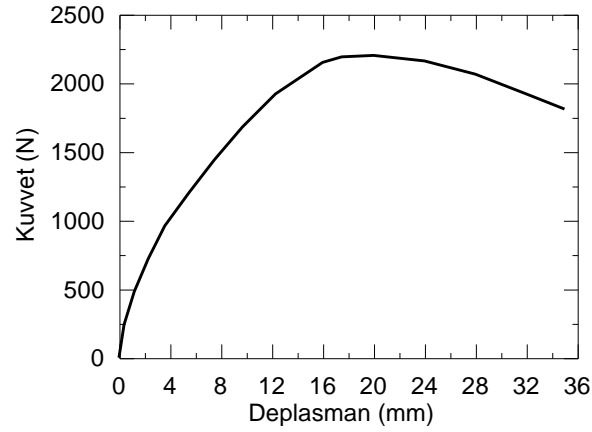
Sonlu elmanlar analizlerinde ANSYS-12.0.1 versiyonu kullanılmıştır. Analizler tam modelin 1/4'ünü oluşturan çeyrek-simetrik model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cidar kalınlığı boyunca gerilme dağılımının detaylı olarak incelenebilmesi için üç eleman kullanılmıştır. Modelde "20 node solid 95 quadratik" tip eleman kullanılmıştır. Mesnet-tüp arasında ve tüp-mandrel arasında kontak tanımlamaları yapılmıştır. Kullanılan kontak elemanı "8 node contact 174" tür. Çelik-alüminyum kontak çifti için yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısı 0,2 olarak alınmıştır. Tüpte yükleme esnasında büyük deformasyonlar söz konusu olduğundan analizde "nonlinear" geometri özelliği açık tutulmuştur. Analizler deplasman kontrollü olup, belirli aralıklarda deplasman adımları küçük tutulmuştur. Deneysel olarak belirlenen en büyük kuvvetin görüldüğü deplasman değerlerinde ve özellikle elastik bölgede ilerleme aralığı daha sık verilmiştir. Bu amaçla makro dosyası oluşturularak çözümler yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde sınır şartları ve elemanlara bölünmüş çeyrek-simetrik modellere ait görüntüler sırasıyla Şekil 18'de verilmiştir.

Tüpün z yönünde yarı simetrikliği, z-yönündeki kesit alanının deplasmanı kısıtlanarak, x yönündeki yarı simetrikliği ise, x-yönündeki kesit alanının deplasmanı kısıtlanarak verilmiştir. Mandrel için de aynı yönlere sınırlamalar söz konusudur. Modelde yarı mesnet için mesnete sadece x-yönündeki kesit alanına deplasman kısıtlaması verilmiştir. Desteğin alt kısmının tüm alanında ise tüm yönlere hareket sınırlandırılmıştır. Mandrelin y-yönünde hareketi mandrel üst çizgisine deplasman verilerek tanımlanmıştır.



Şekil 18. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çeyrek-simetrik model, (a) Sınır şartları gösterilmiş model, (b) Elemanlara bölünmüş model.

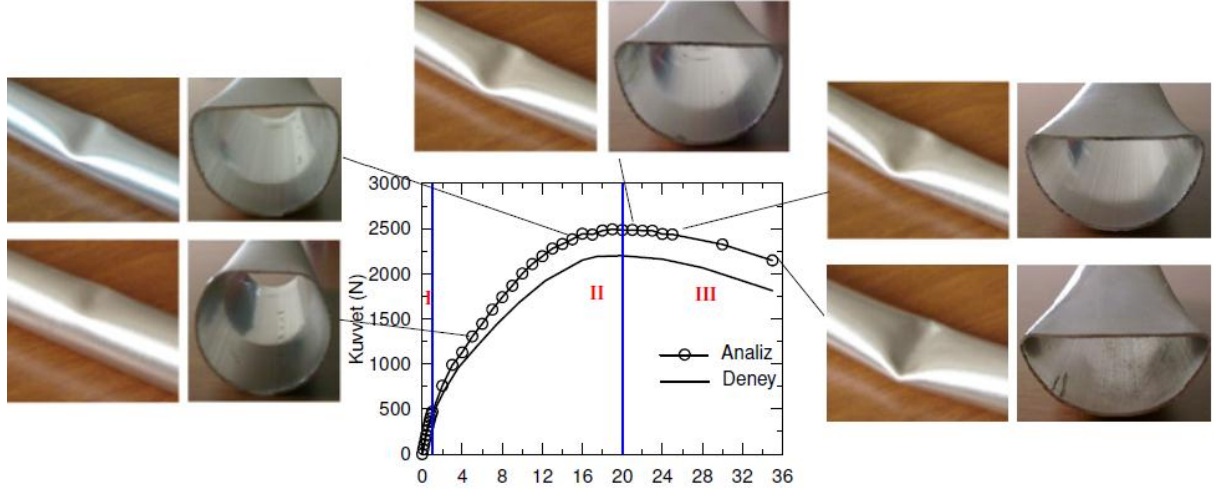
Söz konusu tüpün üç nokta eğme verileri aynı zamanda sonlu elemanlar modellemesinde doğrulama amaçlı kullanılmıştır. ($D/t=48/1$ mm) tüpün kuvvet-deplasman grafiği Şekil 19'da ve farklı deplasman değerlerindeki numunelere ait görünüm Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. ($D/t=48/1$ mm) tüp kirşin kuvvet-deplasman grafiği.

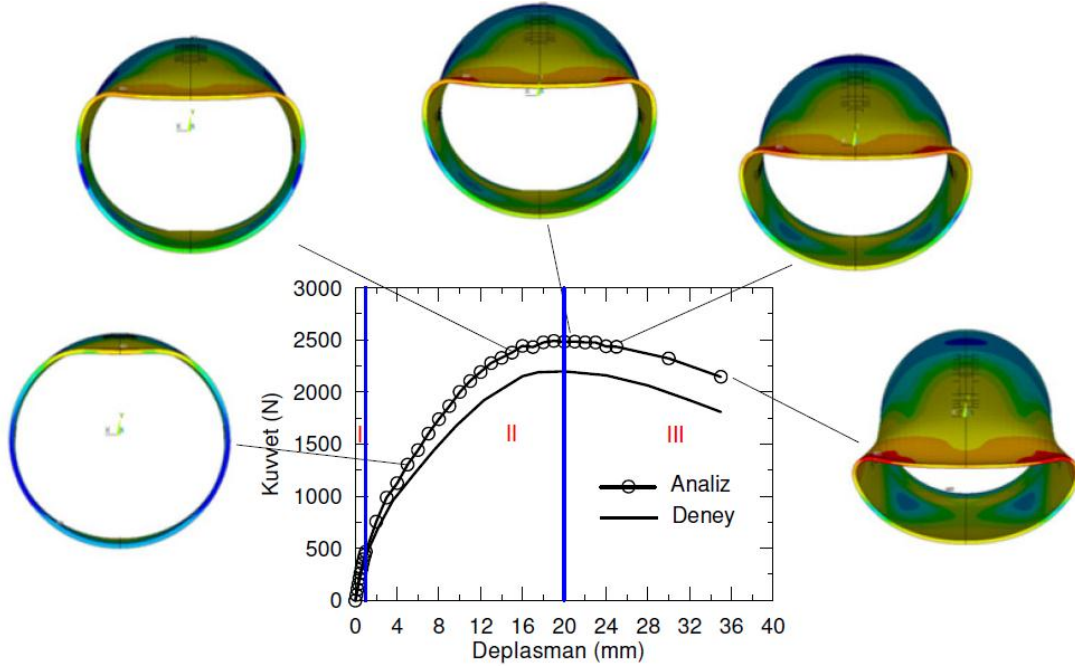


Şekil 20. ($D/t=48/1$ mm) tüp ile yapılmış üç nokta eğme deneyinden sonraki numune görünüşleri: a) 0 mm, b) 5 mm, c) 10 mm, d) 15 mm, e) 21 mm, f) 25 mm, g) 31 mm, h) 35 mm.



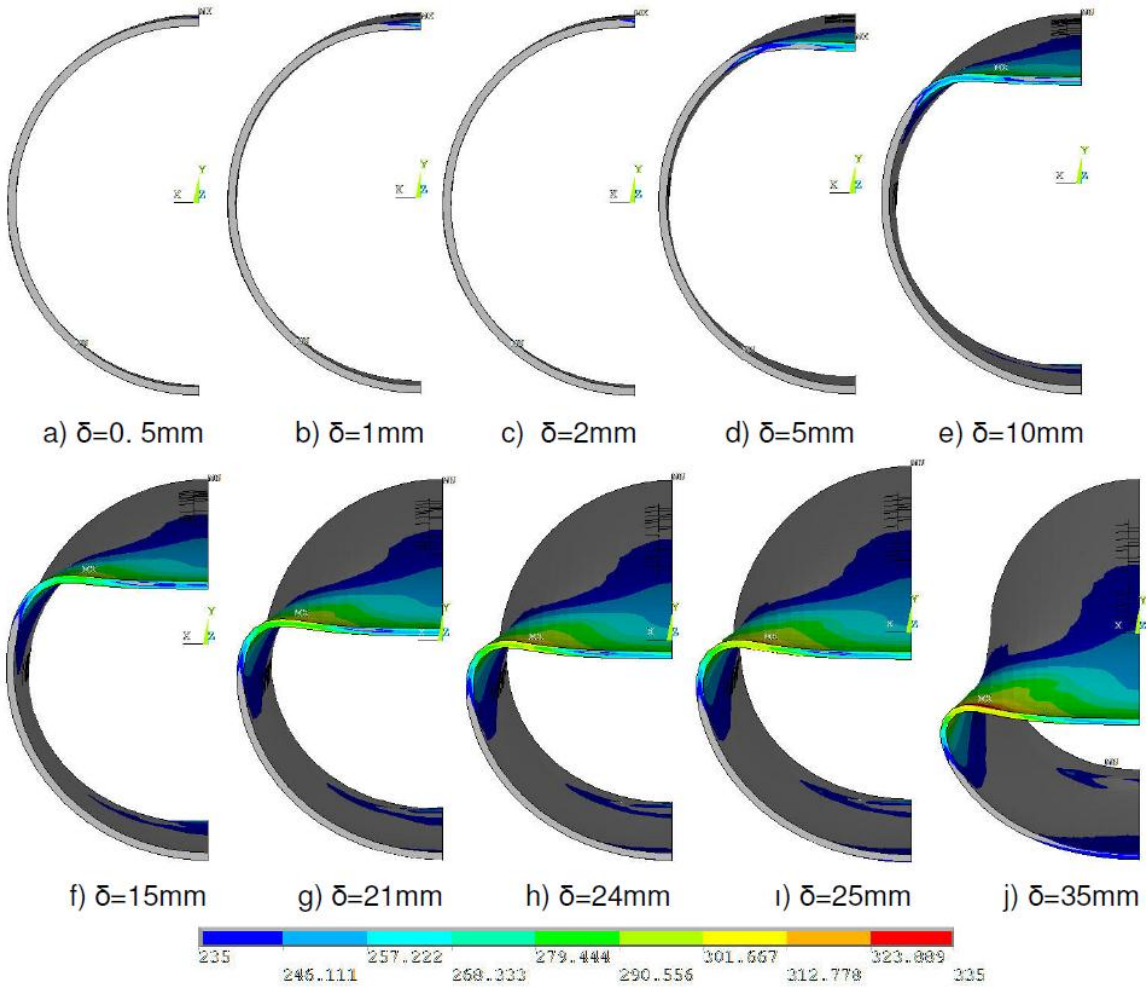
Şekil 21. ($D/t=48/1$ mm) tüpün kuvvet-deplasman grafiği ve beş farklı deplasman için (5, 15, 21, 25 ve 35 mm) tüpün orta kısmının kesit görünümü.

Kuvvet-deplasman grafiğinin ayrıldığı bölgeler ve bu bölgelerdeki tüp geometrileri Şekil 21'de görülmektedir. Eğmeye maruz kalan ince cidarlı kirişlerin plastik deformasyon davranışlarında üç farklı rejim görülmektedir. Şekildeki kuvvet-deplasman grafiği incelendiğinde, başlangıçta kuvvetin deplasmanla orantılı bir şekilde arttığı ve 1 mm'lik deplasmana kadar tam elastik davranış gösterdiği dikkati çekmektedir. Bu deplasman değerine kadar olan kısım I. Bölge olarak işaretlenmiştir. II. Bölgede, kirişin üst cidarında mandrelin temasıyla ovalleşme başlamakta, bunun etkisiyle kuvvet artış hızı azalmaktadır. Dolayısıyla, bu bölgede yük taşıma kabiliyeti bir miktar azalmaktadır. Bu bölgede ovalleşmeyi takiben plastik mafsall oluşumu kendini göstermekte ve bu bölgenin sonunda yapının erişebileceği en büyük kuvvet değerine ulaşılmaktadır. II. Bölgenin sona erdiği deplasman değeri 20 mm'dir. 20 mm'den 35 mm'ye kadar olan kısım ise III. Bölgeye ait olup, maksimum yükten hemen sonra, kirişin plastik mafsall etrafında bükülmesiyle, çökme (kuvvetin aşırı miktarda düşmesi) belirgin bir şekilde görülmektedir. İlerleyen deplasmanlarda tüpün büküldüğü bölgede aşırı şekil değişimi nedeniyle tüp cidarları birbirlerine daha da yaklaşmaktadır.



Şekil 22. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kuvvet-deplasman grafiği.

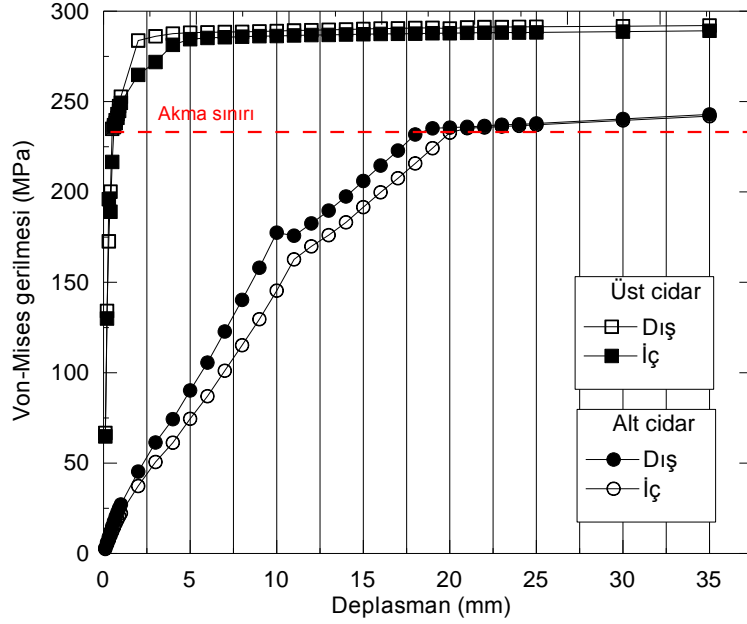
Deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçlarından kuvvet değerleri belirlenmiş ve kuvvet-deplasman değişim grafiği, analize ait bazı karakteristik görünümle birlikte Şekil 22'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi, analiz sonuçlarına göre oluşturulan grafik, deneysel kuvvet-deplasman grafiğine benzer şekilde, küçük deplasmanlarda belirli bir kuvvet değerine yükselmekte ve daha sonra düşme eğilimine girmektedir. Tüpün plastik davranışını detaylı bir şekilde incelemek için, elastik bölgede ve eğrinin karakteristik noktası olan en büyük kuvvet değerinin görülmesinin muhtemel olduğu deplasman değerleri için analizler tekrarlanmış ve daha küçük deplasman aralıklarında çözümlenmeler yapılmıştır. En büyük kuvvet değeri için sonlu eleman sonucu ile deneysel çalışmaya ait sonuç karşılaştırıldığında aralarındaki farkın maksimum %11 olduğu anlaşılmaktadır. Modellemenin büyük deformasyonlar ile temas içermesi ve ayrıca doğrusal olmayan malzeme davranışı gerektirmesinden dolayı, yukarıda belirtilen farkın makul olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, alüminyum tüp yapının sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenen üç nokta eğme davranışının kabul edilebilir bir sapma ile tahmin edilebilir olduğu söylenebilir. Yukarıda verilen doğrulama amaçlı analiz çalışmalarının ışığı altında, parça kesitindeki gerilme dağılımının incelenmesi, hangi aşamalar sonrasında tüp yapının F_{max} değerine ulaşacağı ve bunun hangi deplasmana karşılık geleceği sorularını cevaplamada faydalı olacaktır.



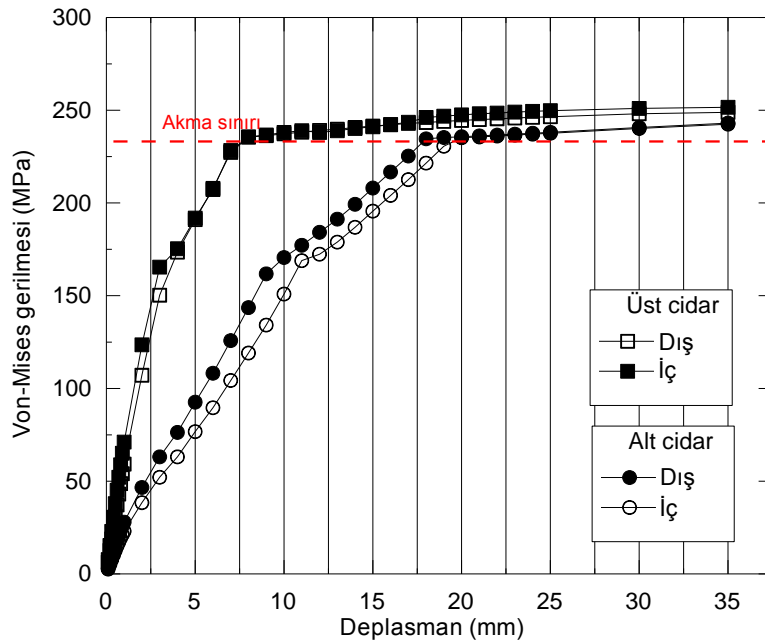
Şekil 23. Sonlu elemanlar analizi ile üç nokta eğme simülasyonu yapılan ($D/t=48/1$ mm) alüminyum tüpün Von-Mises gerilme sonuçları.

Şekil 23'de, tüp kirişin orta noktasında efektif gerilmenin malzemenin akma sınırına ulaştığı deplasman değerleri için analiz sonuçları verilmiştir. 0,5 mm'nin altındaki deplasman değerlerinde parçanın kesitinde akma oluşmamaktadır. Tüp kirişin ortasında alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilmenin

dağılımı Şekil 24'de sunulmuştur. Şekil 23 ve 24 dikkate alınarak aşağıdaki irdelemeler yapılmıştır. 0,5 mm deplasmanda mandrelin temas bölgesinde lokal deformasyon sebebiyle üst cidarın, iç ve dış yüzeylerindeki gerilmeler akma sınırına ulaşmıştır. Diğer taraftan, mandrel ile temas etmeyen kısımlarda gerilme akma sınırını aşmamaktadır. Bu, plastik deformasyonun sadece mandrel temas bölgesiyle sınırlı olduğuna işaret etmektedir. Şekil 25'de, parçada mandrel temasının olmadığı en yakın mesafede, üst ve alt cidarların dış ve iç yüzeylerindeki gerilmenin deplasmanla değişimi verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı gibi akmanın çok daha büyük deplasmanda (10 mm'de, üst cidarda) oluşması deformasyonun mandrel temas alanında gerçekleştiğini destekleyen önemli bir bulgudur.



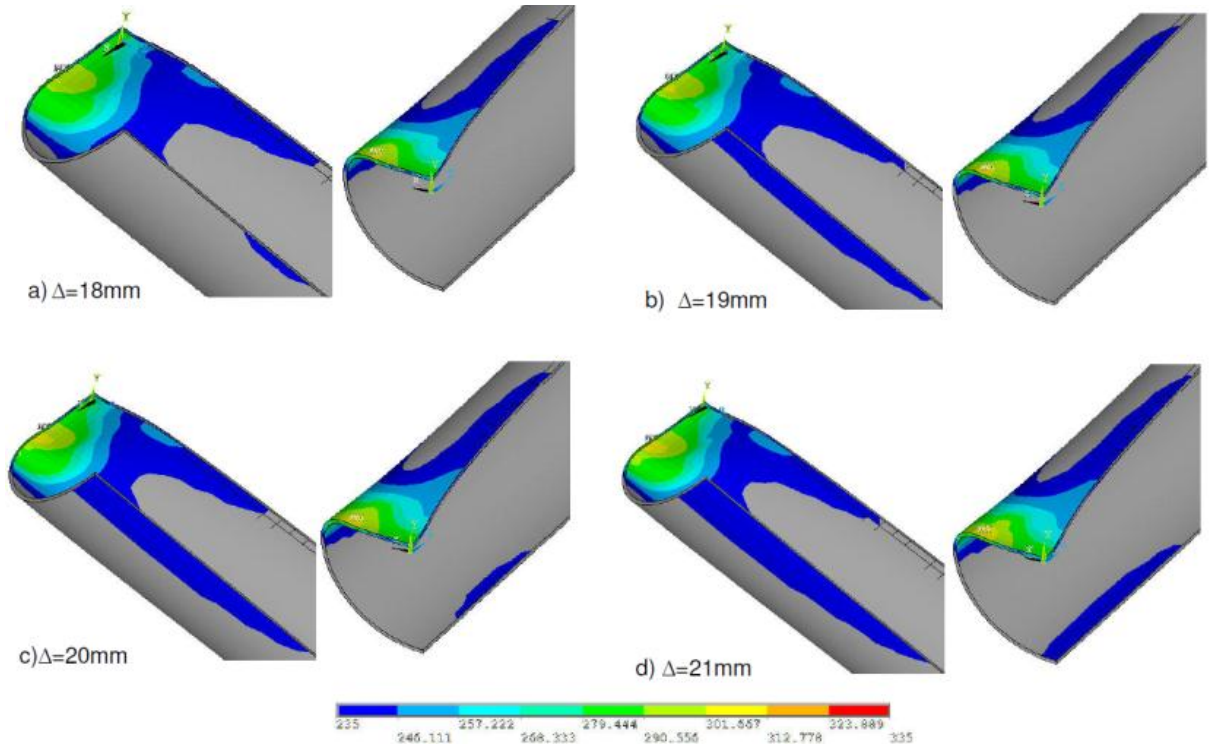
Şekil 24. Tüp kirişin ortasında alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı.



Şekil 25. Tüp kirişin ortasında mandrel temas bölgesine en yakın mesafedeki alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı.

Lokal plastik deformasyona rağmen, yaklaşık 1 mm deplasmana kadar, kirişin genel davranışı elastiktir. Şekil 21'de, I. Bölge elastik kısmı kapsamaktadır. 1 mm deplasmandan sonra elastik davranış sona ermekte ve deplasmana bağlı olarak yükteki artış hızı azalmaktadır. Bu deplasman değerinde, parça yüzeyinde ovalleşme kendini göstermeye başlamaktadır. 5, 10 ve 15 mm deplasmanlarda kirişin ovalleşen kısmı büyük miktarda artmış ve cidarda artan gerilmenin konumu kiriş orta noktasından yan cidarlara doğru kaymaya başlamıştır.

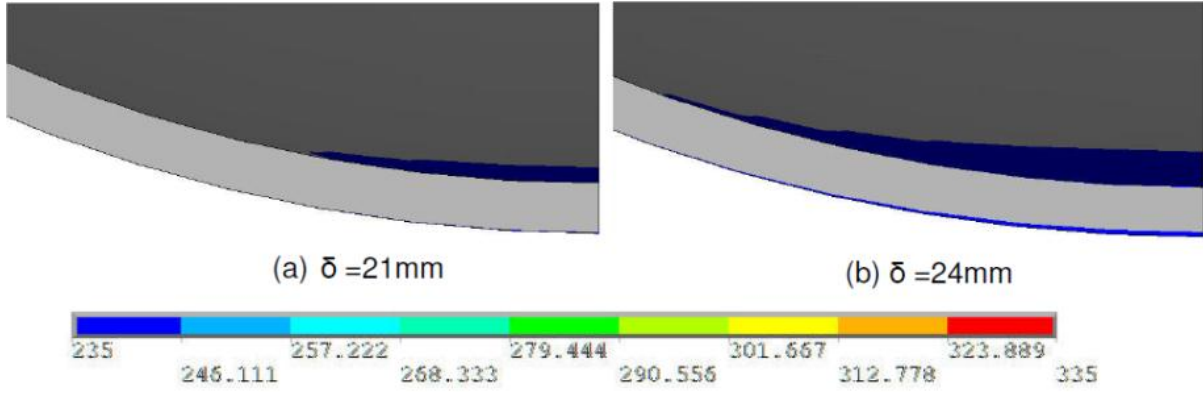
Şekil 25'de; 18, 19, 20 ve 21 mm deplasman değerlerinde, alt cidarın iç ve dış yüzeyindeki gerilme değişimini gösteren gerilme dağılımları görülmektedir. Burada gerilme aralığının alt değeri akma sınırı olarak ayarlanmıştır (235 MPa). Şekil 26.a'da görüldüğü gibi, 18 mm deplasmanda tüp kiriş orta noktasından bir miktar uzakta alt cidarın dış yüzeyinde akma başlamış, 19 mm deplasmanda ise akma alanı genişleyerek orta noktaya ulaşmıştır. Eğme kuvveti 19 mm deplasmanda en büyük değerini almaktadır. Bu deplasmandan sonra akma alanları genişlemektedir. Alt cidarın iç yüzeyinde ise ilk akma 20 mm deplasmanda kirişin orta noktasından bir miktar uzakta gelişmektedir. 21 mm deplasmanda ise oluşan akma alanı eğilmenin etkisiyle genişleyerek kiriş orta noktasında kadar ilerlemiştir. Bu deplasmanda alt cidarın her iki yüzeyinde (iç ve dış) akma oluşmaktadır. Yukarıda sözü edildiği gibi deneysel verilerde de en büyük kuvvet yaklaşık olarak 19 mm deplasmanda tespit edilmiştir. Buradan, deplasman kiriş çapının %40'ına ulaştığında maksimum kuvvetin elde edildiği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 26. Farklı deplasman değeri için alt cidarın iç ve dış yüzeyindeki gerilme dağılımları.

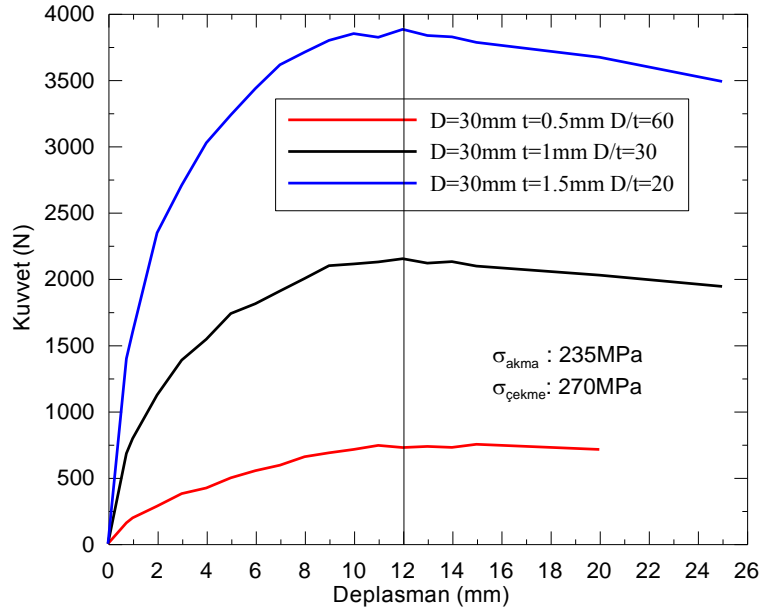
Şekil 26.a'da, 21 mm deplasman değeri için, alt cidardaki gerilme dağılımı incelendiğinde iç ve dış yüzeylerin her ikisinde gerilmenin akma sınırına ulaşmasına karşın, cidar kalınlığı boyunca önemli oranda akma oluşmadığı görülmektedir. Şekil 22'deki kuvvet deplasman eğrisindeki görüldüğü gibi, 19-23 mm deplasman aralığında kuvvet sabit kalmakta, ancak alt cidar kalınlığının yaklaşık %11'i aktıktan sonra (24 mm deplasman) kuvvet düşmeye başlamaktadır. Şekil 27'de, 21 ve 24 mm deplasmanlarda akma alanının cidar kalınlığı boyunca genişlediği görülmektedir. Bu sonuçlardan, bükülme olayının kirişin alt cidarındaki akma miktarıyla yakından ilişkili olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 23.h-j'de, ilerleyen deplasmanlarda tüp kirişin öncelikli olarak üst cidar, sonrada alt cidarlarda akma alanları genişlemekte, $\Delta=35$ mm için üst cidarın, hem dış hem iç kısımlarda akma alanı genişleyerek

cidar kalınlık boyunca birleştii, sadece lokal olarak yan cidarda akmayan bölgenin varlığı gözlenmektedir.



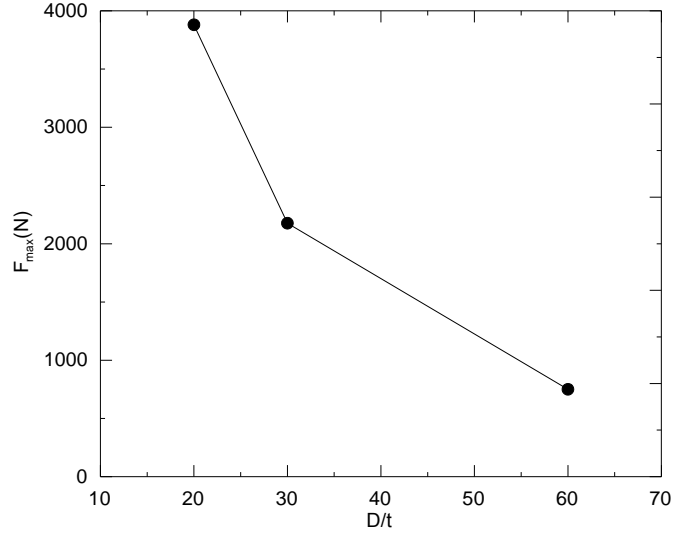
Şekil 27. Tüp kirişin alt cidarındaki akma alanlarını gösteren gerilme dağılımı.

DeneySEL veriler ve malzeme özellikleri dikkate alınarak doğrulaması gerçekleştirilen üç nokta eğme sonlu elemanlar modeli, 30 mm çapında ve farklı cidar kalınlıklarındaki tüpler için kullanılmış ve kuvvet-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Bu şekilde, bükülme deplasmanı ve kuvvetinin, parça büyüklüğü ve cidar kalınlığı ile olan ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 28'de görüldüğü gibi azalan cidar kalınlığıyla yük taşıma kabiliyeti ve kirişin rijitliği düşmekte, ancak maksimum yükün görüldüğü bükülme deplasman değeri değişmemektedir. Cidar kalınlığının ince olduğu yüksek D/t oranları için taşınan kuvvetin azalması beklenen bir durumdur (Şekil 29).

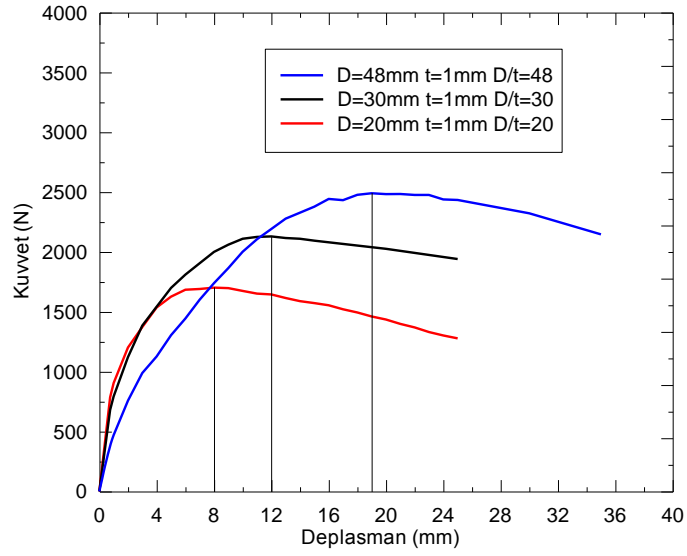


Şekil 28. 30 mm çapında ve farklı cidar kalınlıklarındaki tüp kirişlerin kuvvet deplasman grafikleri.

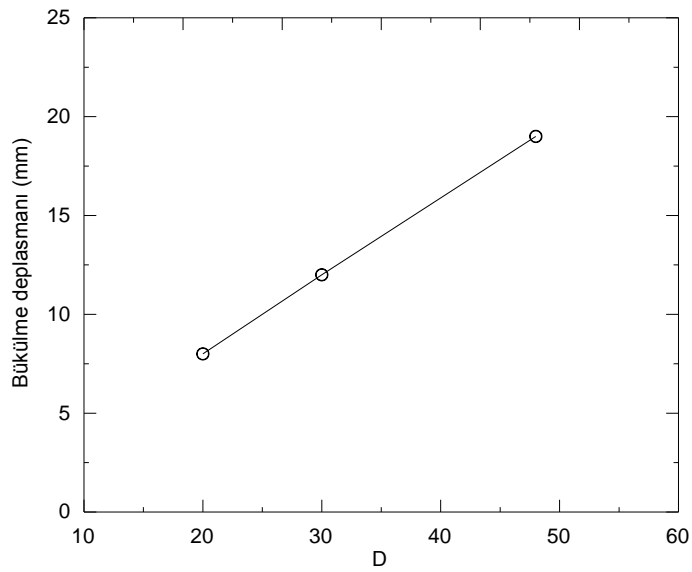
Şekil 30'da ise aynı cidar kalınlığında ancak farklı çaplardaki tüp kirişlerin sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri görülmektedir. Bu şekilden, bükülme deplasmanının parçanın çapıyla değiştiği, büyük çaplı parçalarda deplasman değerinin de arttığı sonucuna varılmaktadır. Diğer bir sonuç yük taşıma kabiliyeti ve tüpün rijitliğinin de tüp çapıyla orantılı olarak artmasıdır. Bükülme deplasmanlarının çapla değişimi incelendiğinde aralarında doğrusal karakterde bir ilişkinin bulunduğu anlaşılmaktadır (Şekil 31).



Şekil 29. 30 mm çapında ve farklı cidar kalınlıklarındaki tüp kirişlerin D/t oranına bağlı F_{max} eğrisi.

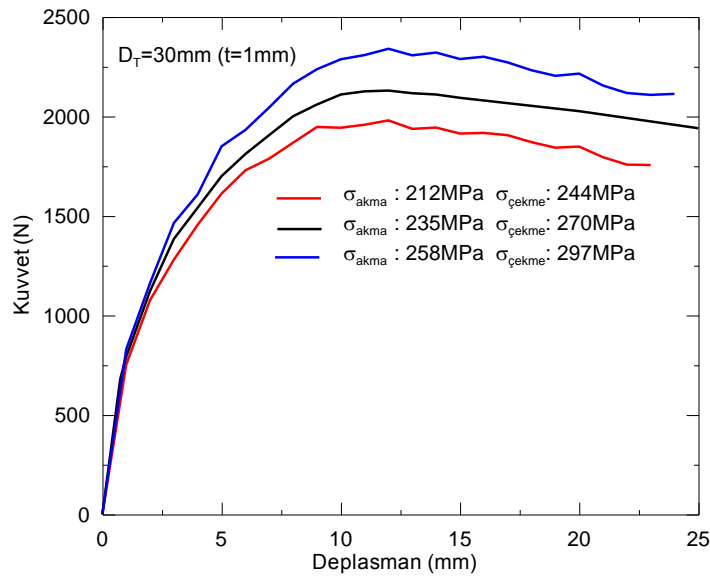


Şekil 30. Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

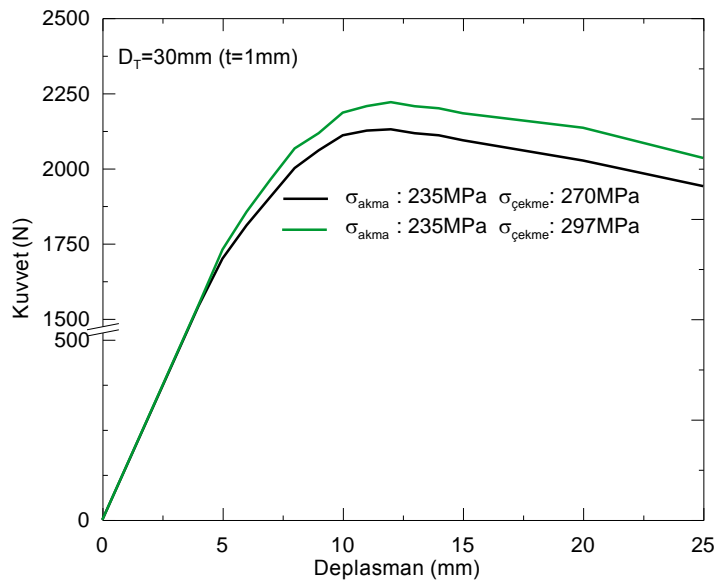


Şekil 31. Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp kirişlerin çapa bağlı bükülme deplasman eğrisi.

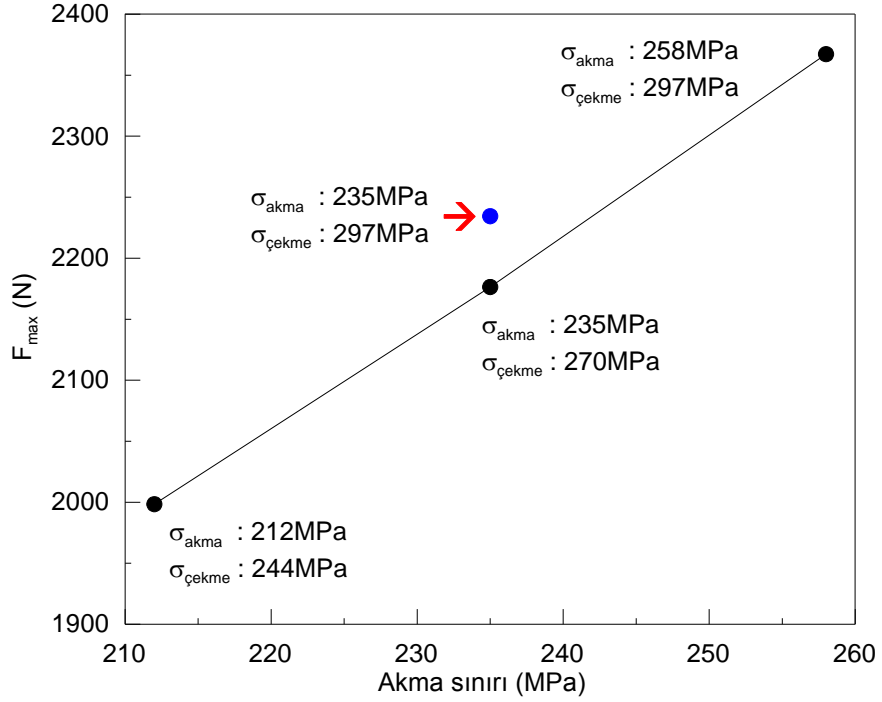
Tüp kiriş malzemesinin mekanik özelliklerinin kuvvet-deplasman eğrisine olan etkisini incelemek amacıyla, sırasıyla 265 ve 270 MPa olan akma ve çekme dayanım değerlerinin \pm %10 değiştirildiği durumlar için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca akma sonrası pekleşmenin etkisini gözlemlemek için akma sınırı sabit tutularak (235 MPa) çekme dayanımı artırılmış (297 MPa) yapının analizleri yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 32 ve 33'de verilmiştir. Mekanik özelliği yüksek olan her iki tüpün de, beklendiği gibi, yük taşıma kabiliyeti artmıştır. Diğer taraftan, pekleşme oranı yüksek olan kirişin yük taşıma kabiliyetinin arttığı görülmektedir (Şekil 34). Her iki tüp yapıda, 1600 N'luk taşıma kuvveti civarında, lokal deformasyon etkisini göstermektedir. Ancak, pekleşme davranışı yüksek olan tüp yapının malzeme davranışı açısından deformasyona karşı gösterdiği direnç diğerine göre daha fazla olduğundan artan deplasmanla daha büyük kuvvetlere ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 34'de tüp kiriş malzemesinin akma ve çekme dayanım değerlerinin \pm %10 değiştirildiği durumlar için en büyük kuvvetin akma sınırıyla olan doğrusal değişimi görülmektedir. Bu grafikte, ayrıca pekleşme davranışı fazla olan (akma sınırı aynı ancak çekmesi fazla) malzemeye ait tüp yapının taşıyabileceği maksimum kuvvet değeri de işaretlenmiştir.



Şekil 32. Tüp kiriş malzemesinin akma ve çekme dayanımlarının \pm %10 değiştirildiği durumlar için kuvvet-deplasman eğrileri.

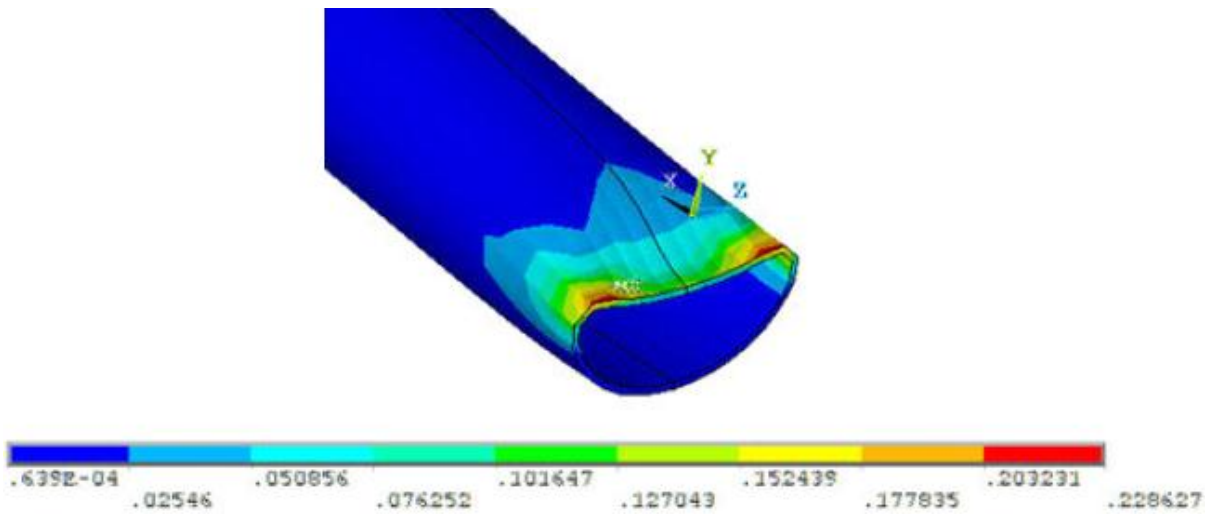


Şekil 33. Akma dayanımı aynı, çekme dayanımı %10 artırılmış malzemenin kuvvet-deplasman eğrisi.



Şekil 34. Mekanik özellikleri farklı malzemelerdeki tüp kirişlerin akma dayanımına bağlı F_{max} değişimi.

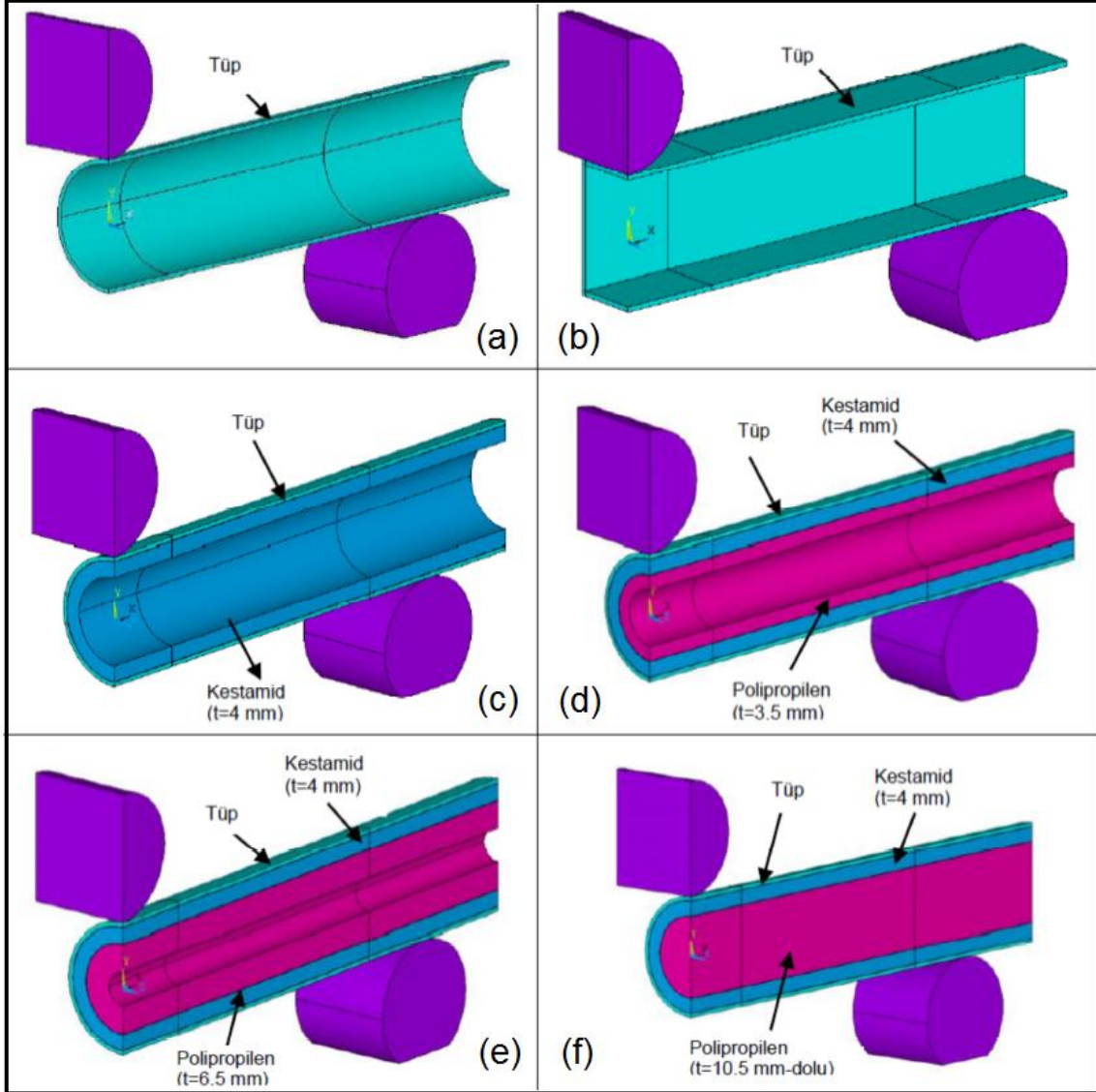
Takviyesiz boş tüp yapılarında, malzemenin deformasyon kabiliyeti izin verdiği sürece artan deplasmanla mandrelin temas bölgesi ve civarında şekil değişimi artmaktadır. Özellikle sert alüminyum tüp numunelerde, deney esnasında tüp yapının yan kısımlarda, metalin sünekliliği ile ilişkili olarak erken yırtılma görülebilmektedir. Bu hasar mekanizması literatürde araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir. Şekil 33'de, D/t:30/1 mm'lik tüp yapıya ait birim şekil değişimi dağılımı incelendiğinde, literatürde belirtilen ve aynı zamanda bu raporun deney sonuçları kısmında da görülen yırtılmanın yeri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak, bu hasarın, şekil değişiminin en fazla olduğu yerde yoğunlaşması beklenen bir durum olmakla birlikte, asıl belirleyici faktörün malzemenin sünekliliği olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 35. D/t:30/1 mm'lik tüp yapıya ait birim şekil değişimi dağılımı.

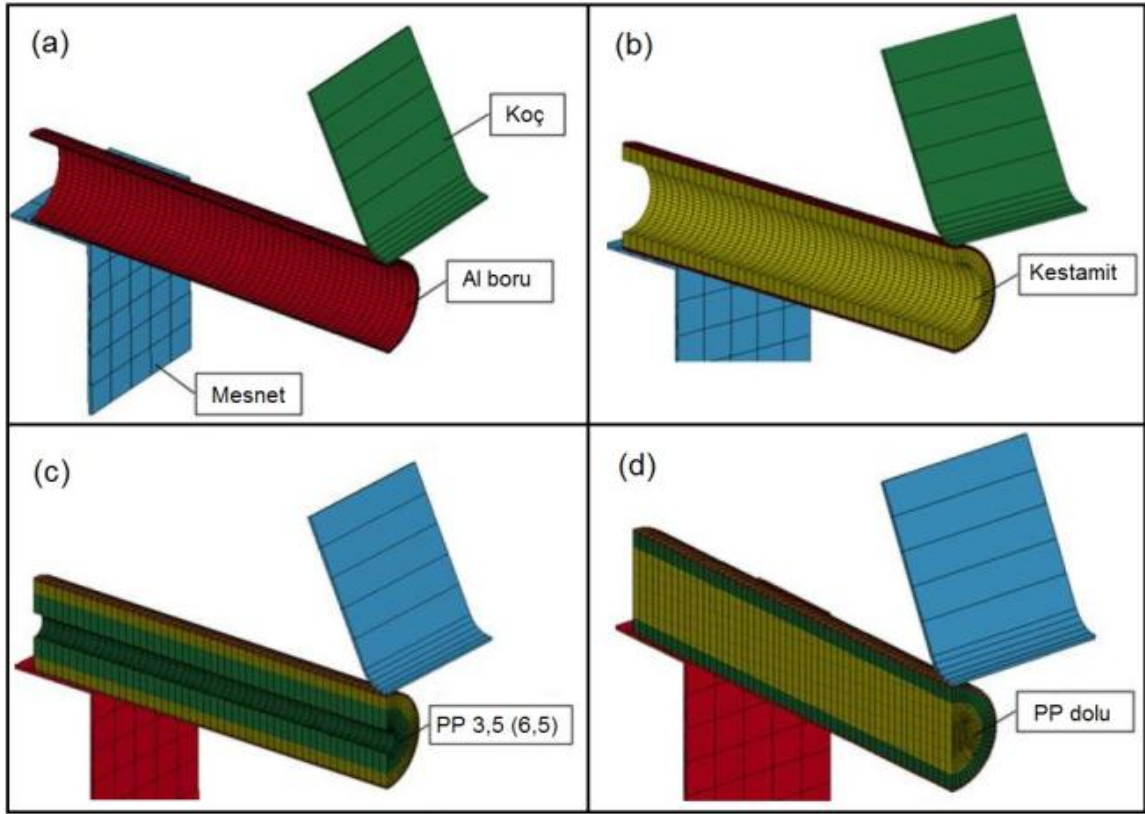
2.2. Üç Nokta Eğme ve Darbe Deneyleri İçin Sonlu Eleman Modelleri

Daire ve kare kesitli boş kirişlerin ve içten takviyeli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyleri için sonlu eleman analiz modelleri Şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 36. Sonlu eleman analiz modelleri (a) Daire kesitli boş kiriş ($\varnothing 31$), (b) Kare kesitli boş kiriş, (c-f) İçten takviyeli kompozit kirişler.

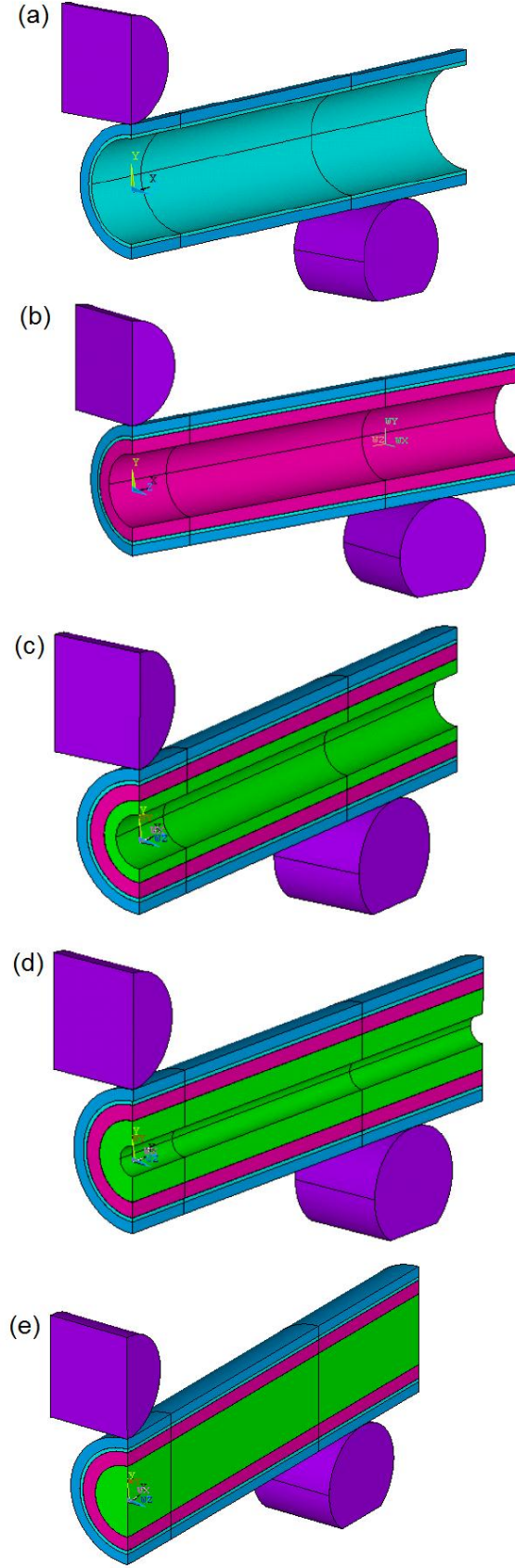
Darbe deneyleri için deneysel çalışmayı simülasyon ortamında tanımlayabilmek amacıyla, dış çapı 31 ve cidar kalınlığı 1 mm olan alüminyum borunun analizler için hazırlanan CAD modelleri Şekil 37'de verilmiştir. Modelleme geometrisi ve kompozit kombinasyonları T, T+K(4), T+K(4)+PP(3,5), T+K(4)+PP(6,5), T+K(4)+PP(dolu) şeklindedir. Çalışmanın sonunda yapılacak karşılaştırmada da doğal olarak simülasyonu gerçekleştirilen bu beş kombinasyon ait deney verileri kullanılacaktır. Tam model için ise boru boyu 270 mm ve mesnet aralığı da 225 mm olarak tüm test ve simülasyon koşullarında aynı alınmıştır. Simülasyonda kullanılan tüm modeller için mesnet ve koçun basitleştirilmiş hali çizilmiştir. Birinci modelde sadece boş Al borunun (T) modeli yapılmıştır. İkinci modelde, 4 mm cidar kalınlığına sahip kestamid (K) takviyeli kombinasyonun modeli yapılmıştır. Üçüncü ve dördüncü modellerde, ikinci modelin iç kısmına 3,5 mm (ve daha sonra 6,5 mm) cidar kalınlığında polipropilen (PP) takviyesi yapılarak elde edilen modeller oluşturulmuştur. Son modelde ise, iç kısımda tam dolu PP takviyesinin kullanıldığı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 37. Darbe simülasyonunda kullanılan modeller.

2.3. Hasar Kriteri Analizleri

Bu bölümde, dışarıdan cam elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sonlu eleman analizleri Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak yapılmıştır. İçeriden kestamit/polipropilen ve dışarıdan cam elyaf takviye edilmiş 31 mm çaplı kompozit kiriş kombinasyonları için kullanılan sonlu eleman modelleri Şekil 38'de verilmiştir. Ansys kullanılarak yapılan analizlerde, cam elyaf takviyeli epoksi malzemenin özellikleri lineer ortotropik malzeme olarak dikkate alınmıştır. Tsai-Wu kriterinin de içerdiği çekme, basma ve kayma dayanımı gibi malzeme özellikleri tanımlanmıştır.



Şekil 38. Dışarıdan cam elyaf takviyeli 31 mm çaplı kompozit kiriş kombinasyonlarının, Tsai-Wu hasar kriteri uygulanarak üç nokta eğme davranışının incelenmesinde kullanılan, sonlu eleman modelleri: (a) CE+T, (b) CE+T+K(4), (c) CE+T+K(4)+PP(3,5), (d) CE+T+K(4)+PP(6,5), (e) CE+T+K(4)+PP(dolu).

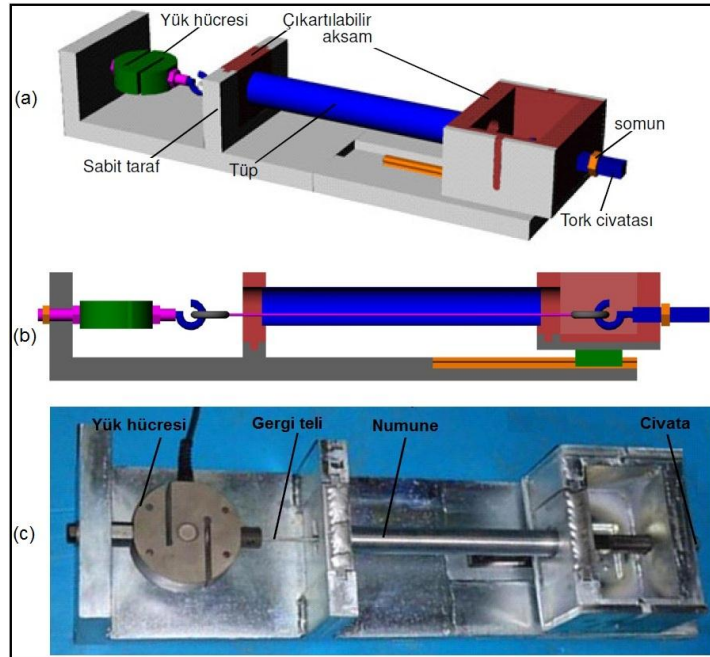
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR GİRİŞ

3.1. Deney Düzeneklerinin Tasarım ve İmalat Çalışmaları

3.1.1. Ön Gerilme Aparatı

Tüp kirişe ön gerilmenin verilebilmesi için Şekil 39'daki aparat tasarlanmıştır. Burada, yük hücresi ile somun arasında yer alan çelik teller vasıtasıyla tüp gövdesine basma yükü uygulanmaktadır. Borunun bir tarafı ana kaide üzerine sabitlenmiş olan kısma (kapak üzerine) yerleştirilir, borunun içerisinden geçen çelik gerdirmeli (Ø 6 mm), düzeneğin diğer ucundaki tork civatasına bağlanır. Burada telin boşluğu alınacak şekilde tork anahtarı kullanılarak civata sıkılır ve daha sonra yük hücresinde istenilen kuvvet değeri okununcaya kadar civata hareketi devam ettirilir. Yük hücresinde istenilen kuvvetin hangi moment değerinde sağlandığını belirlemek için tork anahtarı kullanılması planlanmıştır. Verilen bir tüp çapı, öngörülen kuvvet ve dolayısıyla kesitteki ön gerilme için tork anahtarında okunması gereken bir moment değeri söz konusudur.

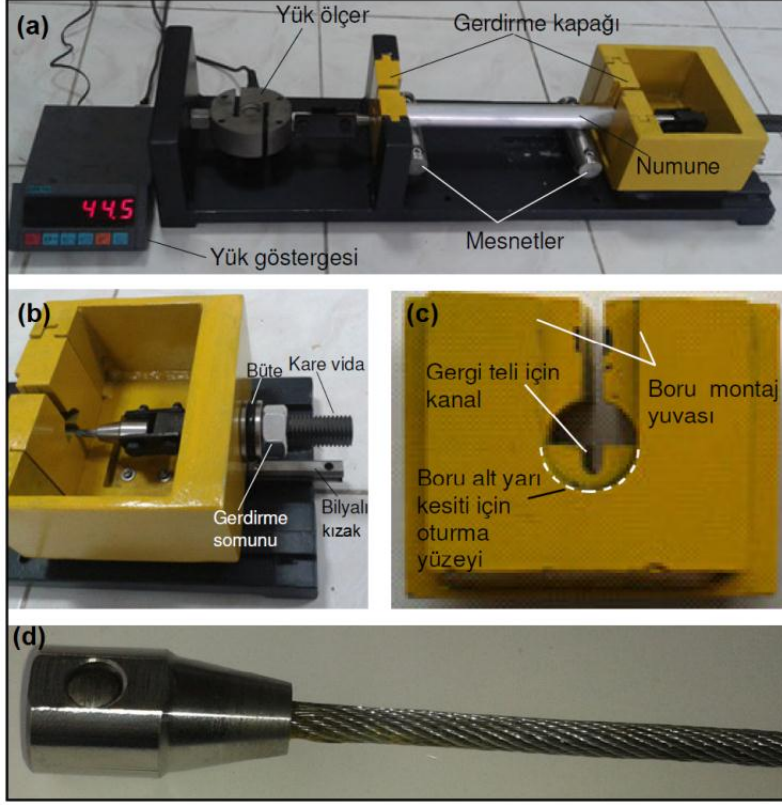
Kuvvet-moment değişim grafiğinin elde edilmesinden sonra ön gerilme verilmiş tüpe üç nokta eğme testi yapılabilmesi için tüpün üzerindeki kuvvetin korunacak şekilde taşınabilir olması gereklidir. Bunun için, yük hücresi kullanmaksızın bir ucundan sabitlenen tüp diğer ucundan civata-somun bağlantısıyla istenilen tork değerine sıkıştırılacak, sonra şase üzerinde resimde kahverengi ile gösterilen sökülebilen kapaklarla birlikte ayrılarak üç nokta eğme test düzeneğine taşınacaktır.



Şekil 39. (a) Ön gerdirmeli aparat tasarımı, (b) Yarı kesit görünüm, (c) İmalatı yapılmış ön gerdirmeli düzeneği.

Ön gerilme tertibatındaki ilk denemelerde, somun altı sürtünmesi ve kızak sisteminin yeterince düzgün çalışmaması nedeniyle, parça aşınması ve deney sonuçlarını etkileyecek kararsızlıklar görülmüştür. Ön gerilmenin sisteme düzgün bir şekilde verilebilmesi için sertleştirilmiş kare civata kullanımına gidilmiştir. Vida tahriki ile sıkıştırılan boru alın kısmının düzlemselliğini koruyabilmesi için bilye üzerinde yuvarlanan kızak kullanılmıştır. Ayrıca, somun altına aksenal yükte çalışan bilyeli yatak (büte) montajı gerçekleştirilmiştir. Şekil 40.a'da aparatın yükleme başlangıç safhasına ait (44,5 kg-f'lik kuvvet etkisinde) bir resim

görülmektedir. İlave edilen bütenin sağladığı avantaj nedeniyle 80 kg-f'lik yüke kadar herhangi bir el aleti kullanmaksızın vida sıkılabilmekte, el aleti kullanılması durumunda ise çelik tel-kafa bağlantısının izin verdiği ölçüde sorunsuzca yüksek değerlere çıkılabilmektedir. Denemelerde 1400 kg-f değerinin başarıyla aşıldığı görülmüştür. Şekil 40.b'de ise, ön yüklemenin verildiği bağlantı detayı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 14c ve d'de sırasıyla boru yataklaması için gerdirme kapakları ile gerdirme işleminde kullanılan çelik örgü tel-konik kafa bağlantısı görülmektedir. Bu düzenek, Şekil 41'de görüldüğü gibi, komple üç nokta eğme test cihazına ait platforma yerleştirilerek burada numuneye eğme yükü uygulanmaktadır.



Şekil 40. Revize edilmiş ön gerilme aparatı: (a) Genel görünüm, (b) Tahrik tarafına ait detay görünüm, (c) Boru yataklamasının yapıldığı gerdirme kapakları, (d) Gerdirme işleminde kullanılan 6 mm çaplı çelik örgü tel ve konik kafa.

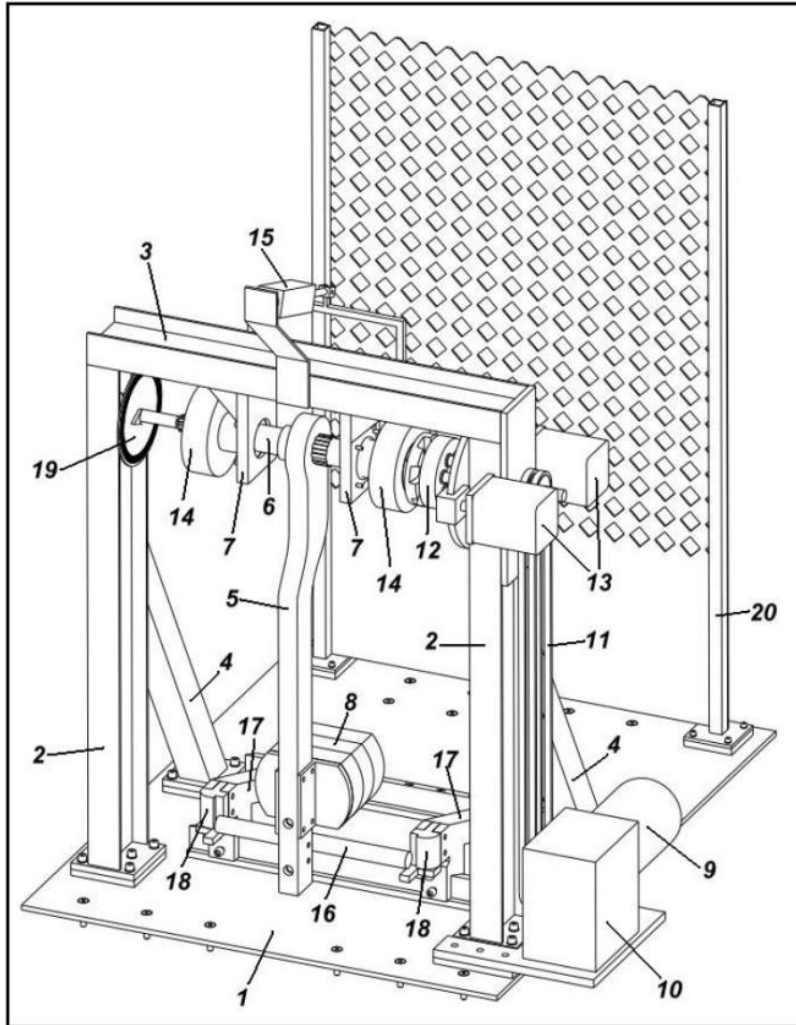


Şekil 41. Ön gerilme düzeneğiyle üç nokta eğme test cihazı üzerinde deneyin yapılması.

3.1.2. Darbe Deneş Düzeneği

Ağırlık düşürme esasına dayalı olarak çalışan darbe test düzeneşlerinin küçük kapasiteli (15-25 kg) olarak ülkemizde Dumlupınar Üniversitesi ve Selçuk Üniversitesi bünyesinde imal edildiği öğrenilmiş ve yapılan görüşmelerden, kullanılan sensörlerin kalibrasyonu konusunda bir takım sorunlarla karşılaşıldığı ve cihazın beklenen çalışma ömründen çok daha kısa sürede sağlıklı deney yapılamayacak duruma geldiği anlaşılmıştır. Konuyla ilgili olarak, TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü kuvvet laboratuvarı yetkilileriyle görüşülmüş ve enstitünün piezo elektrik sensörler ile ilgili bir hizmetinin olmadığı bilgisine ulaşılmıştır.

Proje kapsamında kullanılacak yüklerin yukarıda sözü edilenlerden çok daha yüksek olması ve yukarıda belirtilen problemler dikkate alınarak, ağırlık düşürme prensibi yerine sarkaç düzeneğine dayalı bir tasarım yapılmıştır (Şekil 42). Sarkaç tarzı uygulamaların tampon ve ticari araçlarda kabin çarpışma testlerinde kullanıldığı bilinmektedir. Tasarımı ve imalatı proje çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen düzenekte, kullanılan ağırlık ve yüksekliğin sağladığı enerji oldukça yüksek olup, sarkaç kolunun sahip olduğu enerjinin bir kısmı çarpma sırasında parçada belirli miktarda deformasyonun oluşmasında harcanmaktadır. Deformasyonun kontrollü olması, çubuğun belirli bir açıda bükülmesi çarpmada yapı için harcanan enerjinin hesaplanabilir olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 42. Sarkaç tipi darbe test düzeneği bileşenleri: alt tabla (1), kolonlar (2), kiriş (3), kolon destek profilleri (4), sarkaç kol (5), ana mil (6), askı plakaları (7), ağırlıklar (8), elektrik motoru (9), redüktör (10), zincir-dişli mekanizması (11), mekanik tutucu (12), pnömatrik silindirler (13), disk fren (14), pnömatrik fren silindiri (15), test numunesi (16), kayar mesnetler (17), destek parçaları (18), mekanik gösterge (19), perde (20).

Genel görünüşü Şekil 43'de verilen deney düzeneğinde, 224 kg kütleli sarkaç kol yerden 2,3 m yükseklikten serbest bırakılmakta (ağırlık merkezinin yerden yüksekliği 1,326 m), çarpmanın etkisiyle (çarpma enerjisi: 2970 J) eğilen parçayla birlikte mesnet aralığından geçerek, geride kalan enerjisini yer çekimine karşı harcamaktadır. Nihai olarak eriştiği yükseklik doğrudan mekanik gösterge üzerinden okunmaktadır. Dolayısıyla farklı çap ve takviye durumundaki numunelerin ön görülen mesnet aralığındaki deformasyonu için harcanan enerji kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Mesnet aralığının ayarlanabilir yapıda olması farklı mesnet aralığı değerleri için deney planı yapılmasına imkan vermektedir. Geliştirilen darbe test cihazı için Türk Patent Enstitüsü'ne patent başvurusunda bulunulmuştur.



Şekil 43. İmalatı gerçekleştirilen sarkaç tipi darbe test düzeneğinin genel görünüşü: (a) Sarkaç nötr konumda, (b) Sarkaç çalışma yüksekliğinde.

Mesnet aralığı ve genişliği o şekilde tasarlanmıştır ki sarkaç çarptığında eğilen numune sarkaç koçuyla birlikte bu aralıktan kolayca geçebilmektedir. Dolayısıyla malzemeden bağımsız, sadece geometriksel olarak, verilen bir çap ve boy için deformasyonla oluşan eğilme miktarı sabittir. Düzenekte, her bir numune için oluşturulan deformasyon miktarı aynı, ancak deformasyon için harcanan enerji miktarları farklı olduğundan farklı takviye unsurlarına sahip numunelerin kendi aralarında rasyonel olarak kıyaslanmasına imkan sağlamaktadır. Geliştirilen test düzeneği, düşen ağırlık prensibiyle çalışan düzeneğe göre şu üstünlüklere sahiptir: Düzenek çok daha ucuza imal edilebilmektedir. Deformasyon için harcanan büyüklükler kolayca ölçülebilmektedir. Zamanla deney sağlığı açısından sorun oluşturabilecek herhangi bir kararsızlık söz konusu değildir. Çarpışma tek vuruşlu gerçekleşmekte, düşen ağırlık düzeneğinde (drop-weight test) ağırlığın havada yakalanması (rebound) için zorunlu ve bulunması son derece önemli olan kontrol aksamlarına gerek yoktur. İstenilen her çap ve boy için deney yapılabilir. Ağırlığın 500 kg'a kadar artırılması durumunda parçaya uygulanabilecek çarpma enerjisi 6600J'ün üzerine çıkabilmektedir. Çok sık ve hassas kalibrasyon işlemlerine ihtiyaç yoktur.

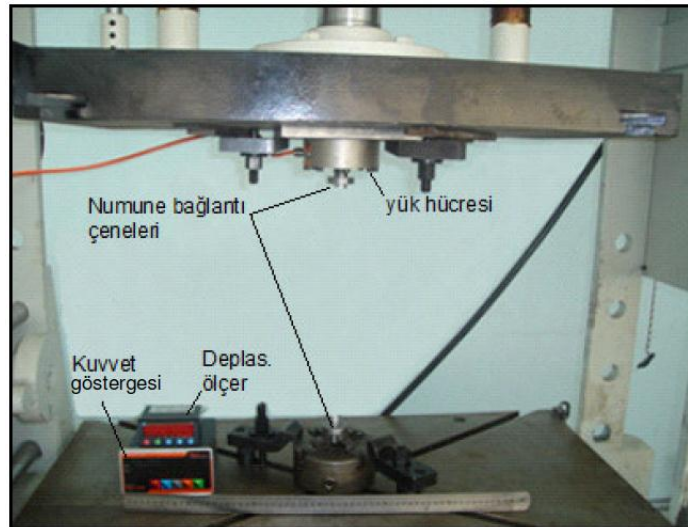
Cihazın imalat sonrasında farklı çap ve boylar (dolayısıyla mesnet aralığı değiştirilmiş) için çelik borularla deneyler tekrarlanmış ölçme hassasiyeti etkileyebilecek bütün durumlar göz önüne alınmıştır. Şekil 44'de ön denemelerde kullanılan farklı çap (25, 32, 45 mm) ve boydaki (400, 350, 270 mm) çelik boruların deney sonrası genel görünümü verilmiştir. Özdeş borularla yapılan deneylerde verilen bir mesnet aralığı için bükülme açısının aynı olduğu tespit edilmiştir ki bu, düzeneğin istenen miktarda deformasyonu tekrarlanabilir olarak sağladığının bir göstergesidir.



Şekil 44. Ön denemelerde kullanılan darbe deney numuneleri.

3.1.3. Burkulma Deney Düzeneği

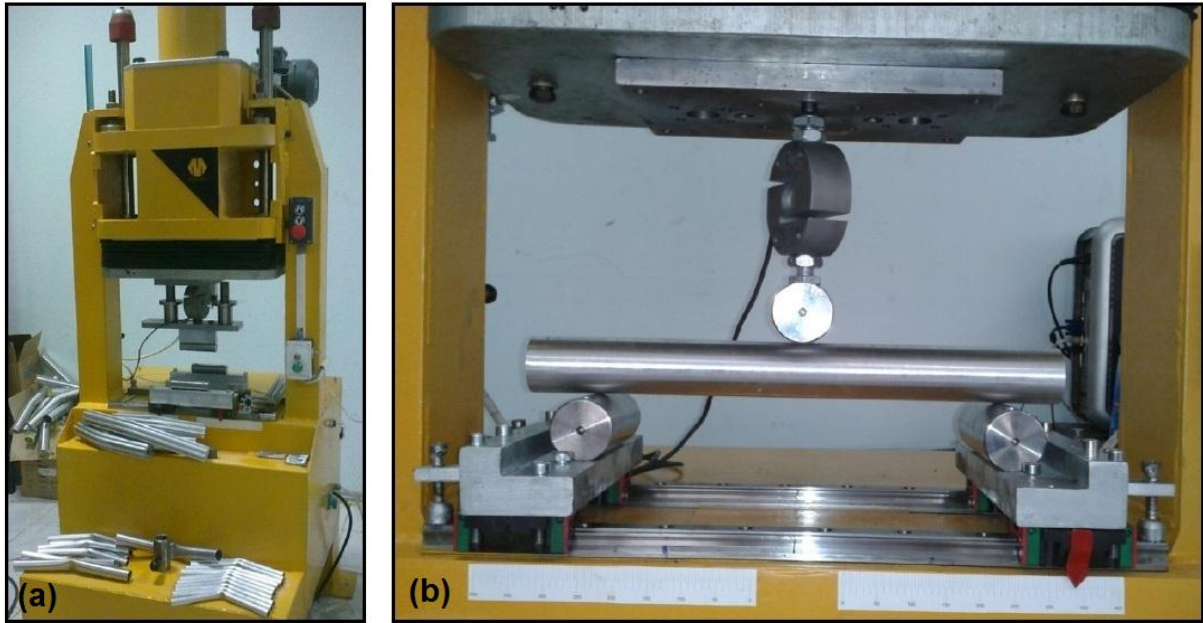
Burkulma deneyleri için iki ucu ankastre kiriş şartları öngörülmüştür. Kullanılan düzeneğin aşağıda Şekil 45'te görülmektedir. Buna göre parçanın bir ucu 10 ton kapasiteli yük hücreğine saplama (M24x3) ile diğer ucu ise, yine ankastre şartlarının sağlanması amacıyla aynaya bağlanmıştır. Parça içerisine uzanarak burkulma esnasında yanal kuvvetlerin etkisiyle borunun bağlantı kesitinde rijitliği sağlaması için özel bağlantı aparatları kullanılmıştır. İki ucu ankastre şartları için etkin burkulma boyu parça boyunun yarısı olması nedeniyle parçanın boyu mümkün olduğunca uzun tutulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla 19 mm çaplı 1 mm cidar kalınlığındaki boru için 400 mm'lik boy seçilmiştir. Deneylerde yer değiştirme lineer pozisyon sensörü (LVDT) kullanılmıştır. Burkulma plastik bölgede etkin olarak görülmesi için büyük deplasmanlara kadar deneye devam edilmiştir.



Şekil 45. Burkulma deney düzeneği.

3.1.4. Üç Nokta Eğme Deney Düzenegi

Proje kapsamında yapılan üç nokta eğme deneylerinde üniversitemizde yürütülen bir başka bilimsel araştırma projesi kapsamında yaptırılan üç nokta eğme test cihazı kullanılmıştır (Şekil 46). Bu cihaz sırasıyla 2 ve 5 ton kapasiteli iki yük hücreğine sahiptir. Cihazın kalibrasyonu ve gerekli kontrolleri yapılarak proje kapsamındaki üç nokta eğme deneylerinde kullanılmıştır. Üç nokta eğme deneylerinde numune boyu (L) uzun tutularak eğilme etkisinin özellikle yüksek olması sağlanmıştır. Bu amaçla L/D oranı (D:numune çapı) minimum 6 ve üstü (genellikle 7) olması sağlanmıştır. Destek ayakları ve mandrel çaplarının numune çapı ile aynı olmasına dikkat edilmiştir.

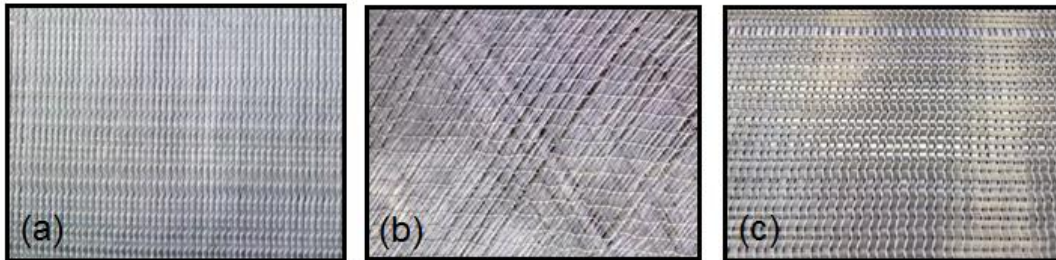


Şekil 46. (a) Üç nokta eğme test cihazı genel görünüşü, (b) Üç nokta eğme deney düzenegi.

3.2. Kullanılan Deney Malzemeleri

3.2.1. Cam Elyaf Dokuma ve Kimyasallar

Projede kapsamında alınması öngörülen alüminyum (6063-T6) alaşımından dört farklı çapta boru malzeme başta olmak üzere içeriden takviye malzemesi olarak, kestamit, polyamit ve polipropilen alımı gerçekleştirilmiş, parçanın dışarıdan takviye edilmesinde kullanılacak cam elyafın, [0], [90], [45] ve [0/90] yönelme açılarında elyaf dokuma ve kullanılacak kimyasal alımları yapılmıştır. Kullanılan kimyasal MGS laminasyon epoksi setidir.



Şekil 47. (a) [0] (veya sarıma bağlı olarak [990] yönlenmeli cam elyaf kumaş, (b) [45] yönlenmeli cam elyaf kumaş, (c) [0/90] cam elyaf dokuma kumaş.

3.2.2. Alüminyum Borular

Çapları 20, 25, 33, 40, 50 mm olan 6063-T6 alaşıma ait boru alımı gerçekleştirilmiştir. Alımı yapılan malzemelerden kuponlar kesilerek her bir boy için sertlikler ölçülerek, parçalar sertlik değerlerine göre gruplandırılmıştır (Şekil 48). Çapı 33 mm olan borunun 65-70 HB ve 95-100 HB olmak üzere iki farklı sertlikte olduğu tespit edilmiştir. Diğer borularda (20, 25, 40 ve 50 mm çaplı) sertliğin sırasıyla 80 HB, 90 HB, 75 HB ve 70 HB olduğu belirlenmiştir.

Projede alınması öngörülen malzemelerin büyük bir çoğunluğu temin edilmiştir. Elyaf takviyeli polyamit malzemenin kırıntı elyaf içermesi nedeniyle alımından vazgeçilmiştir. Bu malzeme kullanımından öngördüğümüz dayanım artışını, yüksek oranda elyaf içeren borularla sağlama yoluna gidilmiştir. Bu borular profil çekme (pultrüzyon) yöntemiyle üretilen, ticarileşmiş ve ülkemizde üretilmektedir.



Şekil 48. Borulardan alınan kuponlar üzerinden Webster sertlik ölçme el aleti.

3.2.3. Polimerik Malzemeler

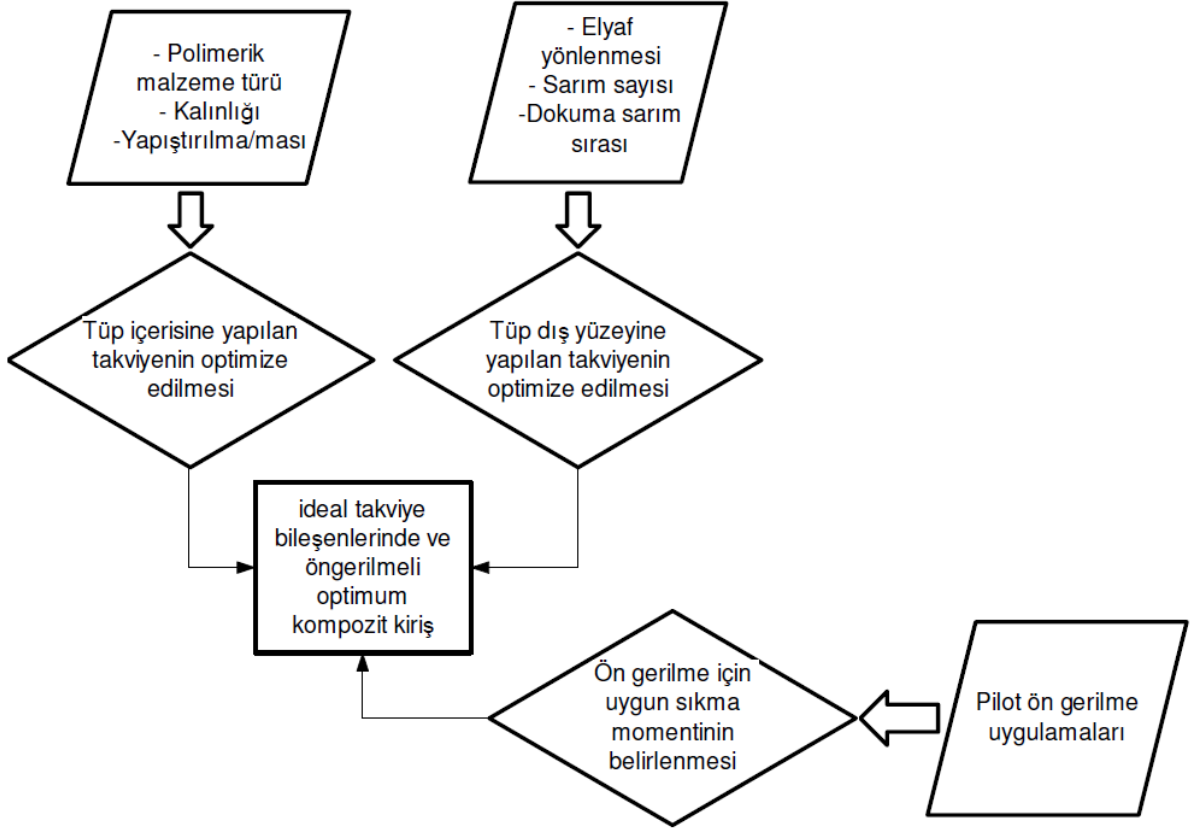
Kestamit (K), polyamit (P) ve polipropilen (PP) malzemelerin alımı gerçekleştirilmiştir. Bu malzemelerin içi boş olarak piyasa bulunamaması nedeniyle dolu kesitten işlenerek faydalı boyutlara getirilmiştir. Polimerik malzemeleri ve aynı bunları tüpe yapıştırmada en etkili Loctite 406 olduğu tespit edildiğinden bütün yapıştırma işlemlerinde adı geçen kimyasal kullanılmıştır.

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Tüp kirişin üç nokta eğme davranışını etkileyen parametrelerin neler olduğu ve ne ölçüde etkilediğini belirlemek için, tüp kirişin deformasyon davranışını ve hasar mekanizmasını detaylı bir şekilde incelenmek amacıyla, tüpün eğme davranışının deneysel olarak incelenmesi, verilen bir tüp çapı için farklı mandrel çaplarında üç nokta eğme deneylerinin yapılması, aynı malzemede farklı çap ve cidar kalınlıkları için üç nokta eğme deneylerinin yapılması planlanmıştır.

Daha sonra, kirişin hem içeriden hem de dışarıdan takviye edilmesi için en uygun takviye bileşenleri belirlenecektir (Şekil 49). Her iki takviye durumunda kompozit kirişin hasar mekanizmasındaki değişiklikler, tek takviye durumu için karşılaştırılıp gerektiğinde bileşenler

tekrar irdelenecek, bu işlem enerji absorbe etme kabiliyetinin ön plana çıktığı kirişler için de tekrarlanacaktır.



Şekil 49. Optimum kompozit kiriş tasarımı için akış planı.

3.3.1. Çekme Numuneleri

Borudaki deformasyonu detaylı bir şekilde incelemek amacıyla, 48/1 mm boruya ait olarak daha önce yapılmış çekme deneyi verisinin kullanıldığı analizlerde ve yapılan üç nokta eğme deneylerinde elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri arasında, en büyük eğme yükü için %11'lik fark ortaya çıkmıştır. Bu durum, çekme eğrisine ait büyüklüklerin hassas bir şekilde belirlenmesinin analiz sonuçları açısından büyük öneme sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bütün testlerin video ekstansometre eşliğinde yeniden yapılmasına karar verilmiştir.

Deneylerde kullanılan alüminyum kiriş ve polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri 3 ton kapasiteye sahip Instron marka çekme cihazında polimerik malzemeler için 0,5 mm/s hızda ve metal malzemeler için 0,1 mm/s hızda gerçekleştirilmiştir.

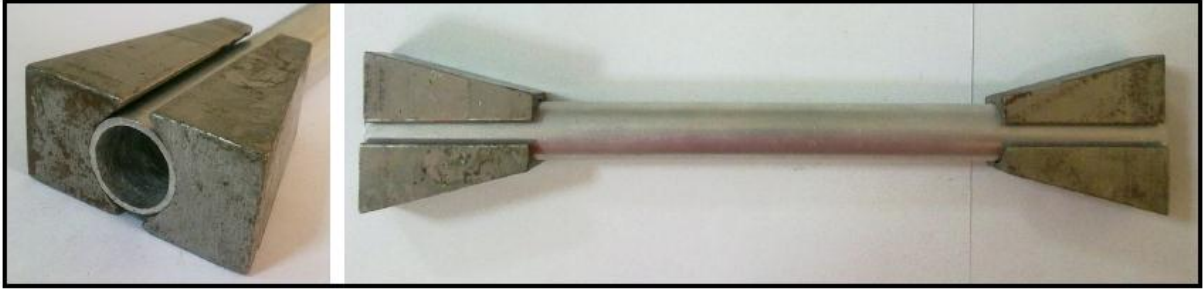
20/1,5 ve 24/1 mm alüminyum tüp kirişlerden boru şeklinde numuneler çıkartılarak çekme deneyleri yapılmıştır. Boru çekme numunelerinin hazırlanma aşamaları Şekil 50'de verilmiştir. Çekme cihazı çenelerinin boruları tuttuğu kısımlarda ezilme yaşanmaması için bu noktalarda boru içine tapalar yerleştirilmiştir (Şekil 50.a). Tapaların boyutları standartlara uygun olarak (ASTM-E8/E8M-09) hazırlanmıştır. Boru çekme numunesine tapaların yerleştirilmesi ve çekme numunesinin genel görünümü de yine aynı şekilde görülmektedir (Şekil 50.b ve c).

Tapaların boru uçlarına yerleştirilmesinden sonra çekme cihazının çenelerinin numuneyi uygun bir şekilde kavraması için numune boyutlarına uygun çeneler yapılmıştır. Boru çekme numunesinin çenelere yerleştiriliş biçimi Şekil 51'de verilmiştir. Bu hazırlık işlemlerinin

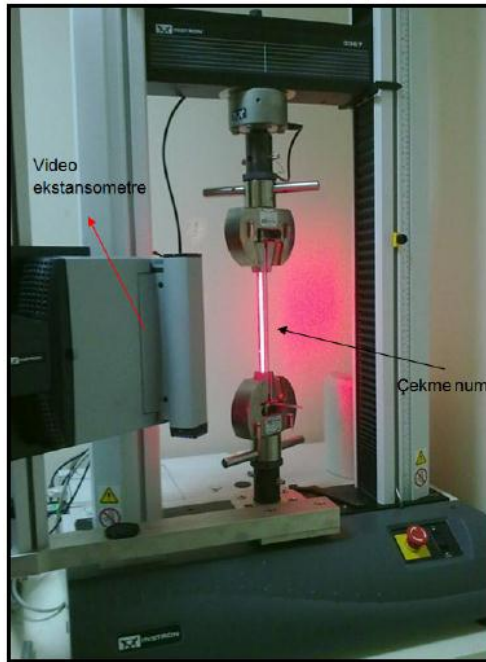
ardından, genel görünümü Şekil 52'de verilen Instron marka çekme cihazı kullanılarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 50. Boru çekme numunesinin hazırlanması: (a) Çapı 19/1 ve 24/1 mm alüminyum borular için hazırlanan tapalar, (b) Boru çekme numunesine tapaların yerleştirilmesi, (c) Boru çekme numunesi.



Şekil 51. Boru çekme deneyi için hazırlanan çeneler ve çekme numunesinin çenelere yerleştirilmesi.



Şekil 52. Çekme deneylerinin yapıldığı çekme cihazı.



Şekil 53. Çapı 31mm olan borudan işlenen çekme numunesi.



Şekil 54. (a) Çekme çeneleri (31 ve 40 mm çaplı borular için), (b) Numunenin çenelere yerleştirilmesi.



Şekil 55. Polimerik malzemelerden (K, P ve PP) çıkartılan silindirik çekme numuneleri.



Şekil 56. (a) Pultrüzyon boru için hazırlanan tapalar, (b) Boru çekme numunesi.



Şekil 57. 30 mm çaplı alüminyum borunun çekme deneyi numunesi.



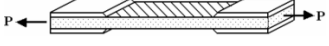


Standartlarda (ASTM-E8/E8M-09) belirtildiği üzere çapı 25 mm den büyük borular için boru doğrultusunda çekme numunesi çıkartılarak çekme deneyi yapılmaktadır. Deneylerde çoğunlukla kullandığımız 31/1 ve 40/1 mm boyutlara sahip borular için çekme numunesi çıkartarak deneyler gerçekleştirilmiştir. 31 mm çaplı borudan çıkartılan çekme numunesine ait resim Şekil 53'de, numune şekline uygun olarak 31 ve 40 mm çaplı borular için üretilen çekme çeneleri ise Şekil 54'de verilmiştir. ASTM-D638-09 standardı dikkate alınarak polimerik malzemelerden hazırlanan çekme numuneleri ise Şekil 55'de verilmiştir.

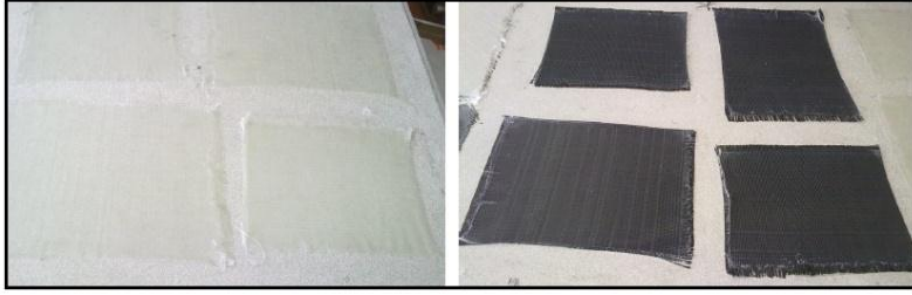
Cam elyaf katkılı 28 mm çapında 3 mm kalınlığındaki pultrüzyon ürünü borunun çekme deneyleri, İTÜ, Makine Fakültesi Laboratuvarındaki, Dartec marka, 50 ton kapasiteli çekme cihazında, 0,05 mm/s hızda gerçekleştirilmiştir. Pultrüzyon boruda çenelerin tuttuğu kısımda ezilme yaşanmaması için uç kısımlarına tapalar yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Pultrüzyon boru için hazırlanan tapalar ve pultrüzyon boruya ait çekme numunesi Şekil 56'da verilmiştir. Alüminyum tüp girişin çekme deneyi ise, 30 mm çaplı borudan ASTM-E8/E8M-09 standardına göre çıkartılan çekme numunesi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 57).

3.3.2. Farklı Elyaf Yönlenmesine Sahip Numuneler

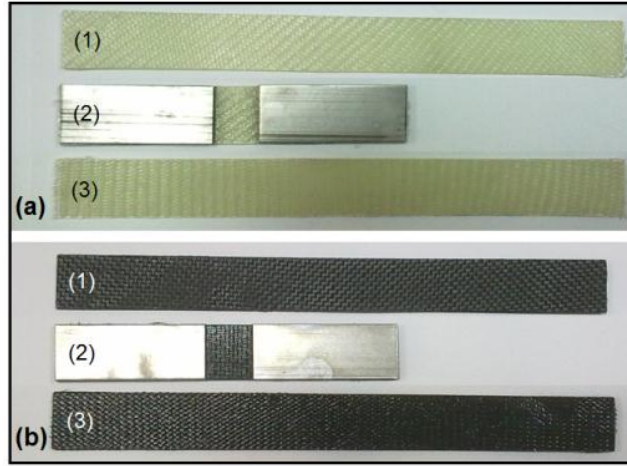
Mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, cam ve karbon dokuma elyaf kumaş ile tek eksenli cam ve karbon elyaftan, çekme, basma ve kayma numuneleri hazırlanmıştır. İlk olarak elyaf kumaşlar düz bir zemin üzerine yatırılarak, epoksi katkısıyla tabakalar hazırlanmıştır (Şekil 58). Bir gün oda sıcaklığında bekletilen tabakalar düz zemin yüzeyinden ayrılarak, 75°C de 8 saat süreyle kürlenmiştir. Daha sonra bu tabakalardan çekme, basma ve kayma deney numuneleri standartlarına uygun olarak işlenmiştir. Çekme deneyi numuneleri ASTM D3039, basma deneyi numuneleri ASTM D 3410 ve kayma deneyi numuneleri ise ASTM D 3518 standartlarına göre hazırlanmıştır. Deney numunelerinin standartlarının özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Bazı deney numunelerinde çenelerin tuttuğu kısımda ezilme olmaması için bu kısımlara çelikten imal edilmiş plakalar yapıştırılmıştır. Cam ve karbon dokuma elyaf ile tek eksenli cam ve karbon elyaftan hazırlanan çekme, basma ve kayma numuneleri Şekil 59 ve 60'da verilmiştir.

Tablo 2. Deney numunesi standartları.

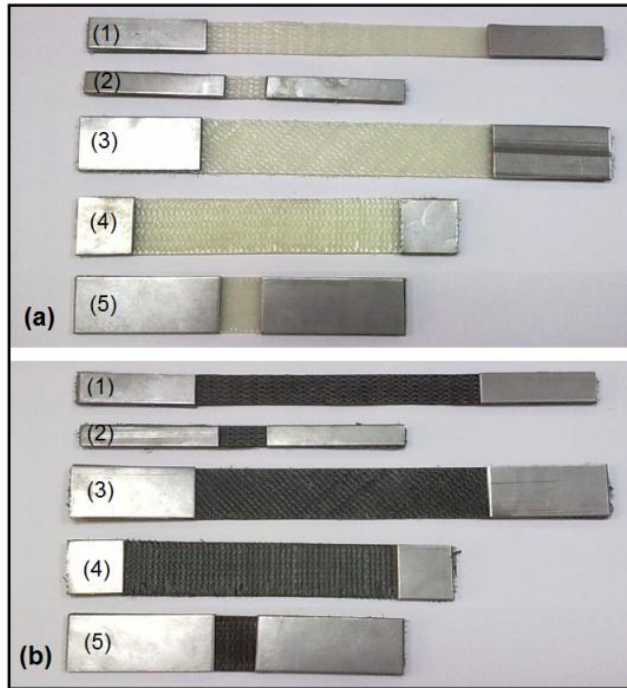
Belirlenen Özellikler	Sembol	Geometri	ASTM
Eksenel modül Eksenel poisson oranı Eksenel çekme dayanımı	E_1 (MPa) ν_{12} (-) X_T (MPa)		ASTM D 3039
Enlemesine modül Enlemesine poisson oranı Enlemesine çekme dayanımı	E_2 (MPa) ν_{21} (-) Y_T (MPa)		ASTM D 3039
Kayma modülü Kayma dayanımı	G_{12} (MPa) S (MPa)		ASTM D 3518
Boylamasına basma dayanımı	X_C (MPa)		ASTM D 3410
Enlemesine basma dayanımı	Y_C (MPa)		ASTM D 3410



Şekil 58. Deney numunelerinin elle yatırma yöntemiyle düz zemin üzerinde hazırlanışı.



Şekil 59. (a) Cam dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri, (b) Karbon dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri (1: çekme numunesi, 2: basma numunesi, 3: kayma numunesi).



Şekil 60. (a) Tek eksenli cam elyaftan hazırlanan deney numuneleri, (b) Tek eksenli karbon elyaftan hazırlanan deney numuneleri (1: boyuna çekme numunesi, 2: boyuna basma numunesi, 3: kayma numunesi, 4: enine çekme numunesi, 5: enine basma numunesi).

3.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü Etkisinin İncelenmesinde Kullanılan Numuneler

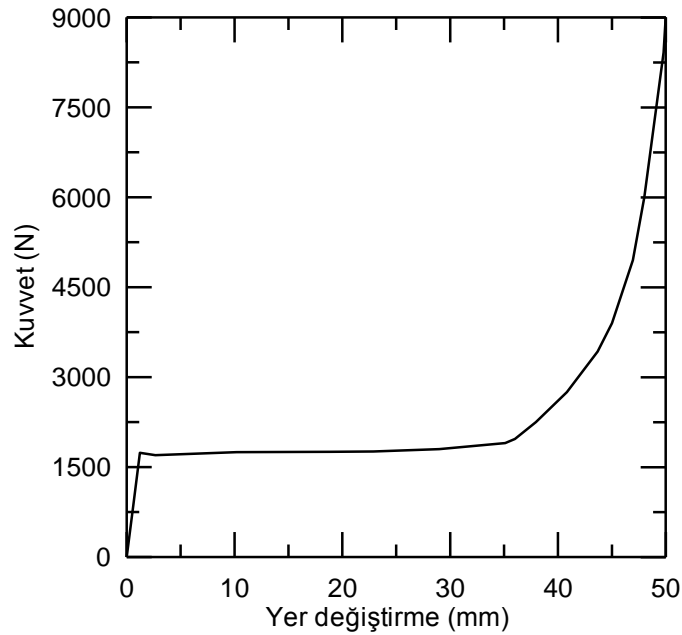
Alüminyum tüp yüzeyinde çevresel olarak yüzey pürüzlülüğü oluşturmak için 60 numaralı zımpara ile düşük çevresel hızlarda yüzeyden talaş kaldırılmış ve daha sonra yüzey pürüzlülüğü ölçümüne gidilmiştir. Pürüzlendirilmiş ve herhangi bir işlem görmemiş yüzeylerin Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri) değerleri sırasıyla, 2.86 ve 5.46 μm olarak ölçülmüştür. Her iki pürüzlülük değerine sahip tüp parçaların yüzeyleri, aynı epoksi karışımı kullanılarak, aynı cam elyaf kullanılarak takviye edilmiş ve aynı etüvde birlikte kütleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde işlemde kaynaklanabilecek bütün değişkenler kontrol altında tutulmuştur. Ancak yapılan üç nokta eğme deneylerine ait sonuçlarından, nedeni yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilecek bir fark tespit edilmemiştir.

3.3.4. Polimerik Malzemelerle ve PVC Köpükle Takviye Edilen Numuneler

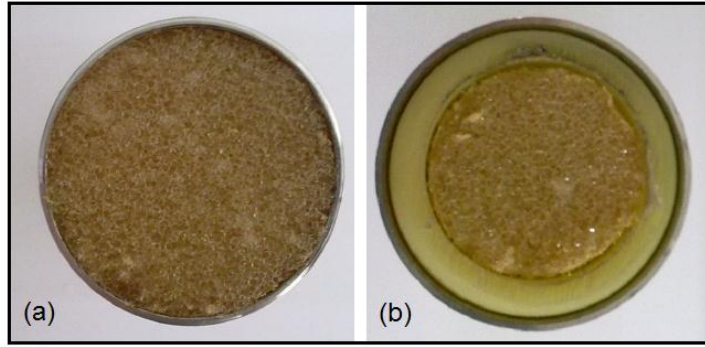
Gözenekli yapısı gereği belirli miktarda sıkıştırılabilen PVC (polivinil klorür) köpüğün parça içerisine yerleştirilerek eğmeye olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu tür malzemelerin deformasyonla gözeneklerin kapanması ve beraberinde şekil değişimine olan direncinin hızlı bir şekilde arttığı bilinmektedir. Kiriş yapıda bükülme bölgesinde deformasyonun kısmen kısıtlayacağı beklentisiyle bu konu deneysel çalışmalara dahil edilmiştir.

Kullanılan PVC köpük malzemesinin yük altındaki davranışı belirlemek için 48 mm çaplı ve 60 mm yüksekliğinde numune kullanılarak basma deneyi yapılmıştır. Parça yüksekliği burkulma oluşmayacak şekilde seçilmiştir. Deneye ait grafik Şekil 61'de verilmiştir. Belirli bir şekil değişiminden sonra uygulanan yükün hızlı bir şekilde artması yapının yoğunlaşması "densification" olarak literatüre geçmiştir. Yukarıda verilen numune büyüklüğü için yaklaşık 35 mm deplasmandan sonra eğrinin hızlıca yükselmesi sözü edilen gözeneklerin kapanmasına bağlanmaktadır.

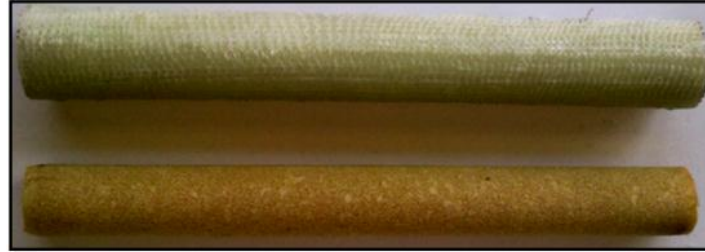
Tüp kiriş numunesine içeriden köpük ve kestamit+köpüğün takviye edilmesiyle üretilen parçanın alın kesit görüntüleri Şekil 62'de verilmiştir. Dışarıdan cam elyaf, içeriden ise sadece PVC köpüğün tercih edildiği yapıyı ait görünüm Şekil 63'de (montaj öncesi) verilmiştir.



Şekil 61. PVC köpük malzemenin basma-sıkıştırma deneyi.



Şekil 62. PVC köpük takviye (a) PVC köpük, (b) PVC köpük+kestamit.



Şekil 63. Dışarıdan cam elyaf ve içeriden PVC köpük takviyelerin montaj öncesi görünümü.

3.3.5. İçeriden Takviye Edilen Numuneler

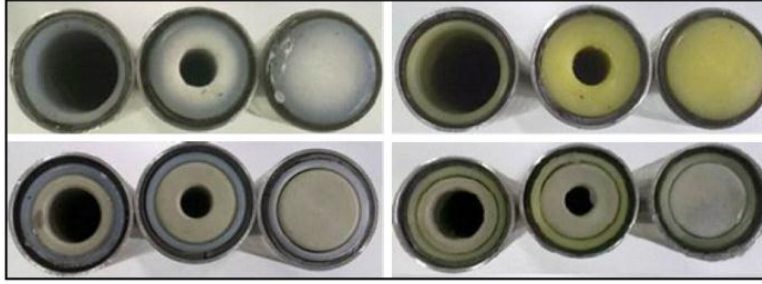
Tüp içerisine takviye edilmesi düşünülen malzeme sayısı ve bunların kalınlık değerleri gibi değişkenlerin sistematik olarak incelenmesi amacıyla, Şekil 7, 8, 9 ve 10'da kırmızı renkle işaretlenmiş olan şartlara ait deney kombinasyonları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Deney numunesinin içeriden takviyesi için planlanan kombinasyonlar.

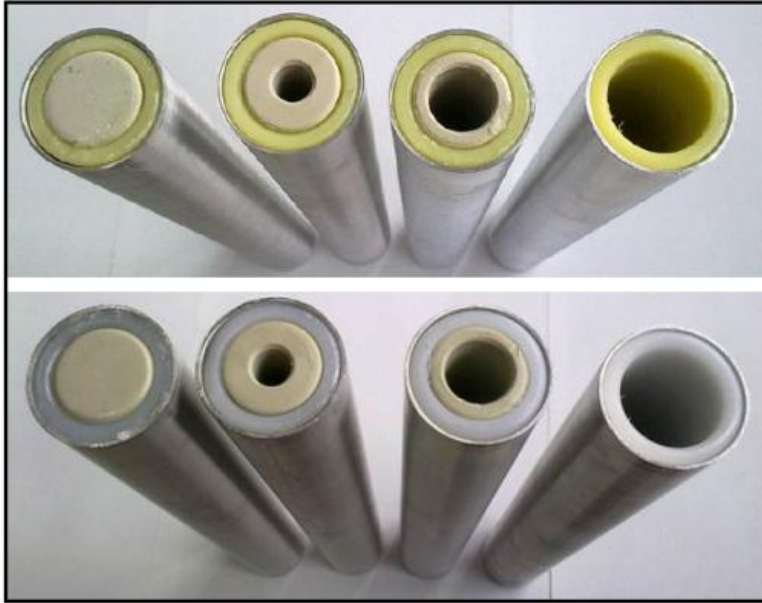
	T	PB	K	P	K	P	K	P	K	P	PP	PP	PP
t (mm)		2	2	2	4	4	8	8	12,5	12,5	3,5	6,5	10,5
A													
B													
C													
D													
E													
F													
G													
H													
I													
J													
K													
L													
M													
N													
O													
P													
R													
S													
T													
U													
V													

Pultrüzyon ürünü borunun kullanılarak ve kullanılmaksızın, çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş, 31 mm çaplı ve 1 mm cidar kalınlıklı, bir grup alüminyum tüpün görünümü Şekil 64 ve 65'de verilmiştir.

İçeriden takviye edilen tüp yapıda farklı malzemelerin birbirleriyle zorlanma esnasında birlikte çalışmasını sağlamak için yapıştırıcı (Loctite 406) kullanılmış ve daha sonra nihai olarak alüminyum tüpe yerleştirilmiştir. Bütün yüzeylerin alkolle temizlendikten sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir. Şekil 66'da içerden yapılan takviyeye ait bir kombinasyon görülmektedir.



Şekil 64. PB ve çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilen (D/t:31/1) alüminyum tüpler.



Şekil 65. PB kullanılmadan, çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilen (D/t:31/1) alüminyum tüpler.



Şekil 66. Soldan sağa sırasıyla kullanılan PP, K ve PB'nin alüminyum tüpe yerleştirilmesi.

3.3.6. İçten ve Dıştan Takviye Edilen Kompozit Numuneler

Dışarıdan takviyede kullanılan elyaf/epoksi yapılarıdaki, elyaf yönlenmesi, katman sayısı ve dokuma sarım sırası gibi değişkenlerin sistematik olarak incelenmesi amacıyla öngörülen deney kombinasyonları Tablo 4'de verilmiştir. Tablodaki rakamlar sarım sırasını göstermektedir.

Tablo 4. Deney numunesi yüzeyine yapılacak elyaf takviyesi için öngörülen kombinasyonlar.

	Al Boru	Elyaf Yönü				Katman sayısı
		0°	45°	90°	0°/90°	
A		1,2,3		4		4
B		1,2,3	4			4
C					1,2	2
D					1,2,3,4	4
E		1,2		3,4		4
F			1,2,3,4			4
G			1,2	3,4		4
H		1		2		2
I		1,2		3,4,5		5
J		1,2,3		4,5		5
L		1	2			2

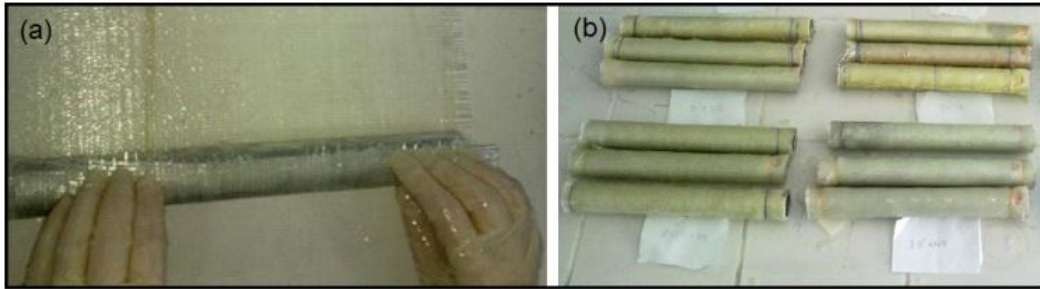
İçeriden yapılan takviyeyle birlikte dışarıdan cam elyaf ve karbon elyaf takviye yapılarak oluşturulan kombinasyonlara ait numune görünüşleri Şekil 67'de verilmiştir.

Burkulma deney numunelerinin hazırlanmasında narinlik değeri dikkate alınarak özellikle boyu uzun borular kullanılmıştır. Bu amaçla D/t:19/1 mm ve 400 mm boyunda alüminyum tüp kırılganlara içeriden K, dışarıdan CE ve KE ([0/90] dokuma) takviye yapılarak elde edilen numunelerle burkulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dışarıdan takviyede kumaş kalınlığı her iki elyaf için aynı olup, katman sayısı da dört olarak sabit tutulmuştur. Üç nokta eğme numunelerinde izlenen üretim aşamalarının aynısı burkulma numunelerine de uygulanmıştır. Tekrardan kaçınmak amacıyla burada detaylar verilmemiştir.



Şekil 67. Dışarıdan ve içeriden takviye edilerek üretilen kombinasyonlar (a) Dışarıdan cam elyaf takviyeli, (b) Dışarıdan karbon elyaf takviyeli kombinasyonlar.

Dışarıdan takviye edilecek tüp giriş için, uygun oranda (hacim olarak % 50) karıştırılmış epoksi ve sertleştirici kullanılarak, dokuma elyaflar ıslatma problemi yaşanmayacak şekilde tüpün etrafına sarılmıştır (Şekil 23.a) Numuneler, bir gün oda sıcaklığında bekletilmiş ve daha sonra 8 saat 75 °C sıcaklıkta kütleme işlemine tabi tutulmuştur. Her bir numunede kullanılan karışımın miktarı katman sayına bağlı olarak kontrol edilmiş ve numuneler arasında farklılık oluşmamasına özen gösterilmiştir. Şekil 68.b'de kütleme sonrası bir grup deney numunesinin görünümü verilmiştir.



Şekil 68. Numune hazırlama, (a) Boru etrafına yapılan elyaf dokuma sarımı, (b) Kütleme sonrası bir grup deney numunesinin genel görünüşü.

30 mm çaplı alüminyum boruda, içeriden PB, K, P ve PP malzemelerle, dışarıdan ise CE ve KE (0₂90₃) takviye edilerek üç nokta eğme deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere ait görünüşler Şekil 69'da verilmiştir. 30 mm çaplı alüminyum boruya ait içten ve dıştan takviyeli darbe deneyi numuneleri ise Şekil 70'de verilmiştir.



Şekil 69. 30 mm çaplı üç nokta eğme deneyi numuneleri, (a) içten takviyeli, (b) içten takviyeli, (c) dıştan cam elyaf takviyeli, (d) dıştan karbon elyaf takviyeli.



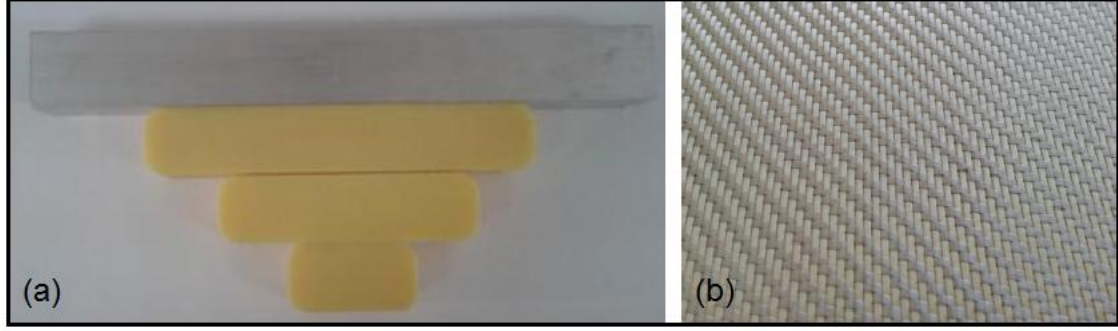
Şekil 70. Darbe deneyi numuneleri

3.3.7. İçten ve Dıştan Takviyeli Edilen Kare Kesitli Numuneler

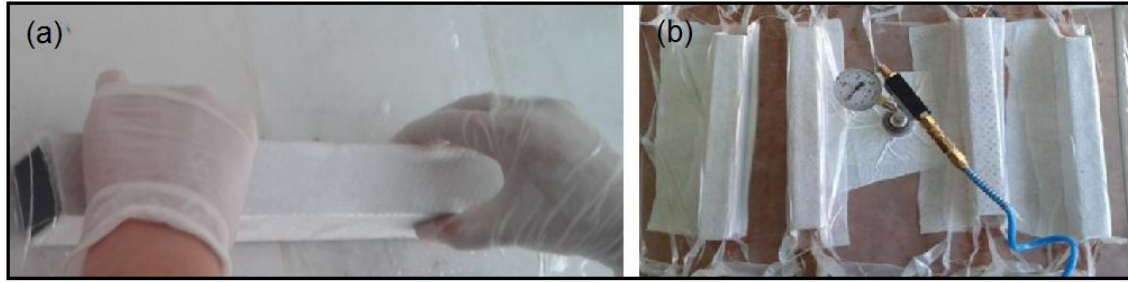
Kare kesitli alüminyum boruların içten ve dıştan takviyeli numuneleri hazırlanmıştır. 6063-T5 alüminyum malzemeden mamul, 40x40 mm kesitinde ve et kalınlığı 1,5 mm olan borular kullanılmıştır. Numunelerin boyu 320 mm olarak uygulanmıştır. İçten takviye malzemesi olarak kestamit takoz (Şekil 71.a) ve dıştan takviye malzemesi olarak [0/90] elyaf yönlenmesine sahip 300 g/m² twill dokuma cam elyaf kumaş kullanılmıştır (Şekil 71.b). 40x40 mm kesitli tüp yapının içten boydan boya takviye edilmesi ağırlığı ve dolayısıyla maliyeti aşırı derecede arttıracaktır. Ayrıca, takviye unsurunun belirli bir boy değerine kadar yük taşıma kabiliyetine katkı sağladığı deneysel olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla, 70,140 ve 210 mm boylarda kestamid takozlar hazırlanarak kısmi içten takviye yapılması uygun olacaktır. Takviyenin kısmi olarak planlanmış olması nedeniyle, kestamid parçanın içerisinde boşaltılarak ağırlıktan tasarrufa gidilmesi düşünülmemiştir. Takozların üç nokta eğme deneyi esnasında çentik etkisi oluşturabilecek köşelerine 10 mm yarıçaplı köşe yuvarlatması uygulanmıştır.

Kare kesitli numunelere el yatırması yöntemiyle ıslatılan cam elyaflar taşıyıcı malzemenin üzerine dikkatlice sarılmıştır (Şekil 72.a). Bu numunelerin hazırlanmasında dairesel kesitli numunelerden farklı olarak, numunelerin kare kesitli ve köşeli olması nedeniyle elyafın yüzeye homojen olarak temas etmesinde ortaya çıkan problemleri ortadan kaldırmak için, elyaf sarma işleminden sonra vakum ortamında kürlenme yapılmıştır. Deney numuneleri fazla epoksinin dışarı atılmasını sağlayan delikli naylon torbalara sarılmıştır. Daha sonra vakum battanisi ile sarılan bu numuneler düzgün bir yüzeye üzerine yerleştirilmiş ve üzerine son katman olan özel vakum naylonu kapatılarak çevresinden özel bir bant ile sızdırmazlık sağlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında -600 mmHg vakum altında bir gün boyunca

bekletilmiştir (Şekil 72.b). Sıcak kürlleme işlemi 75 °C sıcaklıkta 8 saat süreyle etüvde yapılmıştır.



Şekil 71. Kare kesitli kompozit numunelerin hazırlanması, (a) Alüminyum tüp kiriş ve kestamid takozlar, (b) Cam elyaf kumaş.



Şekil 72. (a) El yatırması yöntemiyle numunenin hazırlanması, (b) Vakum torbalama uygulaması.

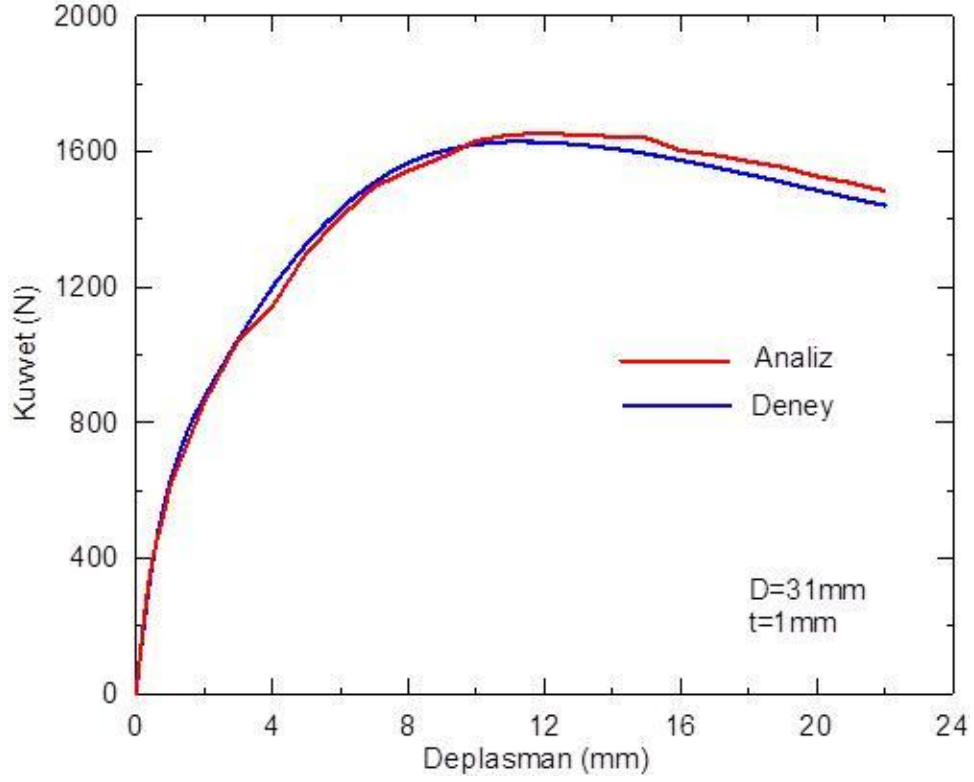
4. ANALİZ BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Üç Nokta Eğme Deneyi Simülasyonları

Bu bölümde, daire ve kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme ve darbe deneylerine ait sonlu elemanlar analizi çalışmalarına yer verilmiştir. Yapılan üç nokta eğme ve darbe deneyi simülasyonlarında, önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, boş tüp kiriş (T), Tüp+Kestamit (T+K), Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K+PP:3.5), Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K+PP:6.5), Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K+PP:dolu) şeklindeki sadece içten takviyeli numuneler ile dışarıdan cam elyaf (CE) ve karbon elyaf (KE) takviyeli kompozit numuneler şeklindeki analiz tasarımları üzerinde çalışılmıştır.

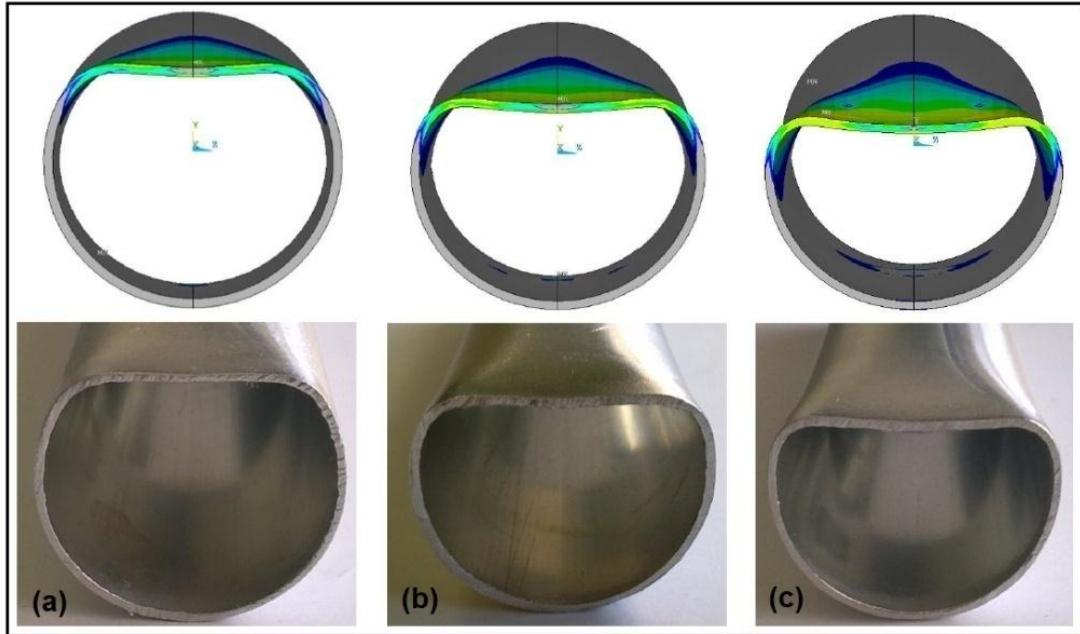
4.1.1. Dairesel Kesitli Tüp Kiriş

31 mm çaplı borudan işlenen numunelerin video ekstansometre kullanılarak yapılan çekme deneyi verileri sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Deney ve analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 73'de verilmiştir. Analiz sonuçları ile deneysel verilerin büyük ölçüde uyum gösterdiği, maksimum kuvvetin belirlenmesinde sapmanın %3'den daha küçük olduğu görülmektedir. Modellemede kullanılan malzemelere ait verilerin belirlenmesindeki hassasiyet analizin başarısını doğrudan etkilemiştir. Analizlerde, video ekstansometre kullanılmadan elde edilen deney verileri kullanıldığında, gerçek eğme şartlarına göre %13'e varan sapmalar ortaya çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 73. Deney ve analiz sonuçlarıyla elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.

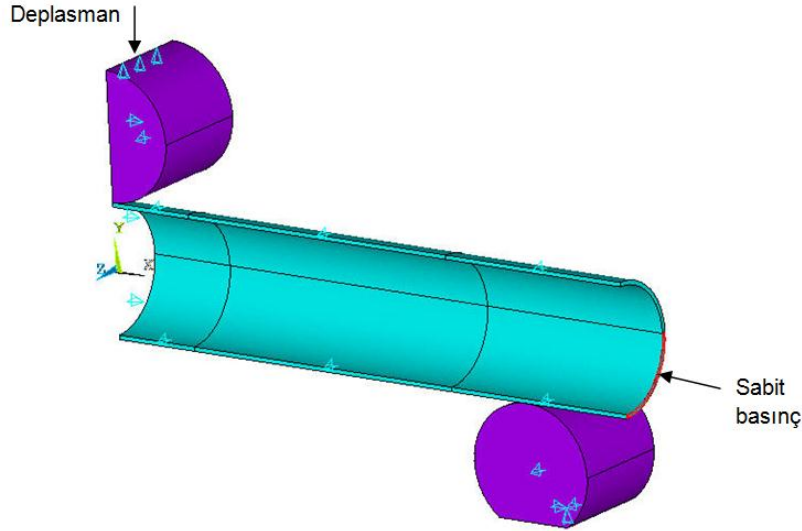
Farklı deplasman değerlerinde (6, 9 ve 12 mm) yapılan deneylerdeki numunelerin ortasından kesilmesiyle elde edilen kesite ait resimler ve aynı deplasman değerine ait analiz görüntüleri Şekil 74'de bir arada verilmiştir. Her iki kesit deformasyon görüntüsünden analizin plastik deformasyonun belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 74. Farklı deplasman değerlerinde tüp kirişin orta noktasındaki değişimi gösteren deney ve analize ait sonuçlar (a) 6 mm, (b) 9 mm, (c) 12 mm.

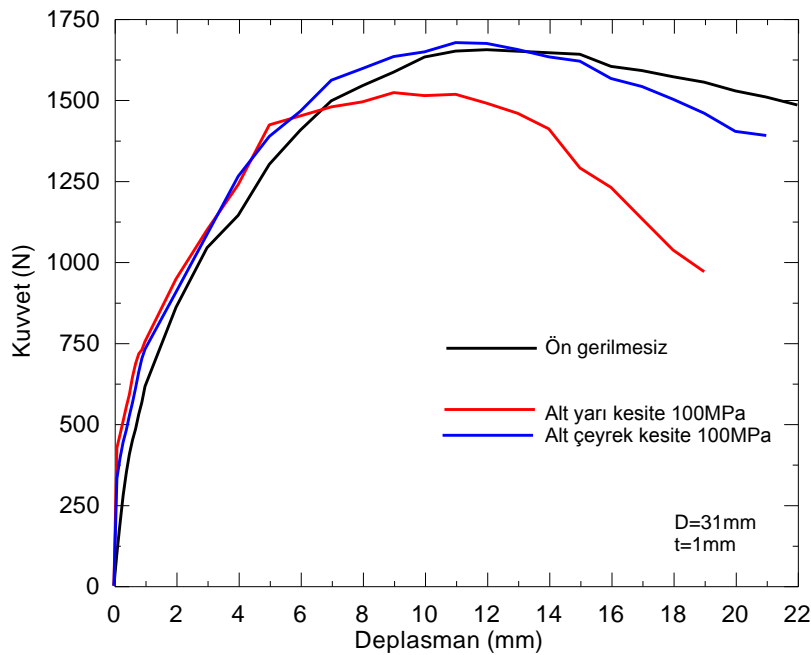
4.1.2. Ön Gerilmeli Tüp Kiriş

Projenin hedeflerinden birisi de ön gerilmenin kirişin yük taşıma davranışına olan etkisinin incelenmesidir. Bu amaçla eğme yükü altında kirişin alt kısmında oluşan çekme gerilmesinin büyüklüğünü, parçaya verilen basma ön gerilmesi sayesinde düşürülerek hasar başlangıç mekanizmasını geciktirilmektedir. Ön gerilmenin kesitteki etkisini daha iyi anlamak ve yapılacak deneysel çalışmalara ışık tutması amacıyla öncelikle sonlu elemanlar çalışmaları planlanmıştır. Bu bağlamdaki simülasyon çalışmalarında ilk olarak D/T:31/1 mm'lik borunun alt yarı kesitine 100 MPa ve 50 MPa, alt çeyrek kesitine ise 100 MPa sabit basınç uygulanmış ve parçanın üç nokta eğme deneyi esnasındaki davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonu önceki çalışmalarda olduğu gibi çeyrek simetrik model kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Borunun alt yarı kesitine sabit basıncın uygulanması sınır şartlarıyla birlikte Şekil 75' de gösterilmiştir.



Şekil 75. Ön gerilme uygulanmış modelde sınır şartları ve yükleme durumu.

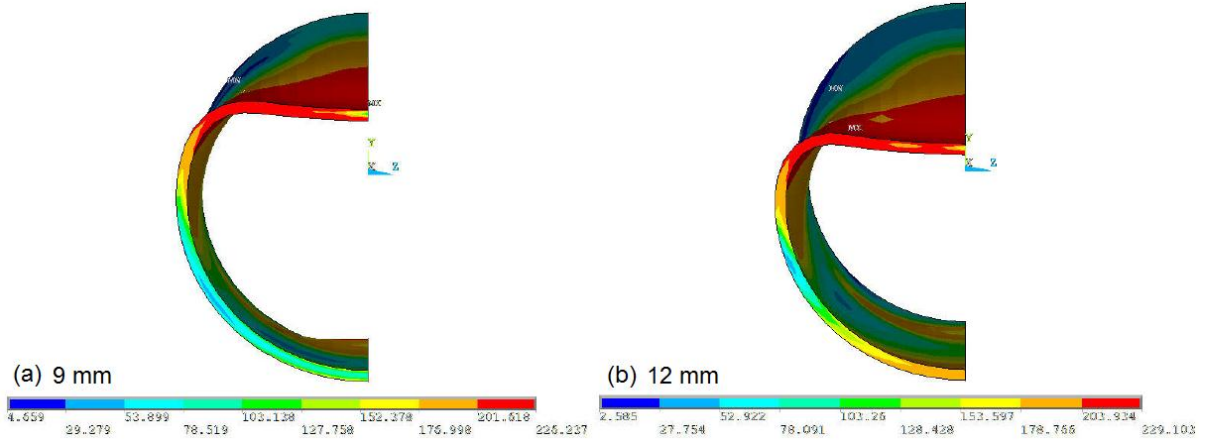
Yapılan analiz sonuçlarından hareketle hesaplanan kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 76'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, alt yarı kesite 100 MPa gerilmenin uygulanması durumunda kirişin yük taşıma kabiliyetinin düştüğü, bükülme deplasman değerinin azaldığı, rijitliğin ise bir miktar arttığı görülmektedir. Gerilmenin alt çeyrek kesite uygulanması durumunda, yük taşıma kabiliyeti ön gerilmesiz duruma göre biraz artmaktadır.



Şekil 76. Ön gerilmeli kirişte sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.

Alt yarı kesite 100 MPa uygulanmış olan model sonuçları ile ön gerilmemiş modelin bir karşılaştırması yapıldığında, gerilmemiş modelde 12 mm deplasmanda alt cidarda akma gerilmesi gelişmekte ve bükülme gerçekleşmektedir. Ön gerilmeli olan parçada ise bükülme deplasmanı 9 mm'ye azalmış, ancak alt cidarda akma deplasmanı 14 mm'ye yükselmiştir.

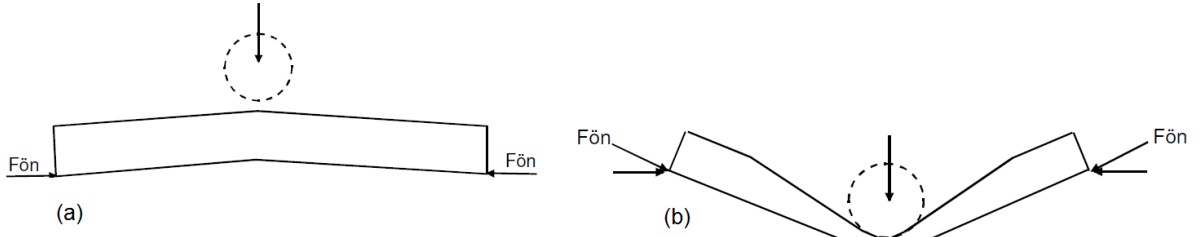
Ön gerilmeli (alt yarı kesite 100 MPa) ve ön gerilmemiş modelde en büyük kuvvetin oluştuğu deplasmanlar (9 ve 12 mm) için von-Mises gerilme dağılımı Şekil 77'de verilmiştir. Bu gerilme dağılımları karşılaştırıldığında, alt cidardaki gerilmeler arasındaki fark dikkati çekmektedir. Tüp malzemesinin akma sınırının 187 MPa olduğu göz önüne alındığında, ön gerilme uygulanan parçada akmanın sadece kesitin üst yarısında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



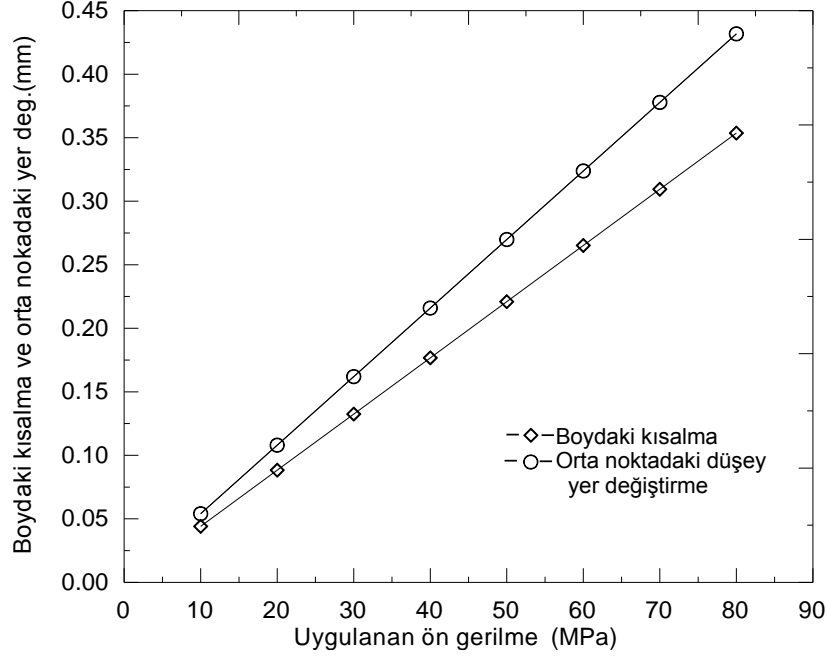
Şekil 77. (a) Ön gerilmeli modelde gerilme dağılımı (deplasman 9 mm), (b) Ön gerilmemiş modelde gerilme dağılımı (deplasman 12 mm).

Uygulanan ön gerilmenin akmayı kısıtlamış olması sonucunda parçanın yük taşıma kabiliyetinde artış beklenir. Ancak, ön gerilme uygulanmış parçalar küçük deplasmanlarda ve nispeten daha düşük yüklerde bükülmektedir. Sonlu eleman modellemesinde basıncın sürekli aynı değerde sabit tutulması ve aşağıda verilen basit çizim (Şekil 78) dikkate alındığında bu durumun sebebi anlaşılmaktadır. Gerilmenin uygulandığı alt yarı kesite doğal olarak bir kuvvet etki etmekte ve bu kuvvetin etkisiyle parça orta noktası düşeyde yukarı doğru bir miktar elastik şekil değiştirerek dış bükey bir yüzey oluşturmaktadır. Deplasmanla birlikte $F_{ön}$ kuvvetinin yatay bileşeninin gelişmesi, üç nokta eğme deneyi sırasında borunun bükülmesini kolaylaştırıcı etki yapmaktadır. Ön gerilmeli parçada, alt cidardaki çekme gerilmesinin azalmış olması, mandrel etrafında tüpün sarılarak bükülmesini kısıtlayacağından, mandrelin deplasmanı üst cidarda lokal deformasyonu şiddetlendirerek devam edecektir. Bu nedenle mekanik açıdan ön gerilme verilen tüp kirişte içeriden takviye edilmeksizin yük taşıma kabiliyetinde önemli bir artışın elde edilmesi güçtür.

Parçayı bükmeye çalışan bu ikinci kuvvetin ($F_{ön}$ kuvvetinin yatay bileşeni) büyüklüğü deplasmanla daha da artmakta, bu da alt cidarda basma ön gerilmesinin yük taşımaya olan pozitif etkisini hızlı bir şekilde düşürmektedir. Şekil 76'de verilen eğrilerde küçük deplasman değerleri için ön gerilmenin faydalı etkisi açıkça görülürken, artan deplasmanla bu etki tersine dönmektedir. Buna göre başlangıçta uygulanan ön gerilme şiddetine bağlı olarak parçanın ortasında yer değiştirme (dış bükey) ve boyunda kısalma söz konusudur. Bu büyüklükler yine sonlu eleman analizleriyle tespit edilmiştir (Şekil 79).



Şekil 78. Ön gerilme verilen bir tüp kirişte uygulanan kuvvetin bükülme olayına olan etkisi (a) boru yüzeyinde dış büküme yüzey oluşumu, (b) Bükülmeye birlikte $F_{ön}$ kuvvetinin yatay bileşenin oluşması.



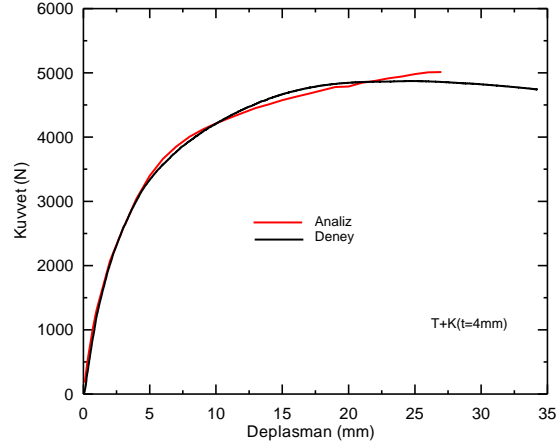
Şekil 79. Ön gerilme ile deney esnasında gelişen maksimum ön gerilme değişimi.

4.1.3. Kompozit Numuneler

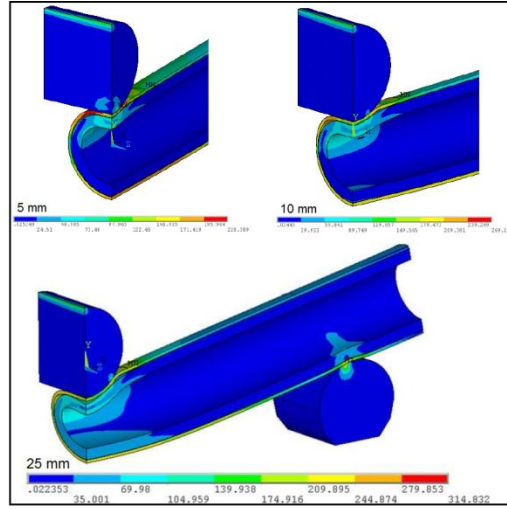
4.1.3.1. Tüp+Kestamit (T+K(4))

T+K(4) modeline ait sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 80'da verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, analiz ve deney sonuçları oldukça uyumludur. Plastik deformasyonun yoğunlaştığı bükülme noktasına kadar iyi performans gösteren analiz bu noktadan sonra çok yavaşladığından durdurulmuştur. Grafikler arasındaki kuvvet farkının maksimum olduğu noktada sapma %3 civarındadır. Şekil 81'de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir. Yük değerinin nispeten düşük olduğu, küçük deplasmanlarda polimer malzemenin büyük ölçüde metalik malzemeyle birlikte hareket ettiği 5 mm deplasman değeri için elde edilen analiz görüntülerinden anlaşılmaktadır. İçten yapılan bu takviyenin özellikle lokal deformasyona kısıtlamış ve ayrıca katkısı metalik tüpe göre sınırlı olan eğme direnciyle de kompozit yapının yük taşımasını katkıda bulunmaktadır. Kompozit yapının 25 mm deplasmandaki Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü Şekil 81'de verilmiştir. Görüldüğü gibi tüp ve kestamit boru arasında ayrılmalar gözlenmektedir. Bu ayrılmaların oluşmasıyla kompozit yapıda yük taşıma kabiliyeti azalmaya başlamaktadır. Deneyler esnasında da benzer şekilde tüp ve kestamit ara yüzeyleri arasında yapıştırıcı etkisini kaybetmesiyle yüzeyler arasında ayrılmalar başlamakta ve kuvvet düşmeye eğilimine girmektedir. İlerleyen deney koşullarında, bükülme deplasmanını belirleyen alt cidardaki

akma alanı yükselmektedir. Görüldüğü gibi, 25 mm'lik deplasman için boru eksenine doğrultusunda gerilme değeri şiddetlenmektedir.



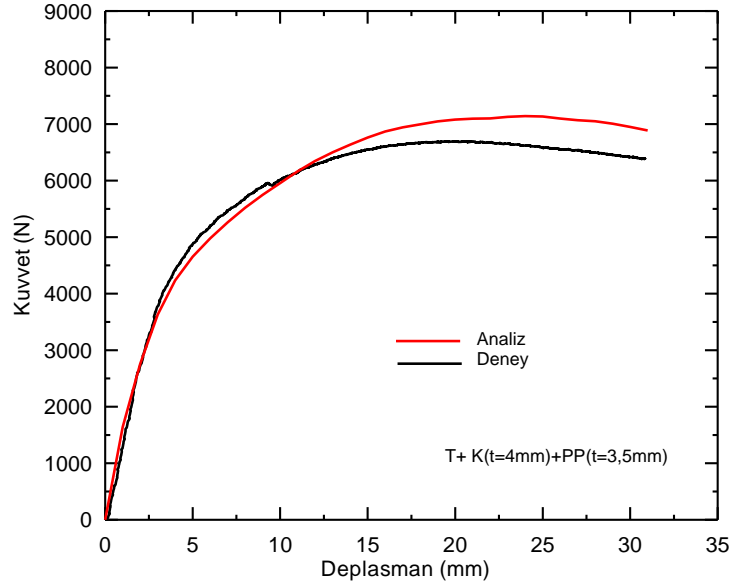
Şekil 80. T+K(4) yapısının analizi ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.



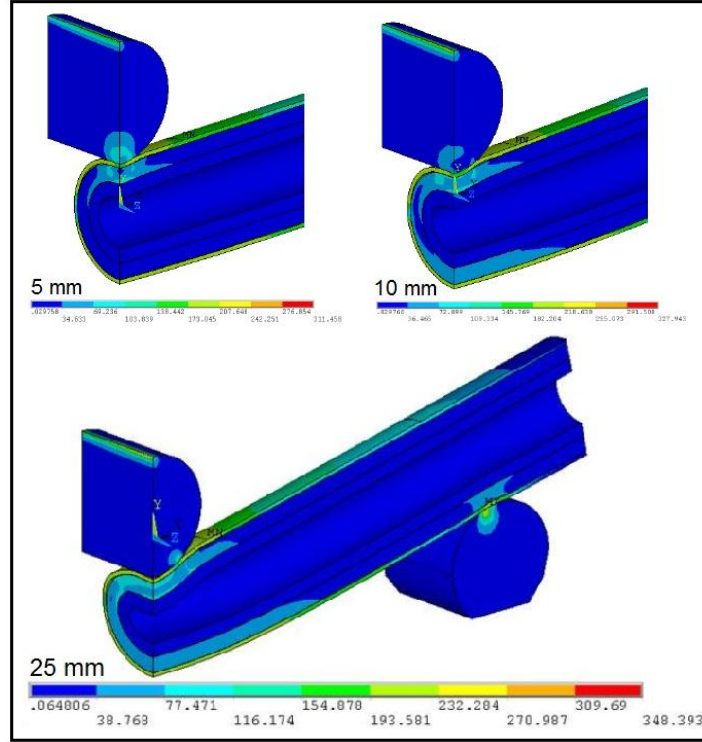
Şekil 81. T+K(4) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki von-Mises gerilme dağılımı.

4.1.3.2. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(3,5))

T+K(4)+PP(3,5) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 82'de verilmiştir. Grafikten maksimum kuvvetin belirlenmesindeki sapmanın %5 civarında olduğu tespit edilmiştir. Grafikler arasındaki kuvvet farkının maksimum olduğu noktada ise bu sapma %8,4'dür. Şekil 83'de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir. Şekilde 83'de görüldüğü gibi mandrelin temas ettiği en yüksek kuvvetin etkilediği nokta da gerilmeler yüksek seviyededir. Gerilme seviyelerinden de anlaşılacağı gibi, bu yapıda en çok yükü tüp kiriş ve kestamit boru taşımaktadır.



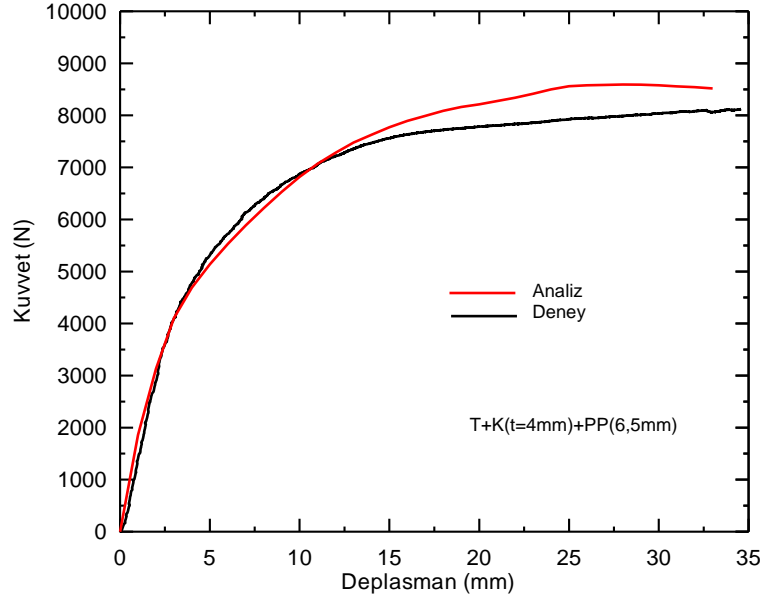
Şekil 82. T+K(4)+PP(3,5) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri



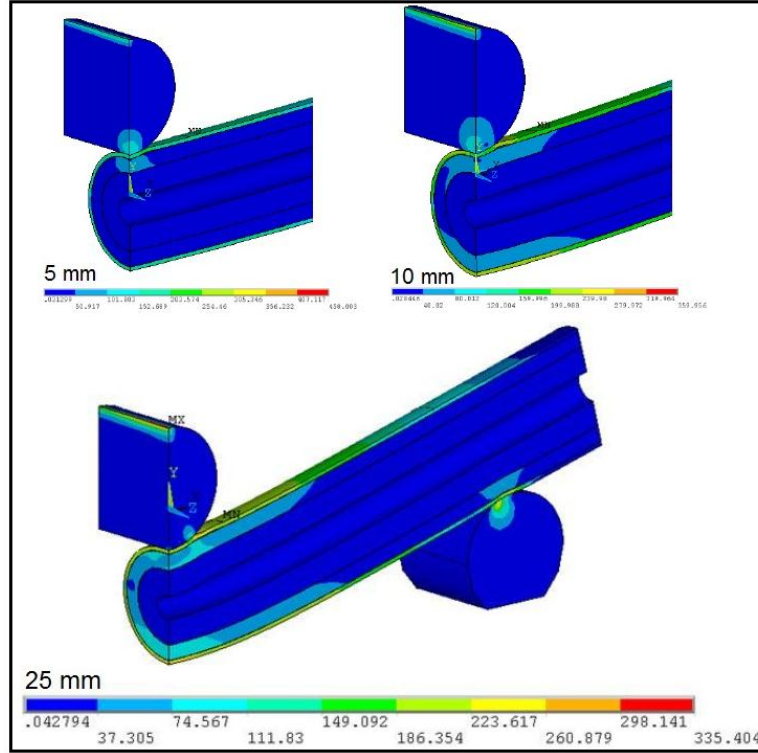
Şekil 83. T+K(4)+PP(3,5) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.

4.1.3.3. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(6,5))

T+K(4)+PP(6,5) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 84'de verilmiştir. Grafikten maksimum kuvvetin belirlenmesinde sapmanın %5,3 civarında olduğu tespit edilmiştir. Grafikler arasındaki kuvvet farkının maksimum olduğu noktada ise bu sapma %7,5 civarındadır. Şekil 85'de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir.



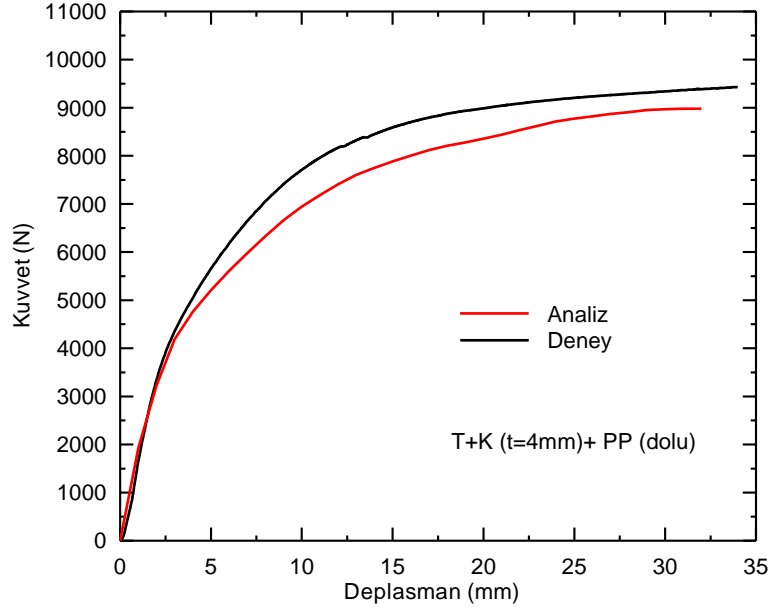
Şekil 84. T+K(4)+PP(6,5) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.



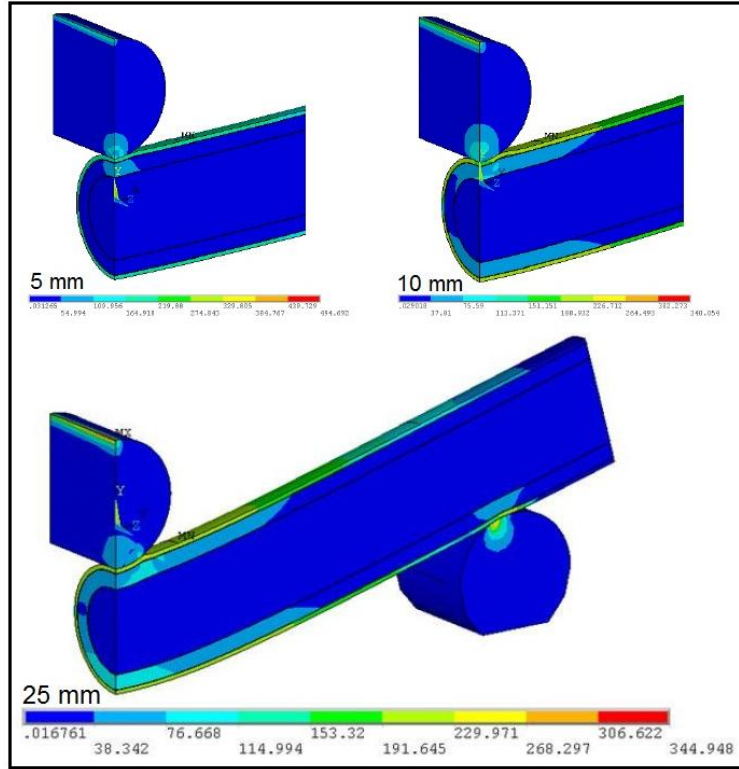
Şekil 85. T+K(4)+PP(6,5) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.

4.1.3.4. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(dolu))

T+K(4)+PP(10,5-dolu) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 86'da verilmiştir. Grafikten maksimum kuvvetin belirlenmesinde sapmanın %4,3 civarında olduğu tespit edilmiştir. Grafikler arasındaki kuvvet farkının maksimum olduğu noktada ise bu sapma %8 civarındadır. Şekil 87'de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir.



Şekil 86. T+K(4)+PP(10,5-dolu) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

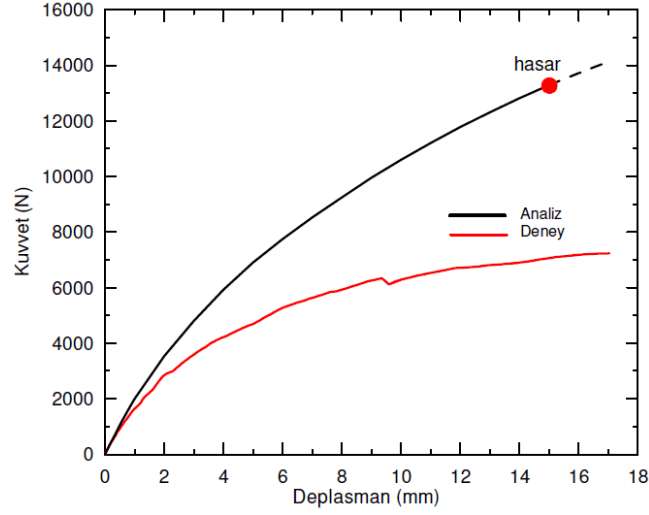


Şekil 87. T+K(4)+PP(10,5/dolu) yapısının 5, 10 ve 25 mm deplasmanlardaki Von-Mises gerilme dağılımı.

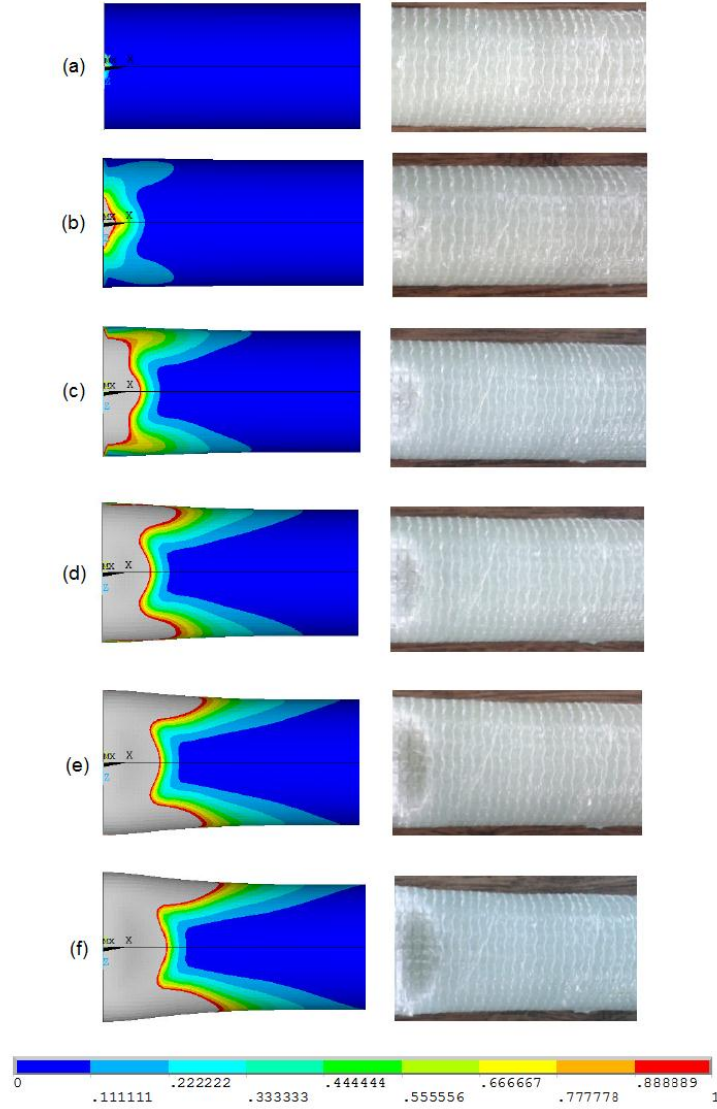
4.1.3.5. Dışarıdan Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Numuneler

Dışarıdan cam elyaf takviye edilen yapının analiz sonucu elde edilen kuvvet deplasman eğrisi deney verisiyle birlikte Şekil 88'de verilmiştir. Kuvvet-deplasman eğrisinde görüldüğü gibi grafiğin elastik kısmında analiz ve deney sonucu uyumlu olduğu görülmektedir. Deneyde elyaf tabakasındaki kopma ve katmanlar arası ayrılmalara bağlı olarak, kuvvetteki artış hızı artan deplasmanla azaldığı dikkat çekmektedir. Maksimum kuvvete ulaştıktan sonra kompozitin alt cidarındaki elyaf tabakasının tamamen ayrılmasına bağlı olarak kuvvetin düştüğü görülmektedir. Sonlu eleman analizi elyaf takviyeli kompozitlerde hasar durumunu

inceleyen Tsai-Wu hasar kriteri uygulanarak yapılmıştır. Bu kriterde Tsa-Wu hasar parametresi 1 değerini aşınca elyaf tabakasında hasar oluşmakta ve analiz geçerliliğini yitirmektedir. Cam elyaf takviyeli kompozit tüp kirişin üst cidarında mandrelin temas ettiği orta bölgenin analiz ve deney görünüşleri, farklı deplasmanlar için Şekil 89'da bir arada verilmiştir. Kompozit tüp kirişin aksenal doğrultuda yarısı alınmıştır. Karşılaştırma imkanı sağlamak için, analiz resimlerindeki parametre skala aralığı tüm resimlerde 0-1 arasında sabit tutularak görüntüler alınmıştır. Parametrenin 1 değerinden sonra hasar oluşmakta ve resimlerde sınır değeri aşıldığı için hasarlanan bölgeler gri renkte gözükmemektedir.

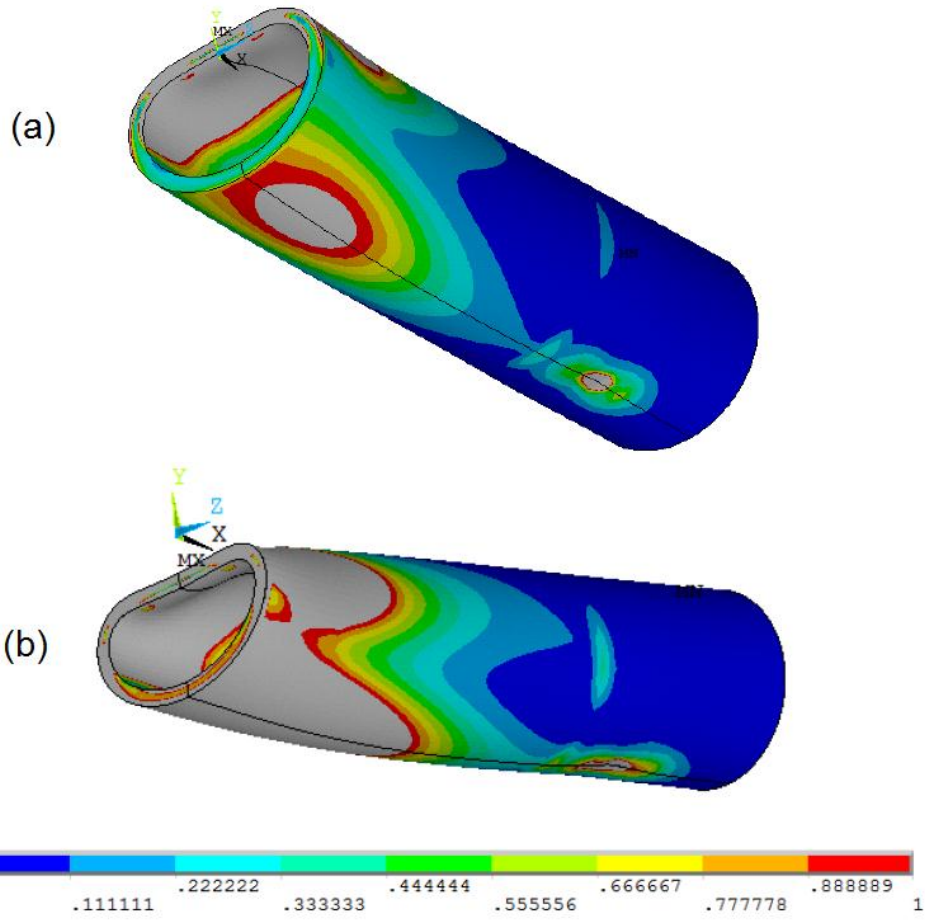


Şekil 88. CE+T yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.



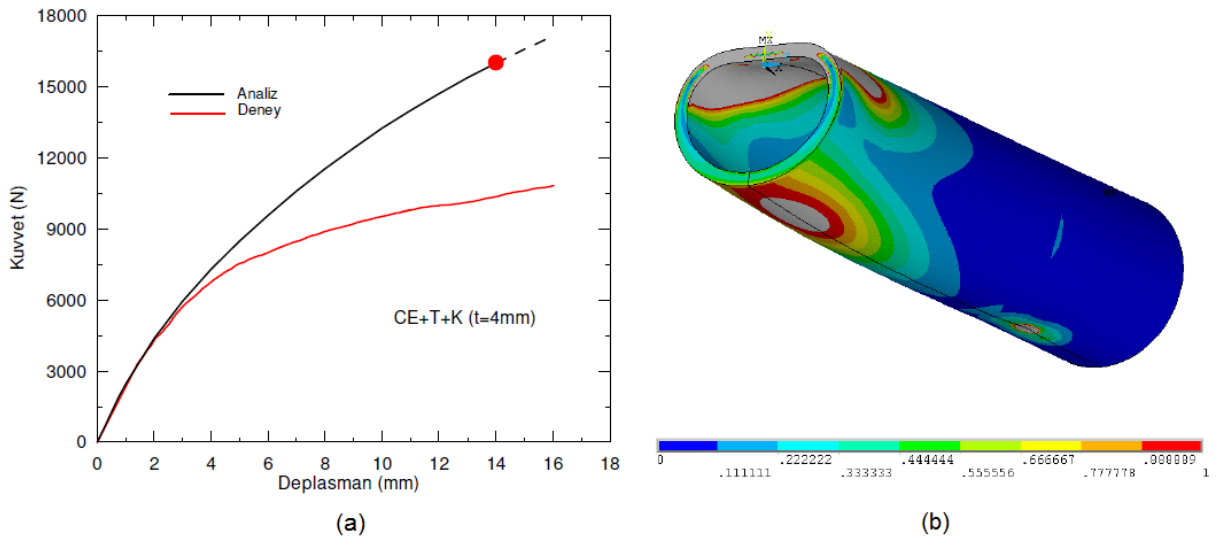
Şekil 89. Cam elyaf takviyeli 31 mm çaplı tüp kirşin farklı deplasmanlardaki analiz sonuçlarının hasar görüntüleri: (a) 1 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 15 mm, (e) 20 mm, (f) 25 mm.

Daha ilk deplasmanlarda mandrelin temasında dolayı üst cidarda hasarlanmalar oluşmaktadır ve hasar parametresi 1 değerini aşmaktadır. Deplasman ilerledikçe alt cidarda da elyaf kopması ve katmanlar arası ayrılmalara bağlı olarak hasar oluşmaktadır. 15 ve 25 mm deplasmanlara ait resimler Şekil 90'da verilmiştir. Hasar parametresi skalası 0-1 arasında kalacak şekilde ayarlanmıştır. 1 değerinden sonra renk skalası gri renge dönüşmektedir. 14 mm deplasmanda tüp cidarın alt cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır. 15 mm deplasmanda ise tüp yapının alt dış cidarında hasar ilerlemesi görülmektedir. Deneye ait eğriyle kıyaslandığında, 14 mm deplasmandan sonra kuvvetin şiddeti azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Hasarın olduğu deplasman grafikte kırmızı daireyle işaretlenmiştir. Bu noktadan sonra Tsai-Wu parametresi geçerliliğini yitirdiği için analize son verilmiştir. Kuvvetin oldukça düştüğü 25 mm deplasmana ait resimde kompozitin alt cidarının büyük bir kısmında hasar parametresinin 1 değerini aştığı görülmektedir.



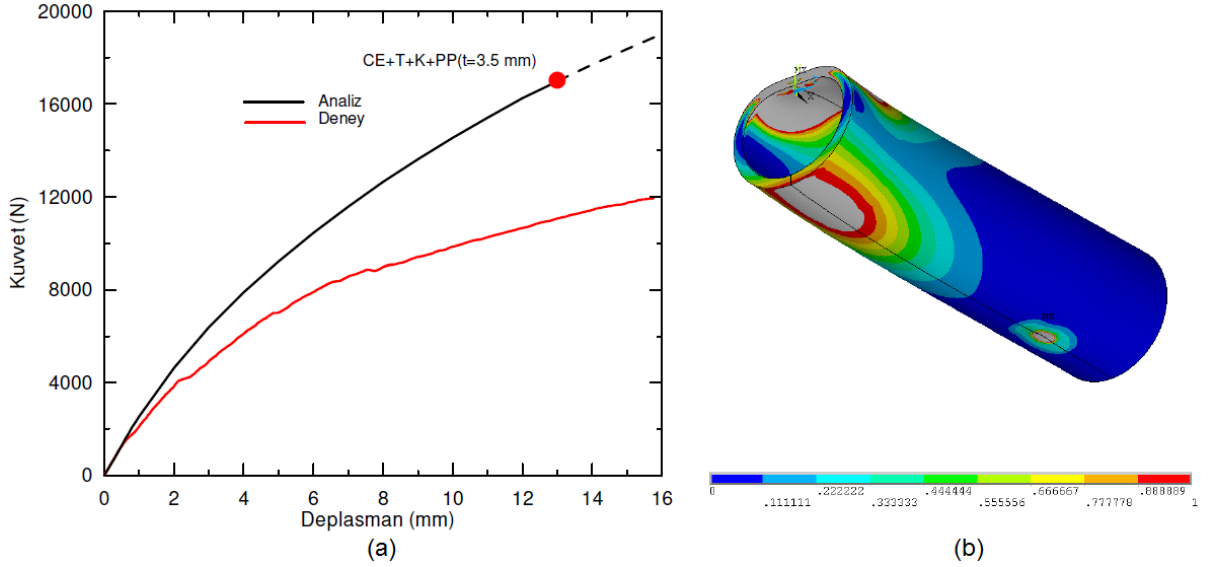
Şekil 90. CE+T yapısı için farklı deplasmanlara ait Tsai-Wu hasar parametreleri: (a) 15 mm, (b) 25 mm.

CE+T+K(4) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve 14 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 91'de verilmiştir. Bu yapıda, 14 mm deplasmanda alt dış cidarda hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır.



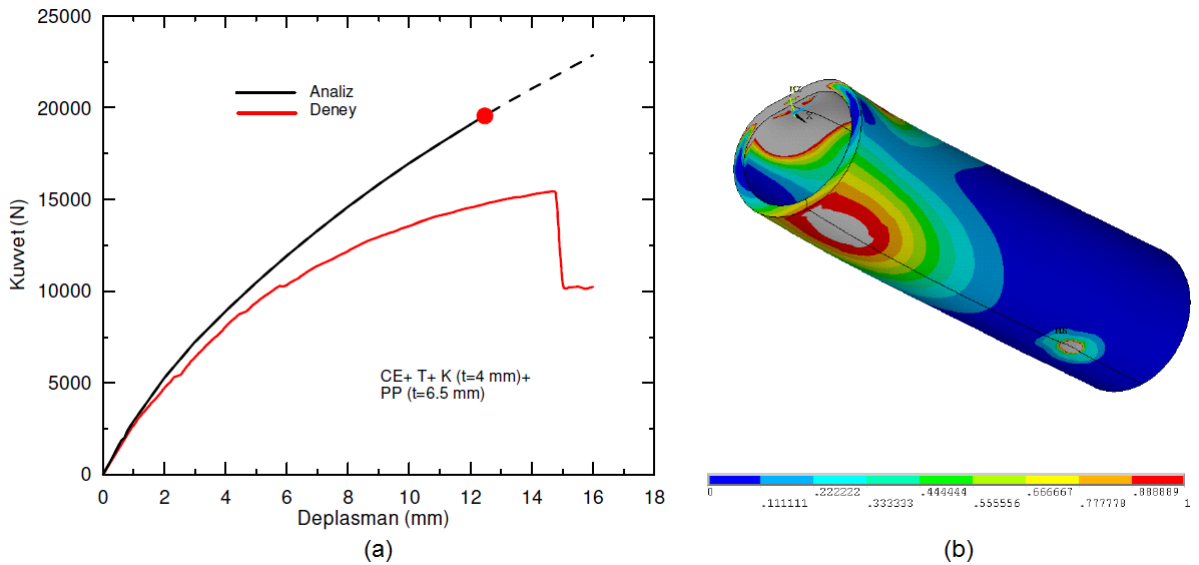
Şekil 91. CE+T+K(4) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 14 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.

CE+T+K(4)+PP(3,5) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve 13 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 92'de verilmiştir. Bu yapıda, 13 mm deplasmanda alt dış cidarda hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır.



Şekil 92. CE+T+K(4)+PP(3,5) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 13 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.

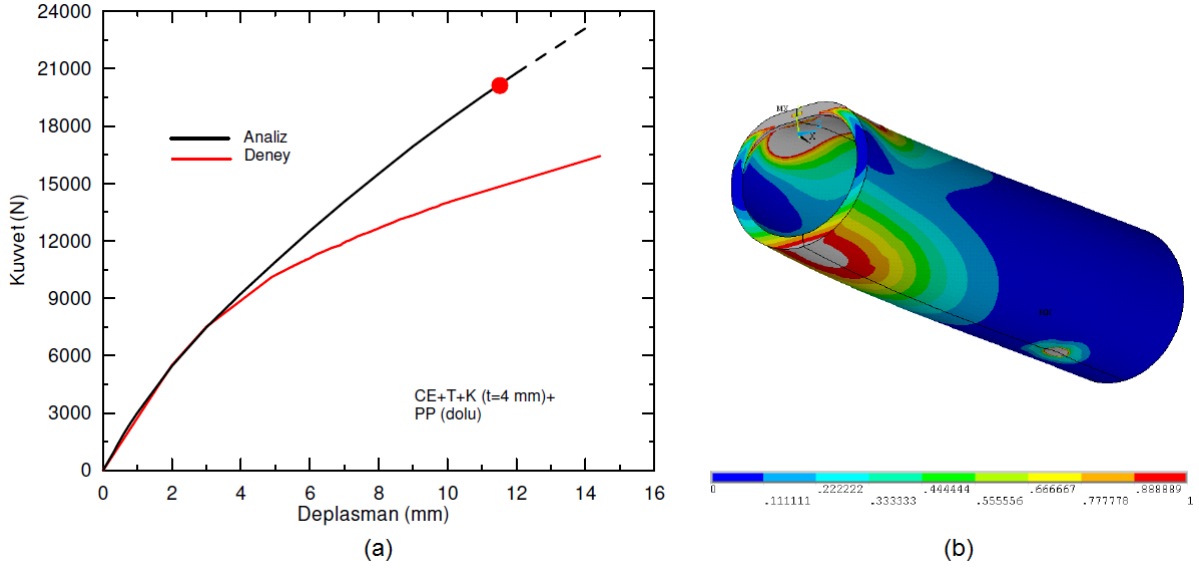
CE+T+K(4)+PP(6,5) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve 13 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 93'de verilmiştir. Bu yapıda, 12,5 mm deplasmanda alt dış cidarda hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır.



Şekil 93. CE+T+K(4)+PP(6,5) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 12,5 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.

CE+T+K(4)+PP(dolu) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri ve 13 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 94'de verilmiştir. Bu yapıda, 11,5

mm deplasmanda alt dış cidarda hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır.

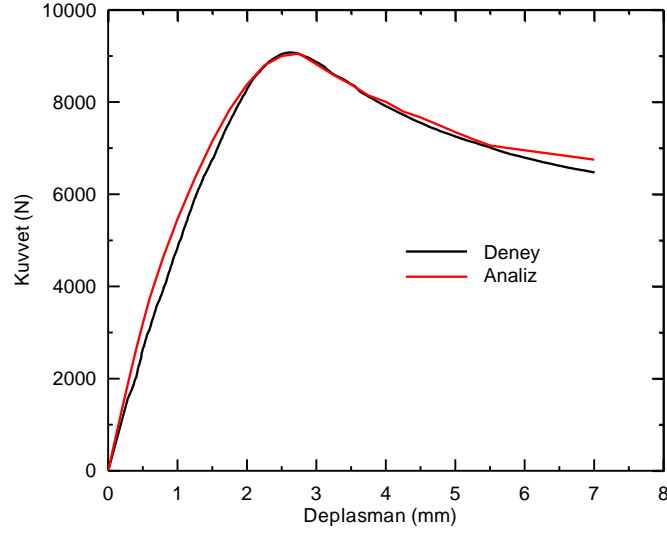


Şekil 94. CE+T+K(4)+PP(dolu) yapısına ait: (a) analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri, (b) 11,5 mm deplasman için Tsai-Wu hasar parametresi.

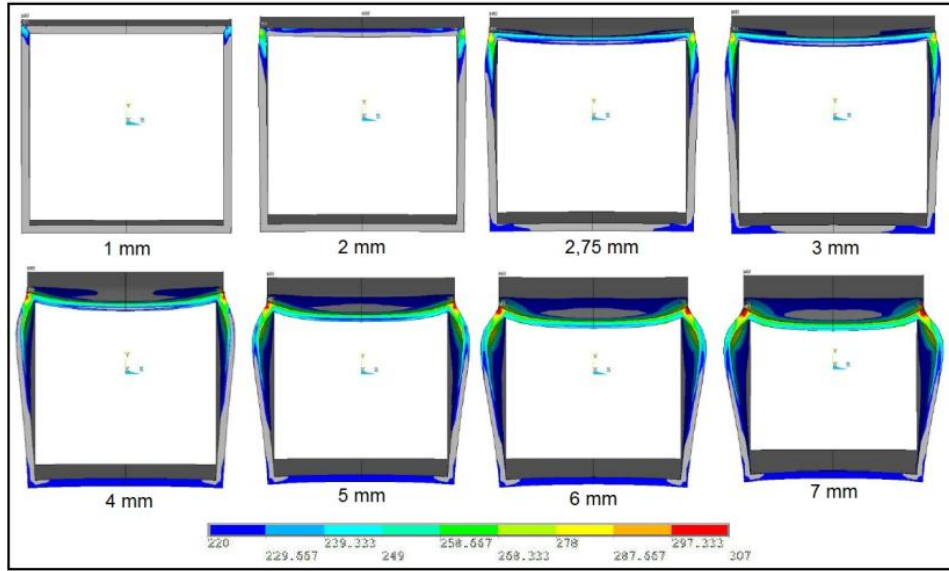
Elde edilen analiz sonuçları incelendiğinde, kompozit yapının rijitliği ve yük taşıma kabiliyeti artarken, alt dış cidarda hasarın olduğu deplasman değerinin ise azaldığı görülmektedir.

4.1.4. Kare Kesitli Tüp Kirişin Üç Nokta Eğme Deneyi Simülasyonu

Kare kesitli tüp yapının üç nokta eğme deneyi sonucu ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 95'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde deney sonuçları ve analiz sonuçlarının örtüştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar deney esnasında görülmeyen bazı hasar oluşumları ve gerilmeler hakkında daha sağlıklı yorumlar yapma imkanı sunmuştur. Yapılan analizler sonucunda mandrel temas noktasındaki gerilmelerin (Von-Mises) incelenmesi amacıyla bölgenin kesit görüntüsü farklı deplasman değerleri için Şekil 96'de toplu olarak verilmiştir. Şekil incelendiğinde, 0,5 ve 1 mm deplasmanlarda mandrel temas noktasında köşelerde oluşturduğu gerilme 2 mm deplasmanda üst yüzeye de yayılmakta 2,75 mm deplasmanda yük maksimum değerine ulaşan kuvvetin etkisiyle burkulmaya başlamaktadır. Burkulmanın da etkisiyle alt köşelerde de hasarlanma oluşumu başlangıcı göze çarpmaktadır. Takip eden deplasman değerlerinde mafsal oluşumunun hızlandığı, mafsal bölgesinde yan yüzeyler dışa, üst ve alt yüzeylerin içe doğru hareket ettiği görülmektedir. Deneysel çalışmalarda da malzemenin sertliğine göre gerilmenin yoğunlaştığı bölgelerde yırtılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Verilen görüntülere ait skalada alt gerilme değeri akma sınırı (220 MPa) olarak seçilmiştir. Gri bölgelerde akmanın oluşmadığı anlaşılmalıdır.

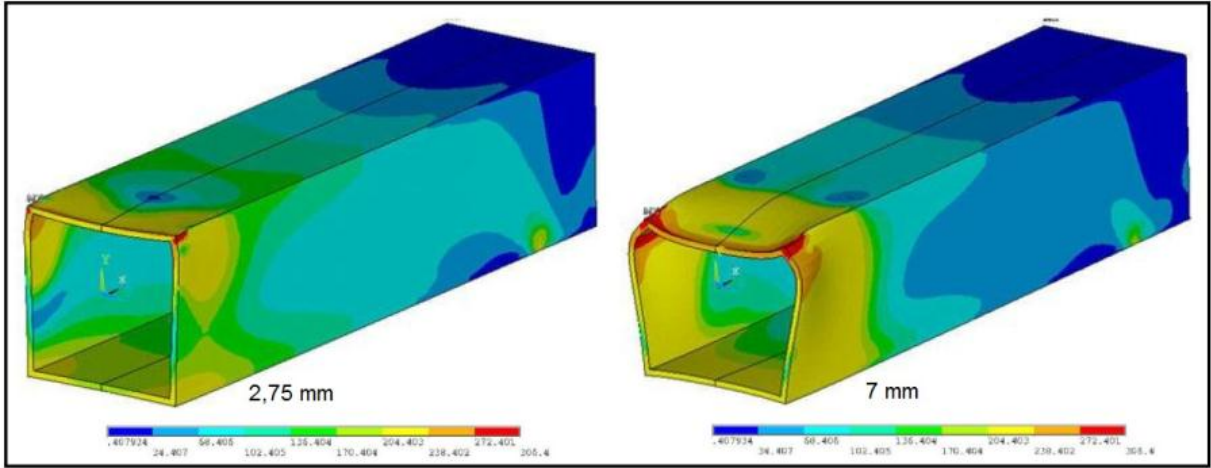


Şekil 95. Kare kesitli tüp kirişe ait deney ve analiz sonuçları.



Şekil 96. Deplasmana bağlı olarak mafsallık bölgesinde oluşan Von-Mises gerilmeleri.

2,75 ve 7 mm deplasmanlarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 97'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde gerilmelerin mandrel ve mesnet temas bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Eğme hareketiyle oluşan dönmeye üst ve alt yüzeylerde yoğunlaşan gerilmelerin, yan yüzeylerin ortasına doğru azaldığı görülmektedir. Numunenin maksimum yük taşıma değerine ulaştığı deplasman olan 2,75 mm'de kirişte akma sınırını geçen yani kalıcı deformasyona uğrayan üst temas noktaları ezilerek kirişin yan yüzeylerinin dışa burkulmasını tetiklemekte ve mafsallık oluşumu hız kazanmaktadır. Kirişin 7 mm deplasman değerine ulaştığı durumda kirişin çökmesinden dolayı yan ve üst yüzeylerdeki gerilme yoğunluğunun azaldığı, mandrel temas yüzeyi ile sınırlı kalan bölgede yoğunluğun arttığı görülmektedir. Şekil'de görülen gerilme dağılımı ve kalıcı deformasyon, kirişe yapılacak kısmi takviyeler konusunda aydınlatıcı bilgiler vermektedir.



Şekil 97. 2,75 ve 7 mm deplasmanlarda oluşan gerilme dağılımı.

4.2. Darbe Deneyi Simülasyonları

4.2.1. Dairesel Kesitli Tüp Kiriş

Çeyrek model için simülasyon neticesinde takviyesiz Al borunun çeyrek modeli için belirlenen enerji değeri yaklaşık 28,375 j değeri elde edilmiş ve tam model için ise $28,375 \times 4 = 113,5$ j'dür. Şekil 98'de çarpışma sürecindeki absorbe edilen iç enerji miktarının değişimi verilmiştir.

Çarpışma esnasındaki borunun kritik anlarına ait Von-Misses gerilme dağılımlarına Şekil 99'da yer verilmiştir.

Başlangıç anı: Analizin ilk başlangıcında, tam çarpışma öncesi koçun boru üzerine temas ettiği konumunu belirtmektedir.

0,0025 saniye: Koçun, boru üzerine teması ile birlikte, çarpışma süreci başlamakta ve temas bölgesinde ve çevresinde, çarpma sebebi ile gerilme yığılması meydana gelmektedir. Gerilme değeri 260 MPa civarındadır. Borunun alt kısmı ise daha fazla zorlanmış olması nedeniyle gerilmenin daha yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Akmanın kabaca borunun orta noktasında yoğunlaştığı ve kısmen uçlara doğru ilerlediği görülmektedir. Borunun mesnete temas ettiği bölgede, reaksiyon kuvvetiyle orantılı olarak, gerilmede de artış gözlenmektedir.

0,005 saniye: Koç ilerlemesiyle, boru üzerine uygulanan kuvvetin artması sonucu, beklendiği gibi gerilmede de artış kendini göstermektedir. Deplasmanla birlikte, akmanın boruda daha geniş bir alana yayıldığı görülmektedir. Boru orta noktasında, lokal deformasyondan dolayı, koçun boruya temas ettiği alan azalmaktadır. Borunun orta yan yüzeyinde katlanmadan dolayı oluşan deformasyonun şiddeti artmakta ve gerilme değeri 280 MPa'ı aşmaktadır.

0,0075 saniye: Boruda koçun neden olduğu deformasyon sürekli arttığından, akma alanının genişlediği bölgelerde gerilme düşüşü, daha önce akan cidarlarda ise gerilmede artış gözlenmektedir.

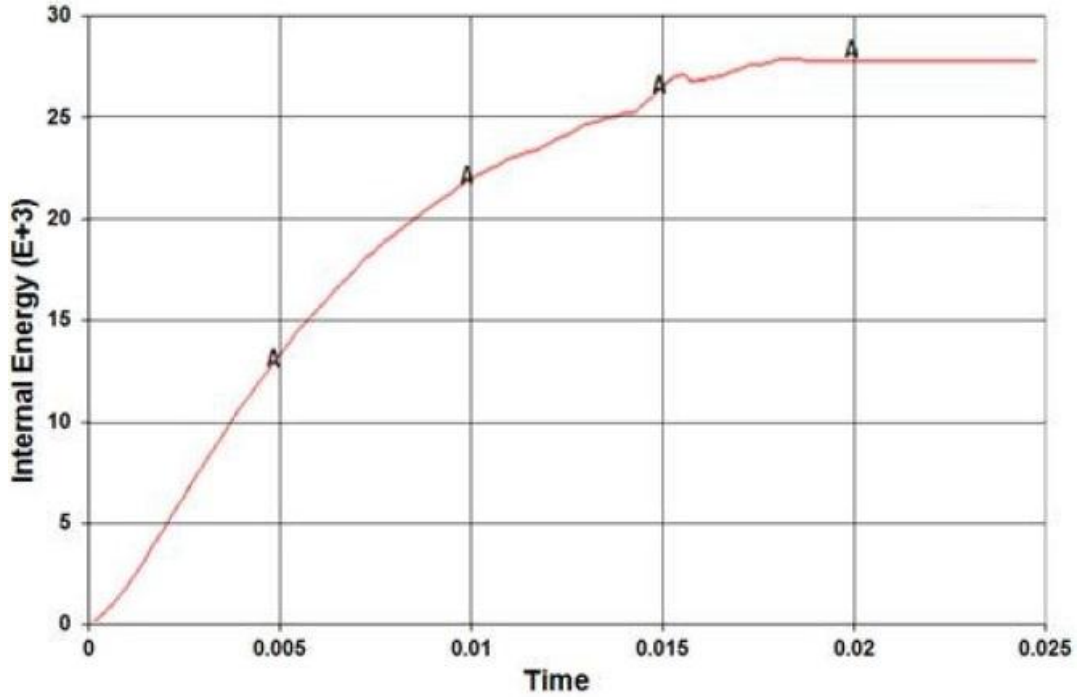
0,01 saniye: Boru orta noktasındaki gerilme artmaya devam etmektedir. Koç temas noktası boru orta noktasından sola doğru kaymakta ve bunun sonucu olarak boru eksenı boyunca deformasyona uğrayan bölgenin genişliği artmaktadır. Diğer taraftan, orta noktada oluşan katlanmanın şiddeti artarak devam etmekte, bu bölgenin yan yüzeyinde, cidarların birbirine kıvrılarak yaklaştığı noktada gerilme değeri 337 MPa'a ulaşmıştır.

0,0125 saniye: Bu aşamada, boru genelinde 10-15 MPa'lık bir gerilme artışı meydana gelmekle birlikte, yine önceki aşamalarda olduğu gibi, en büyük gerilme ortada cidarda katlanmanın olduğu kısımdadır. Yan yüzeyde katlanmanın meydana geldiği, köşeyi de içine alan noktadaki gerilme dağılımı ayrıca verilmiştir.

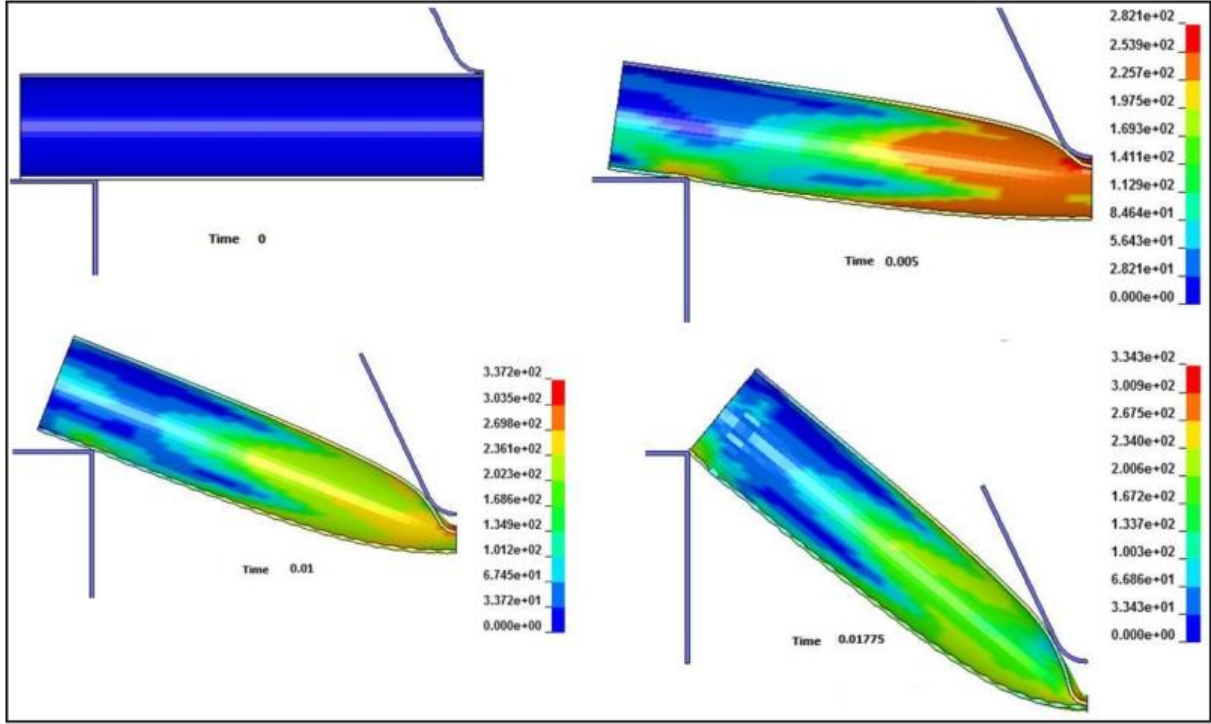
0,01775 saniye: Boru gövdesi tamamen mesnetler arasına girmeye başlamıştır. Yapı serbest olarak mesnetler arasında hareket ettiği için, boru gövdesindeki gerilmeler daha önce oluşan plastik deformasyondan kaynaklanmaktadır. Görüldüğü gibi, orta noktadaki cidarlar birbirlerine temas etmiş ve bu noktada bir miktar daha gerilmenin yükseldiği anlaşılmaktadır.

Bu sonuçların ışığı altında aşağıdaki irdelemeleri yapmak mümkündür; genel olarak boyuna tüp yapının yarısının modellendiği bu çalışmada, çarpışmanın etkisiyle tüp yapının orta noktasından uçlara doğru %60'ının plastik şekil değişimine uğradığı tespit edilmiştir. Yapıda en büyük deformasyon, cidarların birbirlerine yaklaştığı ve nihayet temas ettiği boru orta noktasında meydana gelmektedir. Bu davranış üç nokta eğme deneylerinde görülen geometrik şekil değişimiyle aynıdır.

Tüp yapının orta noktasındaki deformasyonu engelleyici yönde, kırılma oluşturmaksızın yapılacak olan takviyelerin daha fazla enerji absorbe edeceğini söylemek mümkündür.



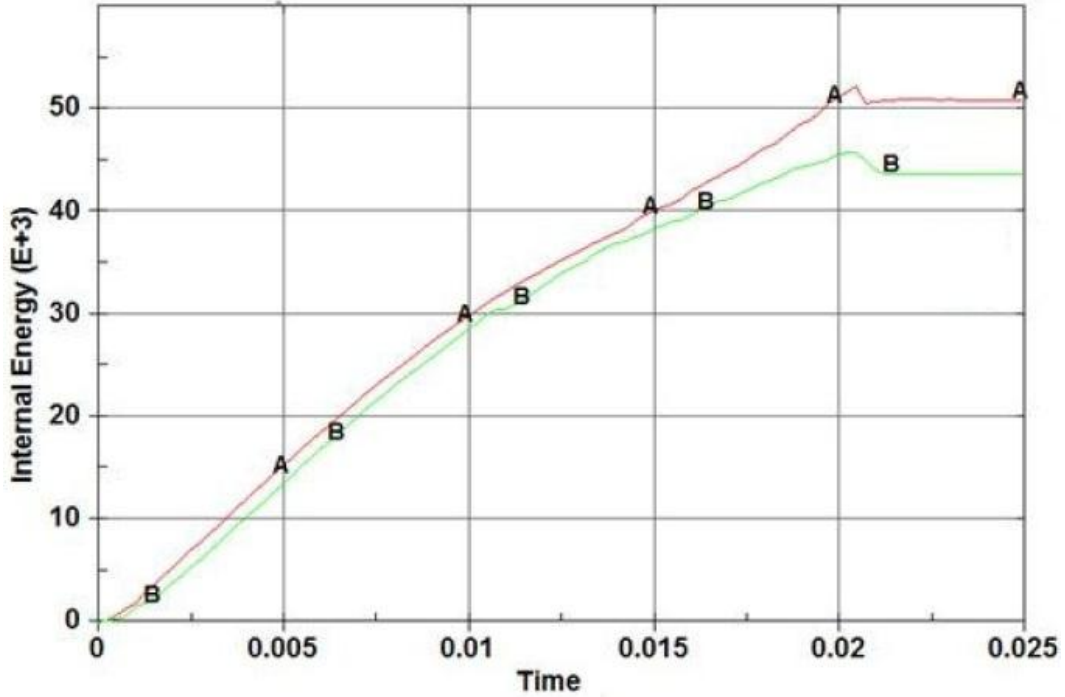
Şekil 98. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T).



Şekil 99. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.2. Tüp+Kestamit (T+K(4))

Bu kombinasyon için simülasyon sonuçlarına göre polimer esaslı ve alüminyum gövdeye ait enerji değerleri sırasıyla; $46 \times 4 = 184$ J ve $52 \times 4 = 208$ J olup, enerjileri toplamı 392 J'dür. İç enerjinin çarpışma süresiyle değişim grafiği Şekil 100'de verilmiştir.



Şekil 100. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T, B: K)

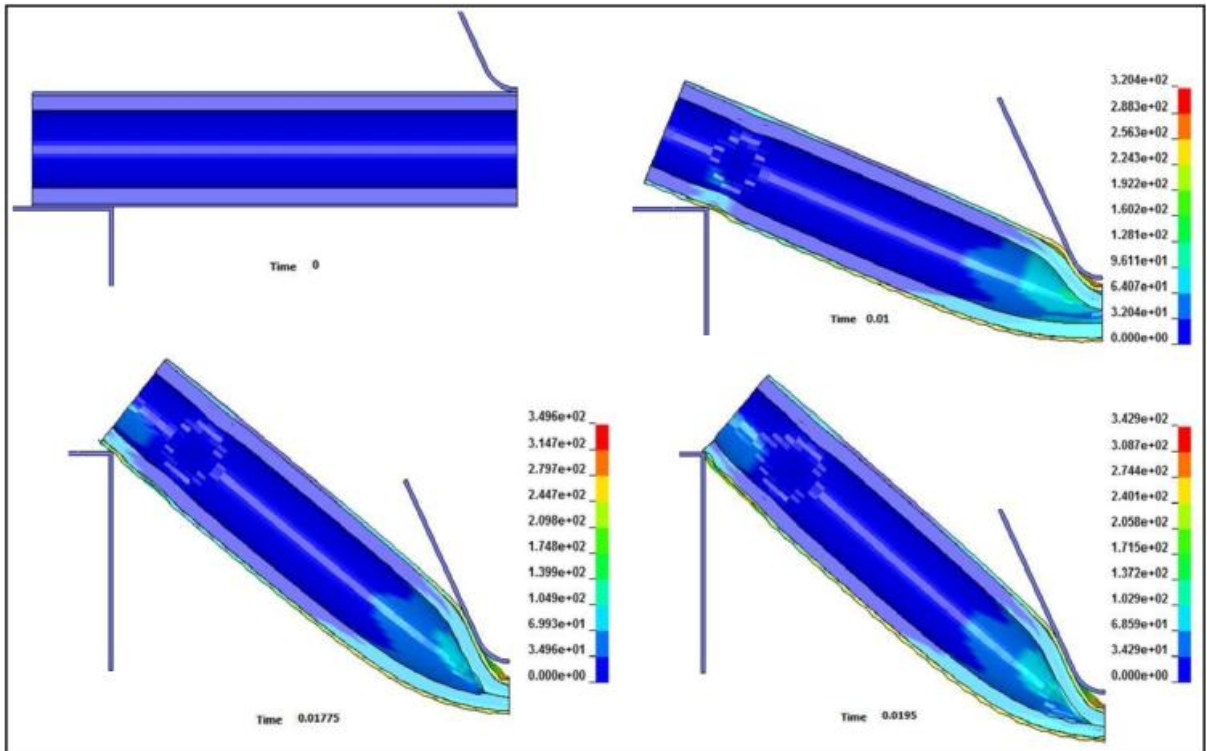
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 101'de verilmiştir.

Başlangıç anı: 4 mm kestamit takviyeli Al borudan meydana gelen numunenin tam çarpışma temas anındaki görüntüsü verilmiştir.

0.01 saniye: Bu durumda numunenin orta kısmında gerilme yığılması meydana gelmekte ve alüminyum üzerinde 320 MPa'lık gerilmeye neden olmaktadır. İç kısımda takviye olarak kullanılan kestamit de ezilmenin etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Mesnet kısmında oluşan reaksiyon kuvveti ise alüminyumda ezilmeye neden olmakta, ayrıca kestamitin alüminyuma destekleyecek şekilde gerilmeyi dağıttığı anlaşılmaktadır. Takviyesiz boruda aynı çarpma anı için alüminyumdaki deformasyonlar kıyaslandığında, kestamitin varlığı metal tüpün deformasyonunu sınırladığı açık bir şekilde görülmektedir.

0.01775 saniye: Bu zaman dilimi için, takviyesiz Al boru ile yapılan bir önceki analiz sonuçlarında, numune mesnet arasına girmiş idi. Görüldüğü gibi kestamit takviyesinin, yapının mesnet aralığına girme süresini uzatmıştır (0,0195 saniye). Bu bir bakıma, deformasyon için harcanan enerjin de arttığına işaret etmektedir.

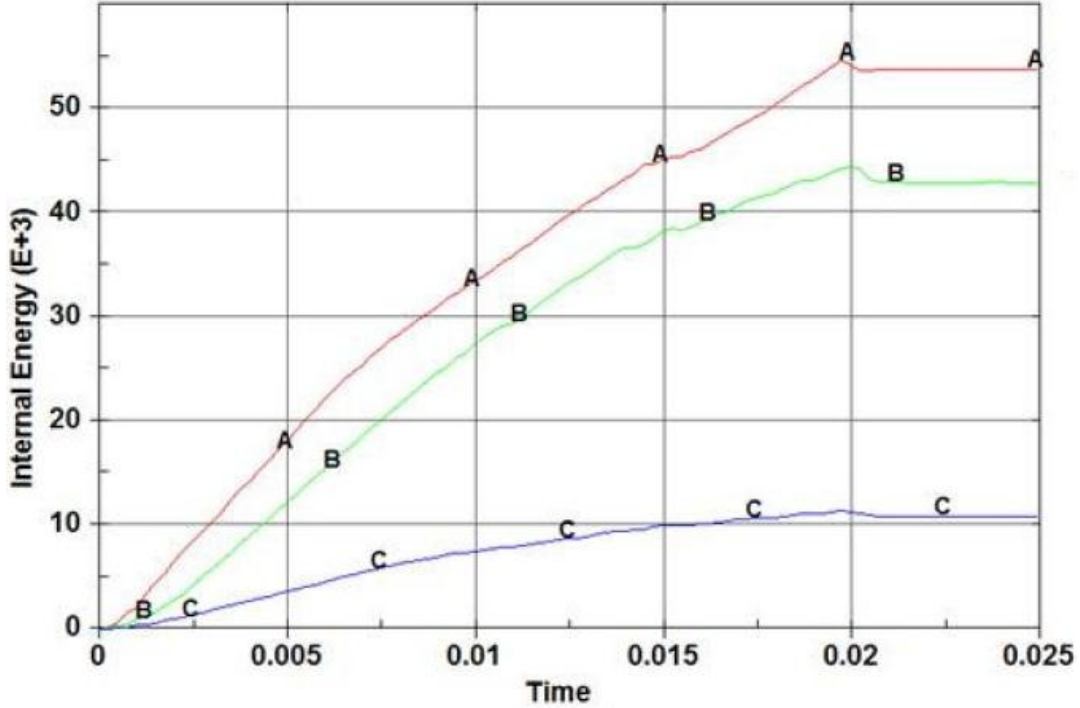
0.0195 saniye: Bu çarpma anında, numune tam olarak mesnet arasına girmektedir. Gerilme değeri 0,01775'inci saniyede 349 MPa iken, bu konum için 342 MPa değerine düşmektedir. Deformasyonun etkisiyle birbirlerine yaklaşan kestamit yüzeyleri, şekil değiştirmeye çalışan metal cidarın bu davranışını kısıtlamaktadır. Bu, bir bakıma tüp yan yüzeylerinin aşırı derece plastik şekil değiştirerek yırtılmasını engellemekte, dolayısıyla da metal tüpteki hasar mekanizmasının engellenmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 101. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.3. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(3,5))

Bu grup deney numuneleri için simülasyon sonucu enerji değerleri $11,5 \times 4 = 46$ J (PP), $44,5 \times 4 = 178$ J (Kestamit) ve $55 \times 4 = 220$ J (Al Boru) olup, toplam enerji 444 J'e eşittir. Şekil 102'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 102. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: T, B: K, C: PP/3,5).

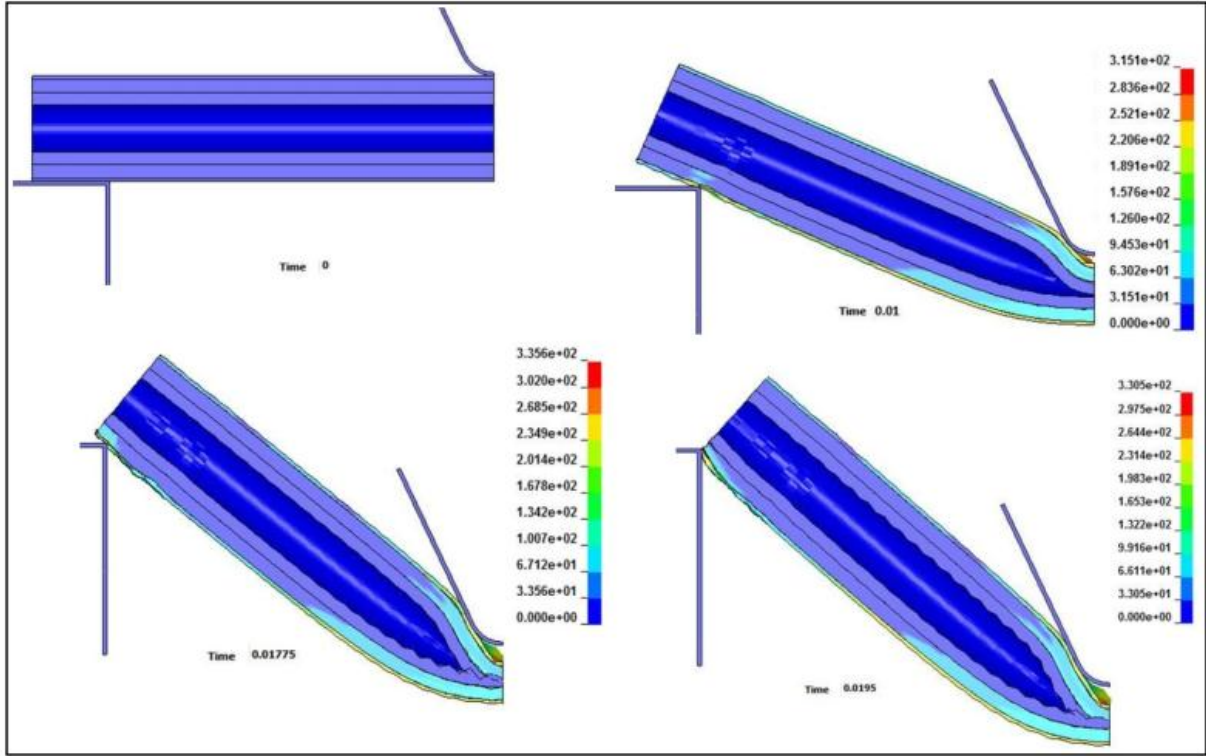
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 103'da verilmiştir.

Başlangıç anı: Alüminyum, kestamit ve 3,5 mm kalınlığında PP katkılı kompozit malzemenin koçun teması esnasındaki simülasyon görüntüsü.

0.01 saniye: Bu durumda numunenin orta kısmında gerilme yığılması meydana gelmekte ve alüminyum üzerinde 320MPa'lık gerilmeye neden olmaktadır. İç kısımda takviye olarak kullanılan kestamit de ezilmenin etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Diğer taraftan, PP malzemenin radyal yönde şekil değişimi sınırlandırılmadığı için, gerilmenin maksimum 30 MPa mertebelerinde kaldığını söylemek mümkündür. Kompozit çubuğun orta noktasındaki, kestamitin radyal yönde daha az şekil değiştirdiği dikkate alındığında, kestamitin PP tarafından desteklendiği anlaşılmaktadır. Bir önceki kompozitin aynı çarpışma anı için yapılacak karşılaştırılmada bu durum açık bir şekilde görülmektedir. Bu irdeleme ana taşıyıcı görevi gören alüminyum boru içinde geçerlidir.

0.01775 saniye: Numunenin orta noktasındaki katlanma bölgesindeki maksimum gerilmenin değeri bir miktar artmaktadır. İçerden yapılan takviyenin etkisiyle, boru alt cidarı kestamitin etrafında sarılma eğilimi göstermektedir. Buradaki sarılma yarıçapı, sadece kestamitin takviye edildiği kompozit yapıya göre daha büyük olduğu dikkat çekmektedir.

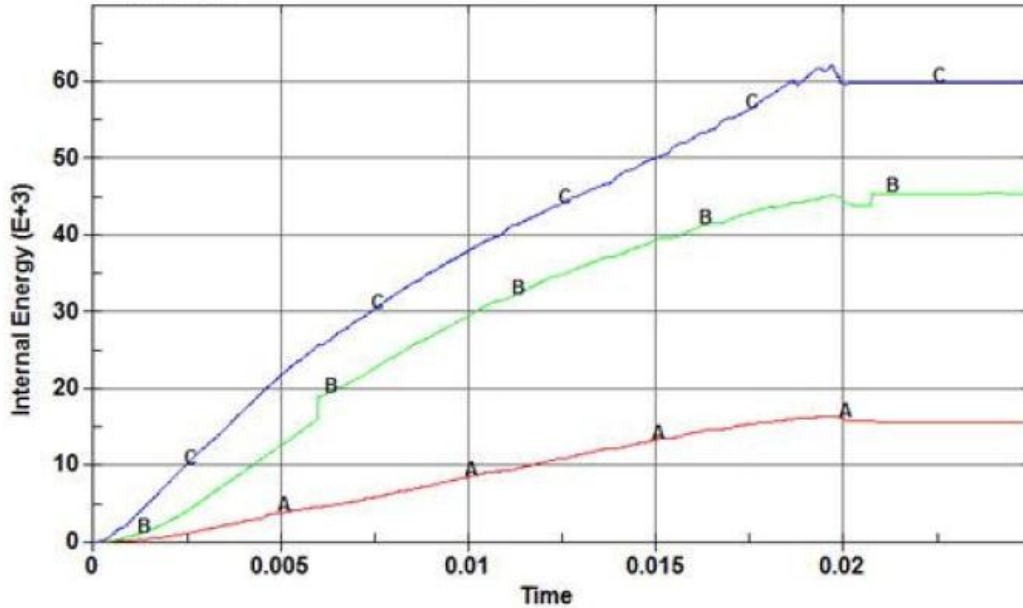
0.0195 saniye: Numune mesnet aralığına girmiş olması nedeniyle, genel olarak gerilme değerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. Yapılacak irdelemeler diğer grup numunelerinki ile hemen hemen aynıdır.



Şekil 103 .Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı

4.2.4. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(6,5))

6.5 mm'lik PP ve Kestamit takviyeli Al Boru ile absorbe edilmiş enerji miktarı bu takviyeli boru numunesinin de kırılması ile 3. numunede olduğu gibi, beklenenin altında yanlış bir şekilde düşük çıkmıştır. Simülasyon sonucu yaklaşık $16 \times 4 = 64$ J (PP), $46 \times 4 = 184$ J (Kestamit) ve $62.5 \times 4 = 250$ J (Al Boru) enerjileri toplamı beklenildiği üzere kırılma görülmeyerek deneysel çalışmadan fazla çıkmış ve 498 J'lük bir enerji absorbe edilmiştir. Şekil 104'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 104. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: PP/6,5, B: K, C: T)

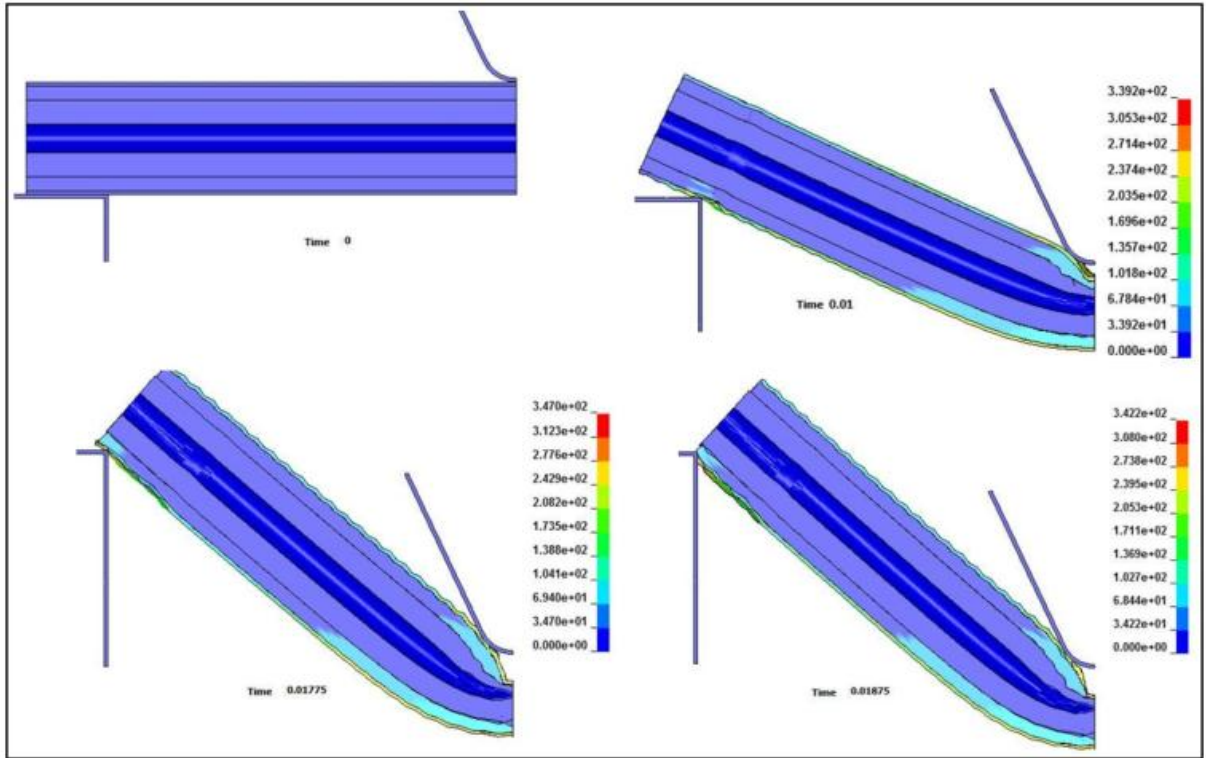
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 105'de verilmiştir.

Başlangıç anı: Alüminyum, kestamit ve 6,5mm PP takviyeli kompozit numenin çarpışma öncesi görüntüsü.

0,01 saniye: Diğer yapılarda olduğu gibi, numunenin orta noktasında deformasyona bağlı olarak gelişen gerilme değeri 339 MPa olup, bu gerilme değerinin önceki yapılarıncıyla kıyaslandığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Alt kısımdaki kestamit cidarındaki gerilmenin etkin olarak görüldüğü alan, bir önceki kompozite göre daha dar bir alanı kapladığı ve gerilme değerinin bir miktar daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

0,01775 saniye: Maksimum gerilme değeri üçüncü modeldekine göre, 335 MPa'dan 347 MPa'a çıkmıştır. Boru alt cidarının kestamitin etrafında sarılma yarıçapının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Burada PP'nin cidar kalınlığının artması, sonucu mesnede temas eden boru cidarındaki gerilmenin, reaksiyon kuvvetleriyle orantılı olarak artmaktadır.

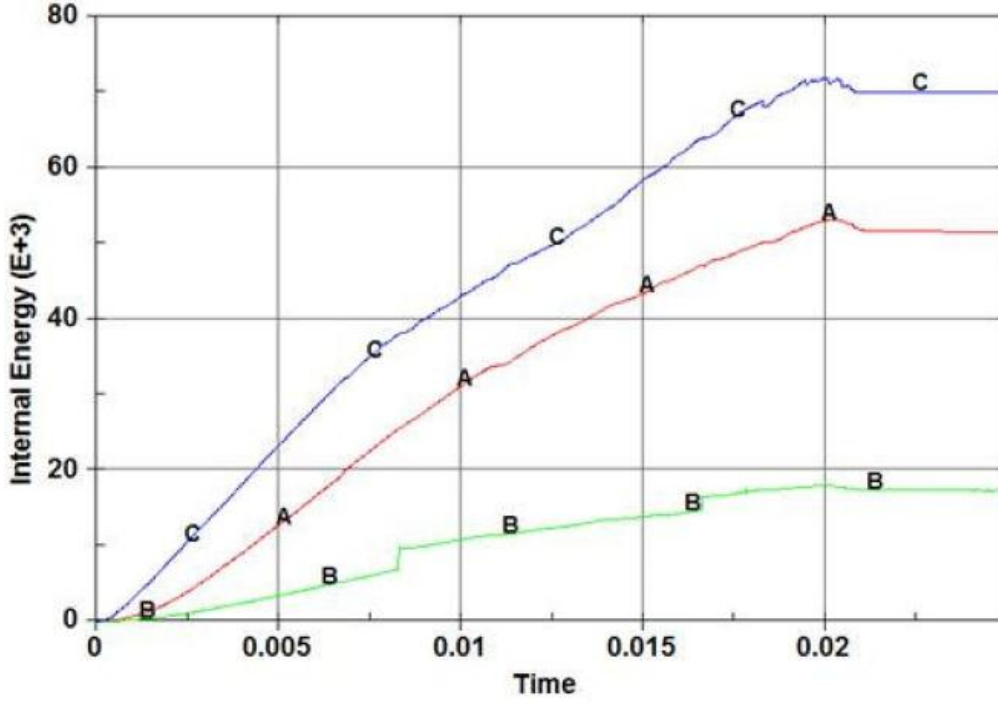
0,01875 saniye: Parça mesnet aralığına bir önceki kompozit numuneye göre daha erken girdiği görülmektedir. Bunun nedeni; yüksek reaksiyon kuvvetinin boru ucuna deforme etmesidir. Bu kompozit yapının mesnede girdiği an itibariyle, diğer numunelere göre PP malzemesinde gelişen gerilmenin arttığı dikkat çekmektedir. Bu bir bakıma numunenin daha fazla zorlandığı, yani daha fazla enerji absorbe ettiğini işaret etmektedir.



Şekil 105. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.5. Tüp+Kestamit+Polipropilen (T+K(4)+PP(dolu))

Kestamit ve PP (dolu) takviyeli Al borunun simülasyon sonucunda sırasıyla enerji değerleri ; $53 \times 4 = 212$ J (Kestamit), $18 \times 4 = 72$ J (PP) ve $72 \times 4 = 288$ J (Al Boru) olup, toplam enerji 572 J'dür. Şekil 106'da çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 106. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (A: K, B: PP/dolu, C: T).

Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 107'de verilmiştir.

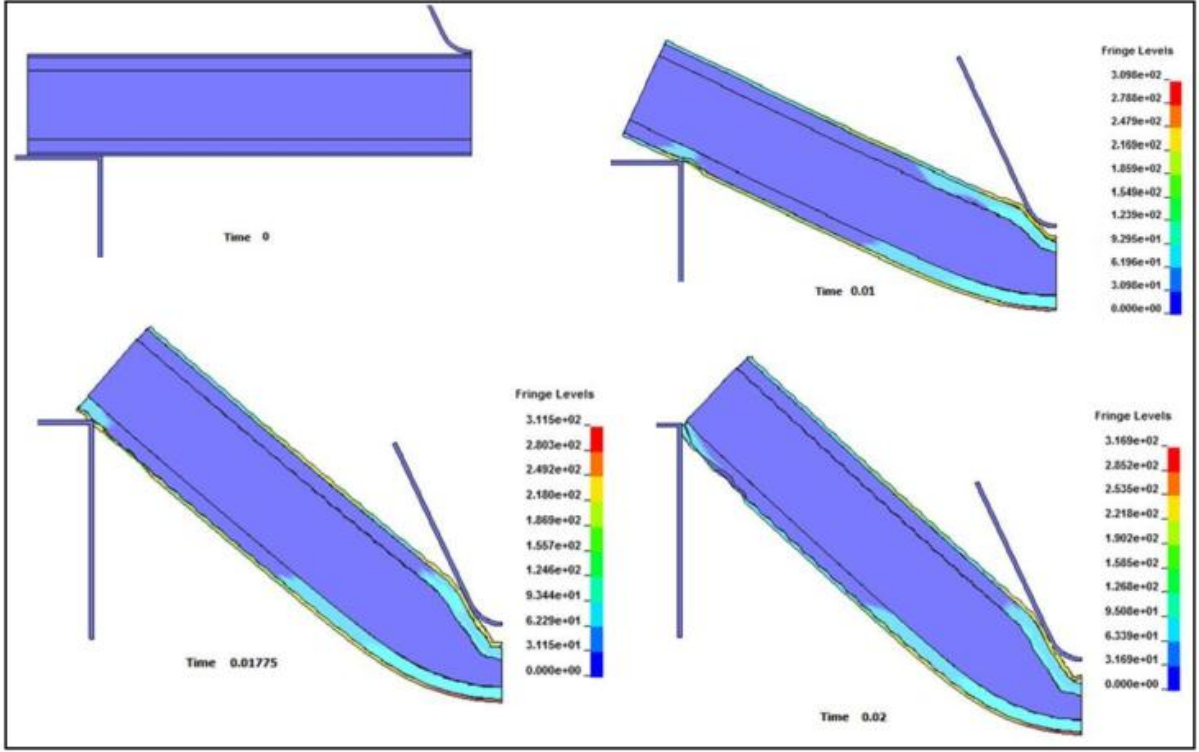
Başlangıç anı: Alüminyum, kestamit ve tam dolu PP numunenin çarpma temas anındaki pozisyonu.

0,01 saniye: Bu safhada, numune içten çok daha rijit bir şekilde desteklenmiş olması nedeniyle, orta noktada, tüp yüzeyinde gelişen gerilme değeri hızla yükselmiştir. Bu numune neredeyse rijit denecek kadar dolu olmakla beraber farklı yoğunluklara sahip kademeler içerdiğinden çarpışma sürecinde özellikle dördüncü numuneye benzer fakat beklendiği gibi artan şekilde tepki vermiştir.

0.01775 saniye: Artan rijitliğe bağlı olarak, diğer numunelerdekine tersine boru alt cidarının büyük miktarda zorlandığı görülmektedir. Bu kompozit yapıda koçun üst yüzeyde lokal deformasyonu oluşturamaması ve boru cidarının kestamit etrafında diğerlerine göre daha büyük yarıçaplı sarılmasıyla açıklanabilir.

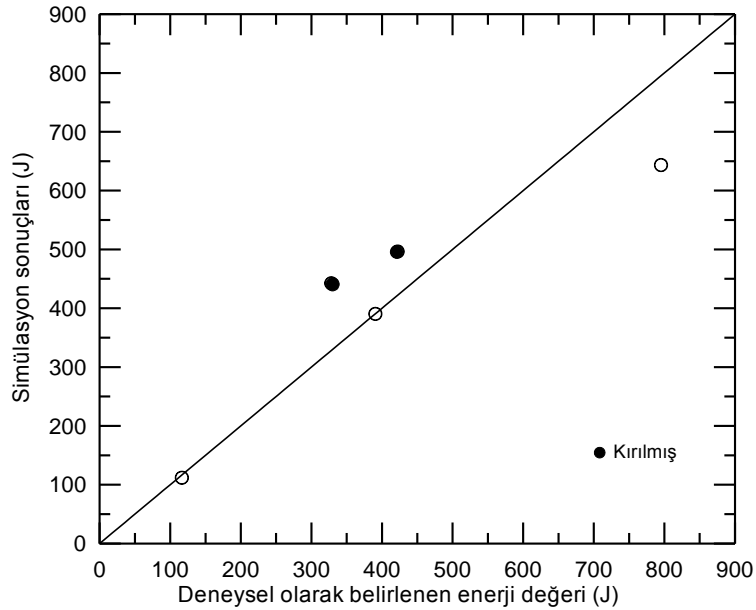
0.02 saniye: Bu kompozit yapı mesnetler arasına diğerlerine göre en uzun süreçte girmektedir. Bu davranış bir bakıma kompozit yapının belirli bir şekli alması için daha fazla direnç göstermesi, dolayısıyla da daha büyük enerji harcanmasıyla ilişkili olduğundan, bu yapının enerji absorbe etme kabiliyetinin maksimum olması beklenebilir.

Tüm simülasyon neticelerinden; takviyenin etkinliğine bağlı olarak deformasyon numunenin orta noktasında, koçun temas ettiği bölgede veya boru alt yüzeyinde oluşmaktadır. Bükülmenin daha belirgin bir şekilde görüldüğü takviyesiz boruda, ilerleyen koç hareketiyle boru cidarlarının birbirlerine yaklaşarak tüp yapının kolayca büküldüğü anlaşılmıştır. Tüp yapının orta noktasındaki deformasyonu engelleyici yönde, kırılma oluşturmaksızın yapılacak olan takviyenin daha fazla enerji absorbe edeceği açıktır. Takviye edilmiş numunelerde, deformasyona uğrayan kesit/yüzey alanı genişlemekte, tüp yapının orta noktasından uçlara doğru yaklaşık %60'ını aşan bir oranda plastik şekil değişimi gerçekleştiği tespit edilmiştir.



Şekil 107. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı

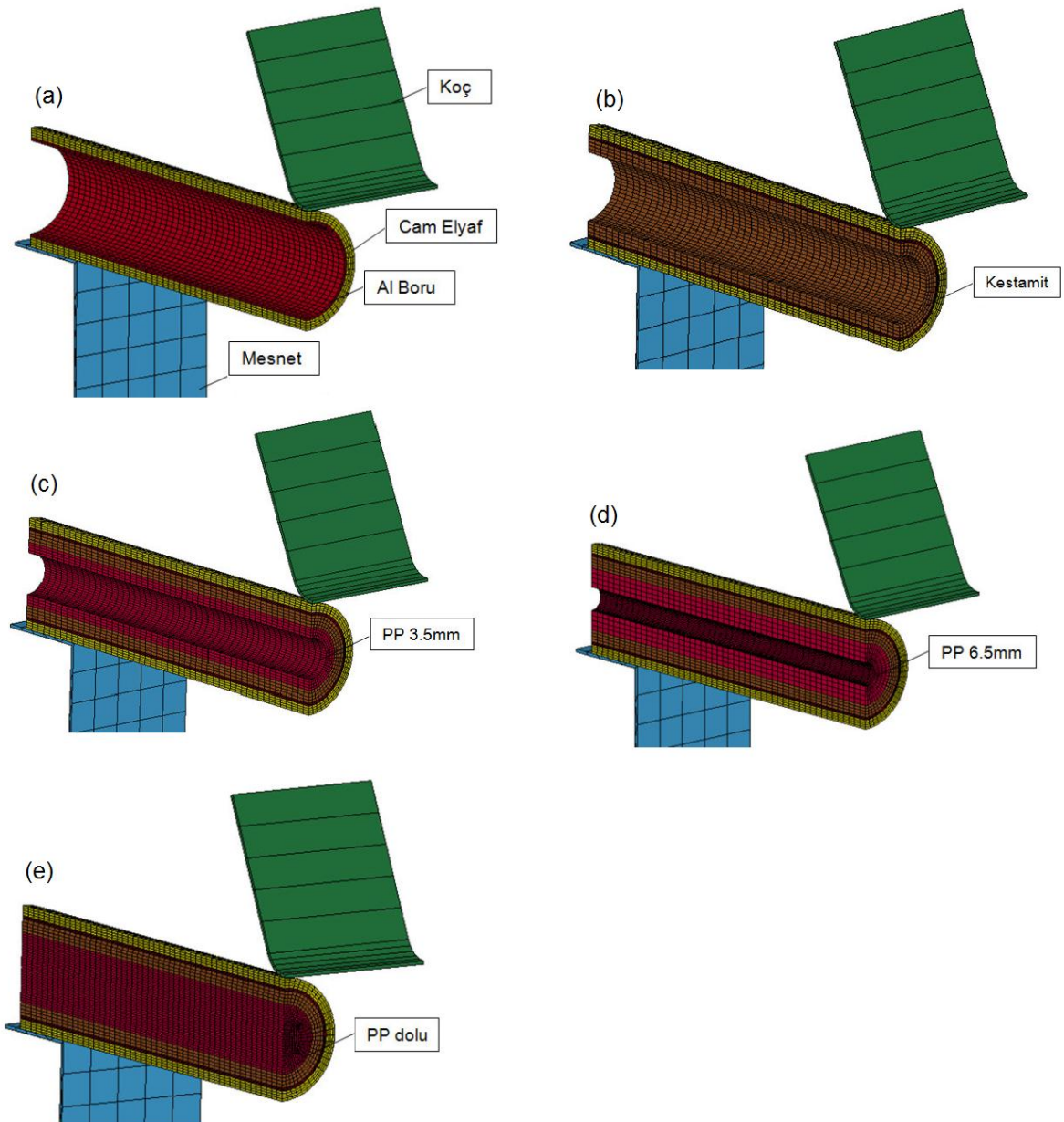
DeneySEL ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla Şekil 108'deki grafik çizilmiştir. Görüldüğü gibi, kırılmayan numunelerde, simülasyon yardımıyla belirlenen enerji değerlerinin dENEYSEL verilerle oldukça uygun olduğu, ancak kırılmış numunelerde absorbe edilen enerji değerlerinin, simülasyon neticesinde elde edilenlere göre bir miktar daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak, yapılan analizlerin absorbe edilen enerji değerinin belirlenmesinde başarılı olduğu söylenebilir. (T+K+PP dolu) numune için analize ait enerji değerinin, dENEYSELLE göre bir miktar daha düşük çıkması, muhtemelen simülasyon sürecindeki PP'nin mesh yapısının aşırı şekil değiştirmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 108. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.6. Cam Elyaf+Tüp (CE+T)

DeneySEL çalışmayı simülasyon ortamında meydana getirirken, dış çapı 31 mm ve cidar kalınlığı 1 mm olan dıştan cam elyaf takviyeli Al borunun analiz için hazırlanan CAD modelleri sırası ile gösterilmiştir. Çalışmanın sonunda yapılacak karşılaştırmada da simülasyonu gerçekleştirilen bu beş kombinasyona ait deney verileri kullanılacaktır. Tam model için ise boru boyu 270 mm ve mesnet aralığı da 225 mm olarak tüm test ve simülasyon koşullarında aynı alınmıştır. Simülasyonda kullanılan tüm modeller için mesnet ve koçun basitleştirilmiş hali çizilmiştir (Şekil 109). Bir numaralı modelde dıştan cam elyaf takviyeli Al boru modeli yapılmıştır. İkinci modelde ise 4 mm cidar kalınlığına sahip kestamit ilk kombinasyonun içerisine ilave edilmiştir. Üçüncü CAD modelinde, ikinci modelin iç kısmına 3,5 mm cidar kalınlığına sahip PP takviye edilmiştir. Dördüncü simülasyonda, ikinci modelin iç kısmına 6,5 mm cidar kalınlığına sahip PP takviye edilerek tasarım değiştirilmiştir. Son modelde ise, iç kısımda tam dolu PP takviyesi kullanılan kestamit destekli dıştan cam elyaf takviyeli Al boru CAD modeli kullanılmıştır.



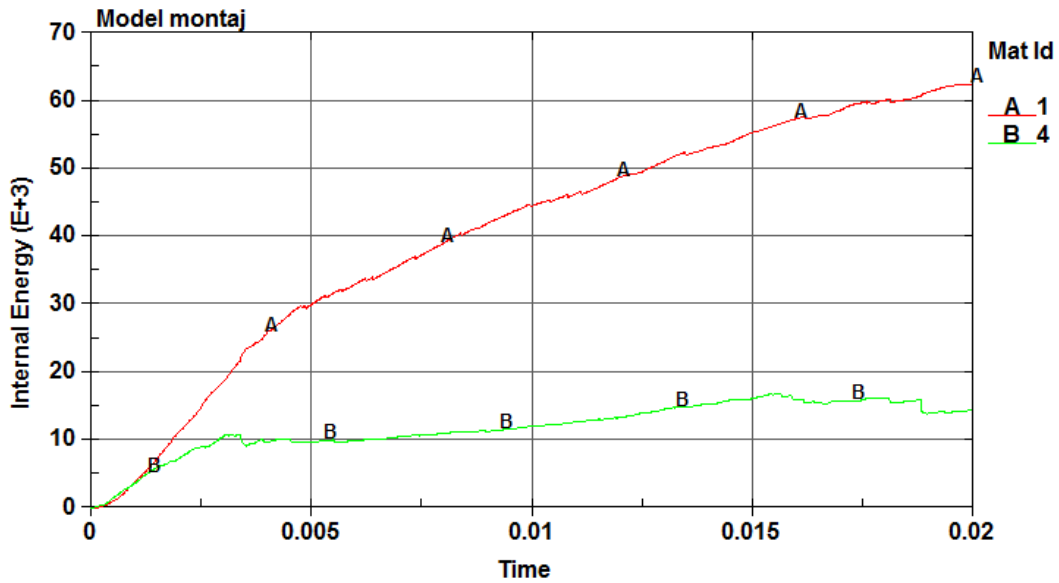
Şekil 109. Dıştan cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin darbe simülasyonu modelleri: (a) CE+T, (b) CE+T+K, (c) CE+T+K+PP(3,5), (d) CE+T+K+PP(6,5), (e) CE+T+K+PP(dolu)

ANSYS-LSDYNA yazılımı ile yapılan bilgisayar destekli benzetim sürecinde sınır şartları belirtilirse; Analiz koşulları ilk modellerde olduğu gibi çeyrek model şeklinde hazırlanmıştır. Statik sürtünme katsayısı 0,2, dinamik sürtünme katsayısı 0,15 alınmıştır. Çarpışma sürecinde mesnet ve koç rijit kabul edilmiştir. Koça 5169 mm/s'lik ilk hız verilmiştir. Toplam çarpışma süreci olarak 0,025 saniye alınmıştır. Modellemede solid 164 eleman tipi kullanılmıştır. Sonlu eleman mesh modelleri hegzahedral elemanlardan oluşturulmuştur. Contact için Automatic Single Surface (ASSC) kontak tipi tercih edilmiştir. Kompozit malzemenin explicit analiz için modeli hazırlanırken hasarların daha iyi incelenebilmesi için ANSYS/LSDYNA içerisindeki "Composite Damage" materyal modeli kullanılmıştır.

DeneySEL çalışmada, koç ve sarkaç kolunun tüm ekipmanlar dâhil toplam kütlesi 224 kg'dır. Bilgisayar destekli benzetim için dalıcı koç ucuna bu kütle uygulanmıştır. Simülasyonlarda çeyrek model kullanıldığı için, absorbe edilen enerji miktarı hesaplamalarında sonuçların dört katı alınacaktır. Deney sonuçlarında kıyaslama için, Von-Misses eşdeğer gerilmesi incelenmiştir. Simülasyonlardaki gerilme değerleri MPa cinsindedir. Ayrıca simülasyonlar sürecinde numunede meydana gelen iç enerji değişimi (enerji absorbe etme kabiliyetleri) de grafiklerle verilmiştir. Grafiklerdeki Enerji değerleri ise milijoule cinsinden ifade edilmiştir.

Simülasyona ait değerlendirmeler, takviyeli yapıların çarpışmayı karakterize eden 4 farklı deformasyon anı için yapılmıştır.

Çeyrek model için simülasyon neticesinde takviyesiz Al borunun çeyrek modeli için belirlenen enerji $62.559 \times 4 = 250.236$ J, sadece cam elyafın absorbe ettiği enerji $16.827 \times 4 = 67.308$ J ve tam model için enerji ise $79.386 \times 4 = 317.544$ J'dür. Şekil 110'da çarpışma sürecindeki absorbe edilen iç enerji miktarının değişimi verilmiştir.



Şekil 110. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişimi (1: T, 4: CE).

Çarpışma esnasındaki borunun kritik anlarına ait Von-Misses gerilme dağılımları Şekil 111'de verilmiştir.

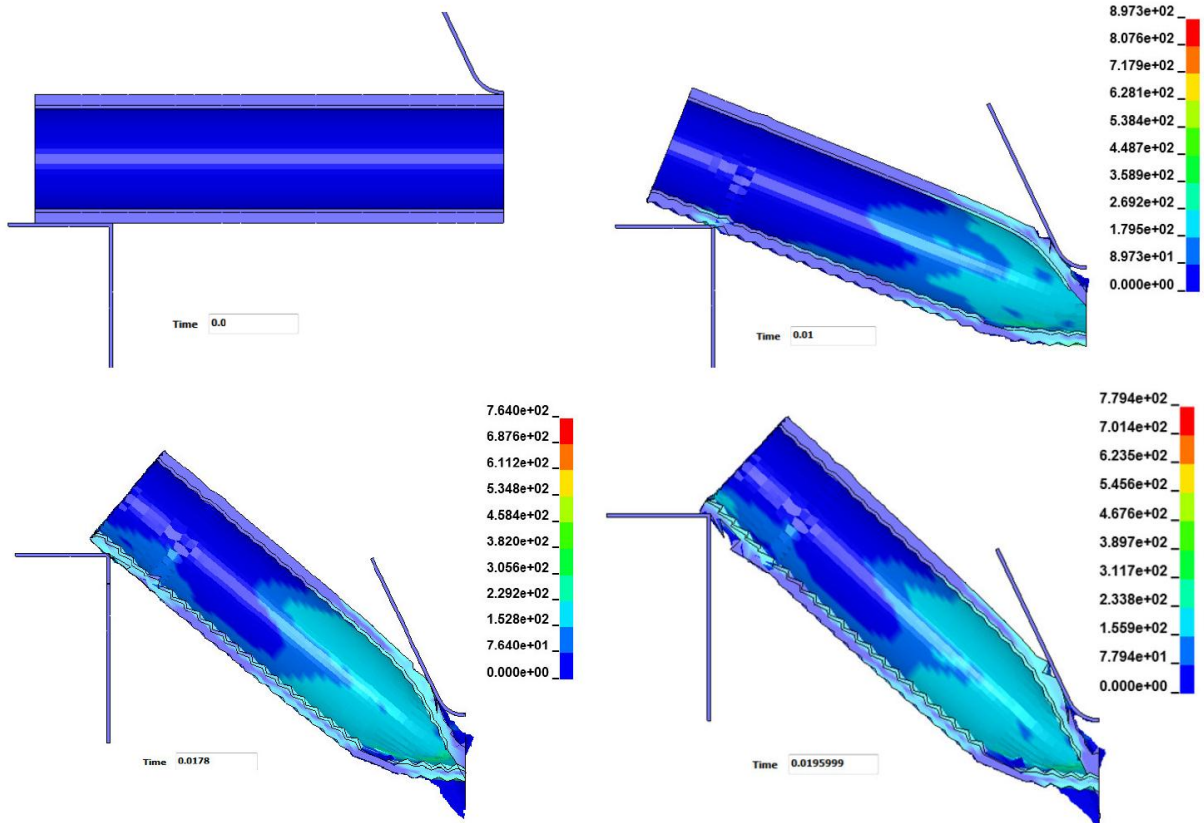
Başlangıç anı: Analizin ilk başlangıcında, tam çarpışma öncesi koçun cam elyaf dış takviyesi üzerine temas ettiği konumunu belirtmektedir.

0,01 saniye: Koçun, boru üzerine teması ile birlikte, çarpışma süreci başlamasından sonra, temas bölgesinde, çarpma sebebi ile gerilme yığılması oluşmuştur. Borunun alt kısmında gerilmenin daha yüksek olduğu gözlemlenmekte ve yaklaşık 270 MPa değerine ulaşmaktadır. Alt kısımda, merkezden biraz uzaklaşıldığında ise bu değer 630 MPa mertebesine kadar ulaşabilmektedir. Borunun mesnede temas ettiği bölgede, gerilmede de artış gözlenmektedir. Ayrıca mesnet köşeli olduğu için dış cam elyaf takviyesini boş Al boruya göre daha kolay deforme etme eğilimindedir. Bu durumdaki lokal maksimum gerilme

boş borudaki katlanan yanal bölgede olduğu gibi 897 MPa olmasına rağmen, genel deformasyon bölgesinde 270 MPa mertebelerinde gerilmeler mevcuttur.

0,0178 saniye: Bu zaman diliminde boş Al borunun mesnetler arasına girdiği durumdur. bu süreçte kesit artmış olduğu için boş boru gibi numune mesnetler arasına girememiştir. Boruda koçun neden olduğu deformasyon sürekli arttığından, akma alanının genişlediği bölgelerde gerilme düşüşü, daha önce akan cidarlarda ise gerilmede artış gözlenmektedir. Koç temas noktası boru orta noktasından sola doğru kaymakta ve bunun sonucu olarak boru eksenini boyunca deformasyona uğrayan bölgenin genişliği artmaktadır. Bu kademedeki genel deformasyon bölgesindeki gerilme dağılımı 269 MPa değerinden 229 MPa değerine düşmektedir. Boru orta noktasında, lokal deformasyondan dolayı, koçun boruya temas ettiği alan azalmaktadır. Borunun orta yan yüzeyinde katlanmadan dolayı oluşan deformasyonun şiddeti artmaktadır. Böylece özellikle kompozit malzemelerin ani kırılma sürecindeki liflerin parçalanması, kullanılan "composite damage" modelinin yardımıyla, şekilde daha iyi görülmektedir. Bu zaman diliminde, önceki aşamalarda olduğu gibi, en büyük gerilme ortada cidarda katlanmanın olduğu kısımda olup değeri 764 MPa dır. Bunlara ilave olarak mesnetteki köşe profilinin etkisi bu çizgisel temas bölgesinde giderek daha belirgin hale gelmektedir.

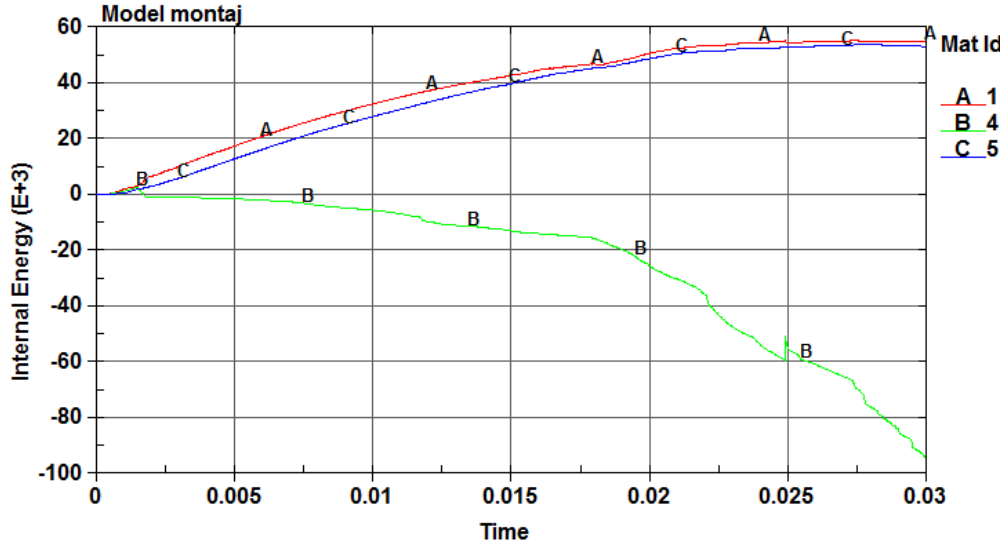
0,0196 saniye: Bu kademedeki de, orta bölgedeki kompozitin kırılma süreci devam etmektedir. Boru gövdesi tamamen mesnetler arasına girmeye başlamıştır. Görüldüğü gibi, orta noktadaki cidarlar birbirlerine temas etmiş ve bu bölgede gerilmenin 311 MPa ile 545 MPa aralığına ulaştığı görülmektedir. Geometride en büyük deformasyon, cidarların katlandığı boru orta noktasında meydana gelmektedir. Bu davranış üç nokta eğme deneylerinde görülen geometrik şekil değişimiyle aynıdır.



Şekil 111. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.7. Cam Elyaf+Tüp+Kestamit (CE+T+K(4))

Bu kombinasyon için simülasyon sonuçlarına göre tüpe ait enerji değerleri sırasıyla; $55.418 \times 4 = 221.672$ J (T), $94.621 \times 4 = 378.484$ J (CE) ve $54.010 \times 4 = 216$ J (K) olup, enerjileri toplamı 816.196 J'dür. İç enerjinin çarpışma süresiyle değişim grafiği Şekil 112'de verilmiştir.



Şekil 112. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K)

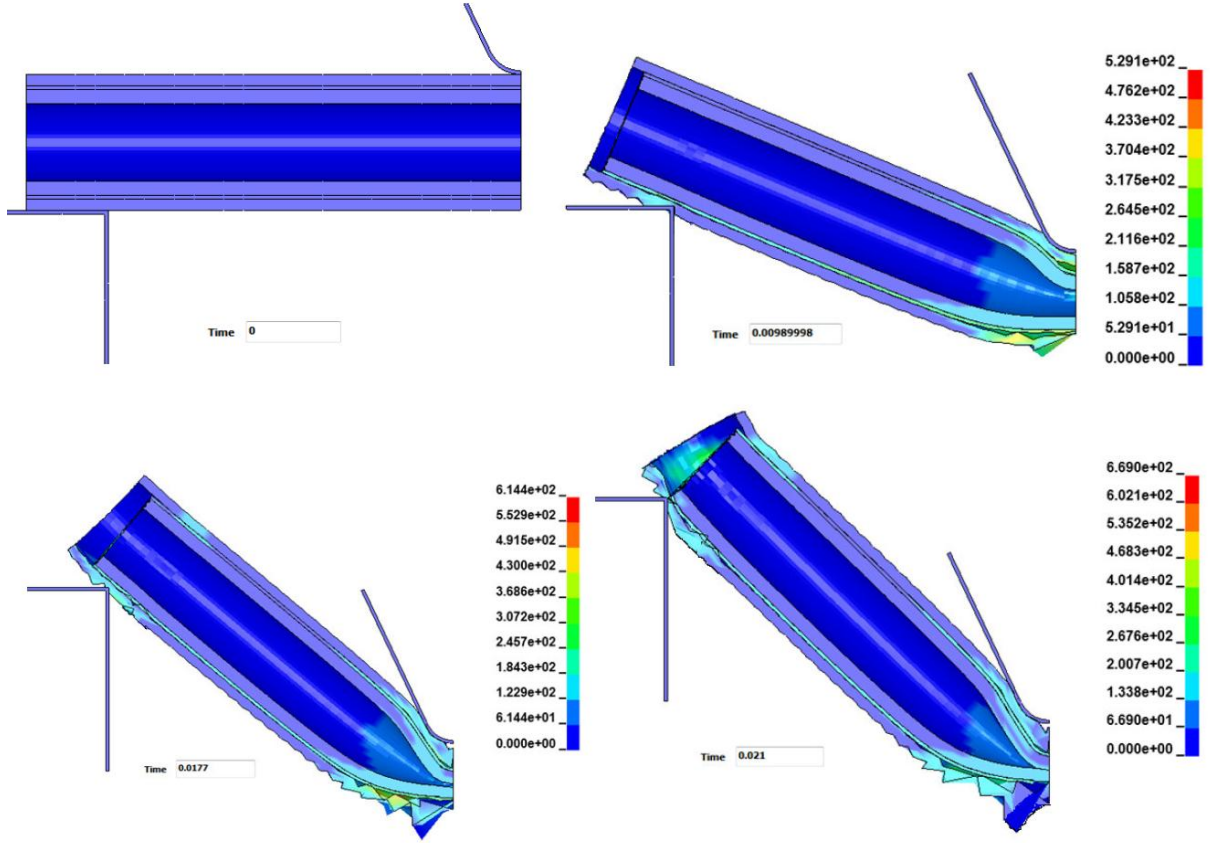
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 113'de verilmiştir.

Başlangıç anı: 4 mm kestamit kullanılmış dıştan cam elyaf takviyeli Al borudan meydana gelen numunenin tam çarpışma temas anındaki görüntüsü verilmiştir.

0.01 saniye: Numunenin orta kısmında gerilme yığılması sebebiyle alüminyum üzerinde 370MPa'lık gerilmeye oluşmaktadır. İç kısımda takviye olarak kullanılan kestamitte ezilmenin etkisi ile 158 MPa'lık gerilme meydana gelirken dış cam elyaf takviyede bu gerilme değeri 425 MPa'a kadar çıkmaktadır. Mesnet kısmında oluşan reaksiyon kuvveti ise cam elyafıta ezilmeye neden olmakta, ayrıca cam elyafın alüminyuma gelecek ilk mesnet etkisini azalttığı anlaşılmaktadır. Sadece dıştan cam elyaf takviyeli duruma göre boruda aynı çarpma anı için alüminyumdaki gerilmeler kıyaslandığında, kestamitin varlığı metal tüpte meydana gelen gerilmeleri 529 MPa'a kadar düşürmüştür.

0.0177 saniye:İçeri kestamit takviyesinden sonra dayanıklılığı artan borunun dıştan takviyesi bir önceki kademelere göre daha fazla zorlanmaktadır. Gerçekte gözlemlendiği gibi mesnet bölgesinde daha fazla uzama ve orta bölgede daha şiddetli liflerin ve yapının parçalanması görülmektedir. Bu Takviyesiz Al boru ile yapılan simülasyonlar neticesindeki analiz sonuçlarında, numune mesnet arasına bu zaman diliminde girmişti. İçten kestamit takviyesinin, yapının mesnet aralığına girme süresini uzatarak 0,0195 saniyeye getirdiği duruma göre dıştan cam elyaf takviyesinin de ilave edildiği bu durumda mesnet arasına girme zamanı 0,021 saniye olarak tespit edilmiştir. Böylece deformasyon için harcanan enerjinin daha da arttığı anlaşılmaktadır.

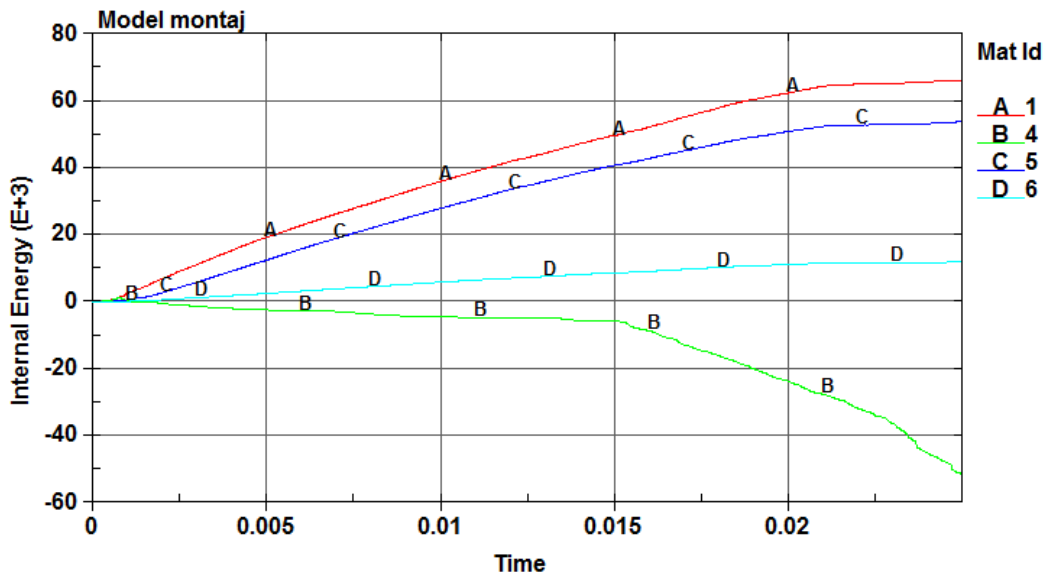
0.021 saniye: Bu durumda numune tam olarak mesnet arasına girmektedir. Bunun etkisi ile orta bölgedeki parçalanma iyice netleşmiş ve kırılmanın son aşamalarına geldiği tespit edilmiştir. Gerilme değeri 0,0177'inci saniyede 614 MPa iken, bu konum için 669 MPa değerine ulaşmaktadır. Deformasyonun etkisiyle birbirlerine yaklaşan kestamit yüzeyleri, şekil değiştirmeye çalışan metal cidarın bu davranışını kısıtlamaktadır. Kestamit, Al yan yüzeylerinin plastik şekil değiştirerek yırtılmasını engellemekte, bu şekilde metal tüpteki hasar mekanizması engellenmektedir. Buna dıştan cam elyafın da katkısı eklenince sadece kestamit takviyesi yapılan duruma göre (342 MPa) neredeyse iki katlık bir gerilme meydana gelmektedir.



Şekil 113. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.8. Cam Elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen (CE+T+K(4)+PP(3,5))

Bu grup deney numuneleri için simülasyon sonucu enerji değerleri $66.399 \times 4 = 265.596 \text{ J}$ (T), $51.346 \times 4 = 205.384 \text{ J}$ (CE), $54 \times 4 = 216 \text{ J}$ (K) ve $12.040 \times 4 = 48.160 \text{ J}$ (PP) olup, toplam enerji 734.936 J 'e eşittir. Şekil 114'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 114. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).

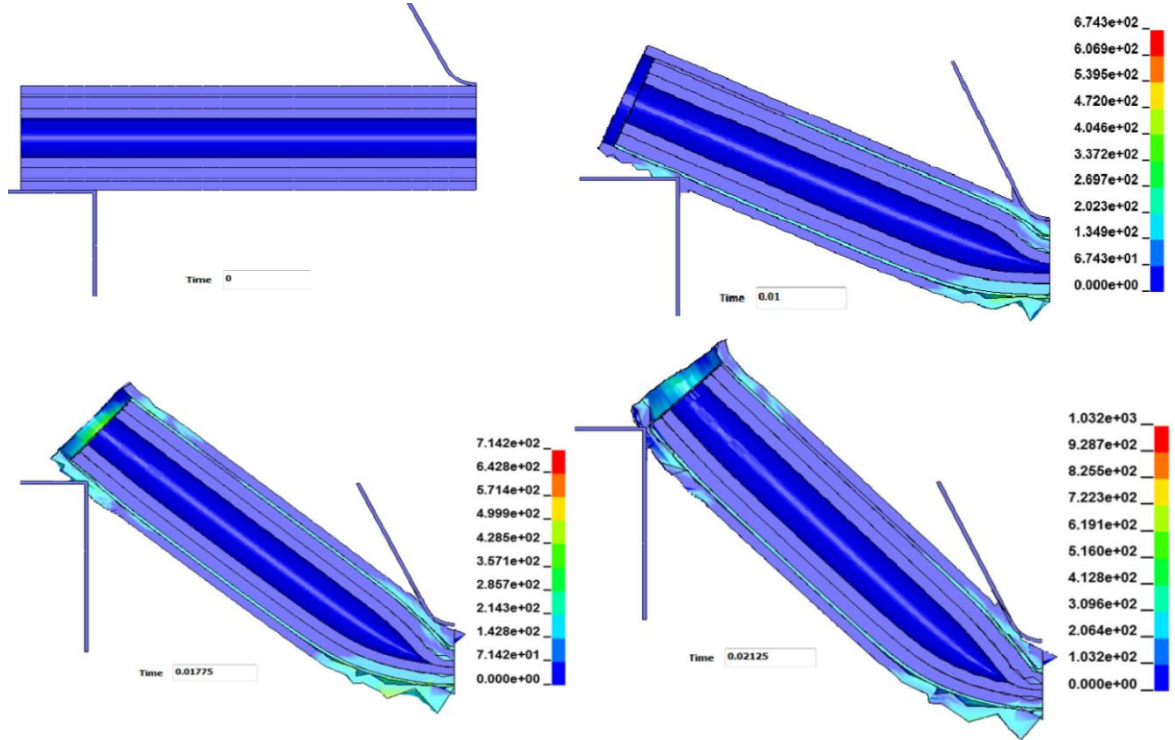
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 115'de verilmiştir.

Başlangıç anı: Dıştan cam elyaf takviyeli Alüminyum, kestamit ve 3,5 mm kalınlığında PP katkıli kompozit malzemenin koçun teması esnasındaki simülasyon görüntüsü.

0.01 saniye: Dıştan cam elyaf takviyeli Al boruda içe ilave edilen materyalin kesiti kalınlaştıkça dıştaki cam elyaf katmana gelen yük daha da artmakta ve bu her geçen kademede daha kolay anlaşılacaktır. Bir önceki numunede aynı zaman diliminde cam elyaf da oluşan deformasyon miktarı daha düşüktür. Bu sürede numunenin merkezinde gerilme artmakta ve 674 MPa değerine kadar ulaşmaktadır. Dışarıda takviye olarak kullanılan cam elyafın etkisi dıştan takviyesiz duruma göre (320 MPa) oluşan gerilmeyi iki katından fazla bir değere yükseltmiştir. İç kısımda takviye olarak kullanılan kestamit de ezilme neticesinde yer yer 270 MPa lık gerilmeler oluşmaktadır. PP malzemenin şekil değişimini sınırlandırmadaki etkisi fazla değildir. Buna rağmen gerilme 67 MPa ile 134 MPa arasında değişmektedir. Yapının ortasındaki kestamit daha az şekil değiştirdiği için, kestamitin PP tarafından desteğinin arttığı gözlemlenmektedir.

0.01775 saniye: Numunenin orta noktasındaki katlanma bölgesindeki 3,5mm kalınlığındaki PP'in maksimum gerilme değeri durumu fazla etkilememiş bir önceki dıştan takviyesiz analizlerde gerilmeler 67 MPa civarında iken 142 MPa değerine kadar ulaşmıştır. Maksimum gerilme için genel durum 712 MPa olup ilk gerçekleştirilen dıştan takviyesiz bu koşul için 335 MPa dır. Yalnız, dıştan takviyesiz bu zaman dilimi veya bir önceki ilavesi olmayan bu zaman dilimi (614 MPa) için değerlendirilme yapıldığında, gerilme iki katından fazla görünmesine rağmen PP'in bu koşul için ilave katkısının gerilmeyi 614 MPa dan 714 MPa'a çıkartmış olduğu söylenebilir. Bu şekildeçerden yapılan takviyenin etkisiyle, Al borunun alt cidarı kestamitin etrafında sarılma eğilimi göstermekte ve böylece kestamitin alt bölgesindeki gerilme üste göre daha fazla olmaktadır. Gerilmenin artmasıyla da dış cam elyaf takviyedeki kırılmanın şiddeti de artmaktadır.

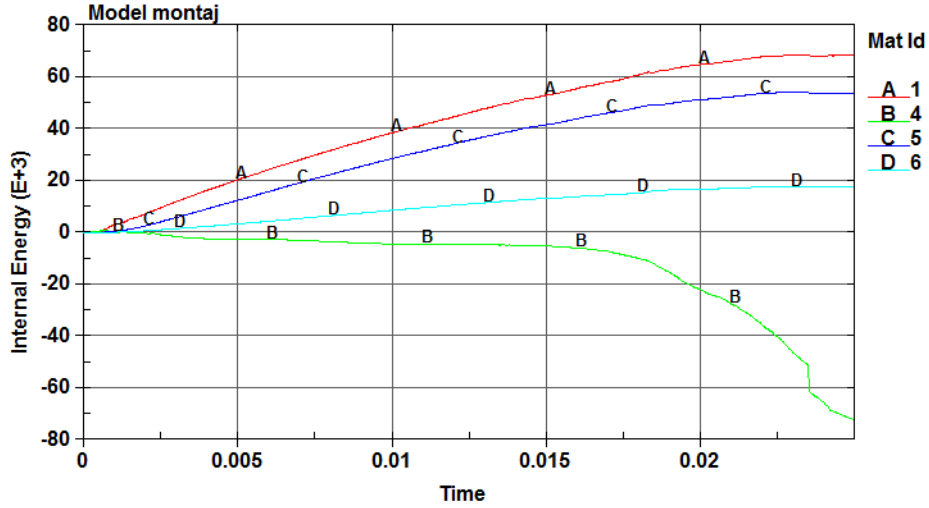
0.02125 saniye: Numune mesnet aralığına girmiş olmasına rağmen mesnet bölgesinde bulunan cam elyafdaki taşma nedeniyle, genel olarak gerilme değerinde artış meydana gelerek 1032 MPa değerine ulaşmıştır.



Şekil 115. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.9. Cam Elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen (CE+T+K(4)+PP(6,5))

6,5 mm'lik PP ve K takviyeli Al boru ile absorbe edilmiş enerji miktarı bu takviyeli boru numunesinin de kırılması ile 3. numunede olduğu gibi, beklenenin altında yanlış bir şekilde düşük çıkmıştır. Simülasyon sonucu yaklaşık $68.643 \times 4 = 274.572 \text{ J}$ (T), $72.115 \times 4 = 288.460 \text{ J}$ (CE) $53.973 \times 4 = 215.900 \text{ J}$ (K) ve $17.760 \times 4 = 71.040 \text{ J}$ (PP) enerjileri toplamı beklenildiği üzere kırılma görülmeyle deneysel çalışmadan fazla çıkmış ve 849.964 J 'lük bir enerji absorbe edilmiştir. Şekil 116'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 116. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).

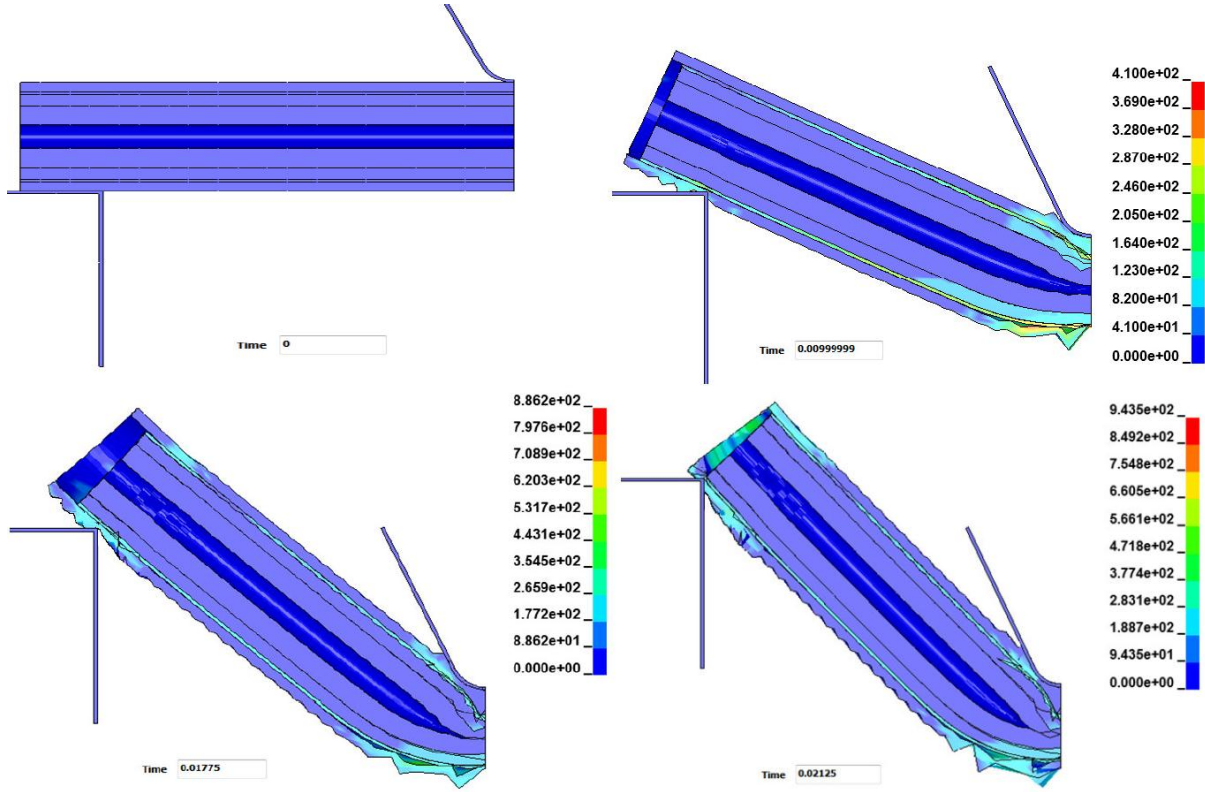
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 117'de verilmiştir.

Başlangıç anı: Dıştan cam elyaf takviyeli Alüminyum, kestamit ve 6,5mm PP takviyeli kompozit numunenin çarpışma öncesi görüntüsü.

0,01 saniye: Bir önceki numune incelendiğinde bu zaman dilimi için gerilme değerinin düştüğü görülmektedir. Dıştan takviyeli Al borunun içerisinde ilave olarak kullanılan PP kesitin kalınlığı artırıldıkça boru iç bölgesinin dayanımı daha da artmakta böylece dış takviye katmanının gerilme değeri bir önceki duruma göre azalmaktadır. Burada gerilme değeri 410MPa'a kadar inmiştir. Yalnız belli bir durumdan sonra gerilme değeri tekrar artış eğilimine geçmektedir. Alt kısımdaki cam elyafın gerilme değeri ise bir önceki duruma göre daha daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

0,01775 saniye: Belli zamana kadar azalan gerilme değeri bu kademelerde artmış ve 886 MPa'a kadar ulaşmıştır. Boru alt cidarı ile o bölgedeki kestamitin gerilme değerleri diğer bölgelere göre daha fazla olmaktadır. Buna ilave olarak kırılma ve deforme evrelerinde olan cam elyafın ise başlangıçta ifade edilen 886,2 MPa değerlerine ulaştığı fark edilmiştir. Yalnız cam elyaf için kritik bölgedeki ortalama olarak gerilme değerleri 350 MPa civarındadır. Burada PP'nin et kalınlığındaki artış sonucu mesnede temas eden boru cidarındaki gerilmenin, reaksiyon kuvvetleriyle orantılı olarak arttığı önceki durumlardakine paralellik göstermektedir.

0,02125 saniye: Bu bölgede gerilme değerinin tekrar iç destek elemanının kalınlık artışı ile ezilme eğilimine girdiği ve gerilmenin düştüğü gözlenmektedir. Bu şekilde maksimum gerilme değeri 943 MPa'dır. Parçanın mesnet aralığına bir önceki kompozit numune ile yaklaşık olarak aynı zamanda girdiği görülmektedir. Orta bölgede oluşan gerilme değeri bir önceki numuneye göre biraz daha düşük olduğu için, mesnet bölgesinde de içteki PP kesitin daha kalın olmasından dolayı daha fazla zorlandığı görülmektedir. Böylece bu kompozit yapının mesnede girdiği an itibarıyla, diğer numunelere göre kalınlaşan PP malzemesinin katkısıyla tüm yapının maksimum gerilmenin biraz azalmasına rağmen daha fazla enerji absorbe ettiği dikkat çekmektedir.



Şekil 117. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.2.10. Cam Elyaf+Tüp+Kestamit+Polipropilen (CE+T+K(4)+PP(dolu))

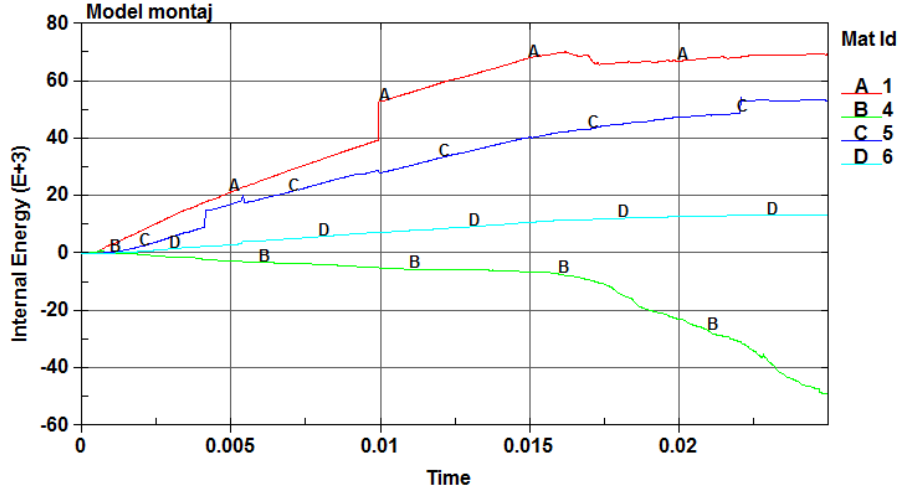
K ve PP takviyeli Al borunun simülasyon sonucunda sırasıyla enerji değerleri; $69.556 \times 4 = 278.224 \text{ J}$ (T), $49.019 \times 4 = 196.076 \text{ J}$ (CE), $53.517 \times 4 = 214.068 \text{ J}$ (K) ve $13.438 \times 4 = 53.752 \text{ J}$ (PP) olup, toplam enerji 742.120 J 'dür. Şekil 118'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.

Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 119'da verilmiştir.

Başlangıç anı:Dıştan cam elyaf takviyeli Alüminyum, kestamit ve tam dolu PP numunenin çarpma temas anındaki pozisyonu.

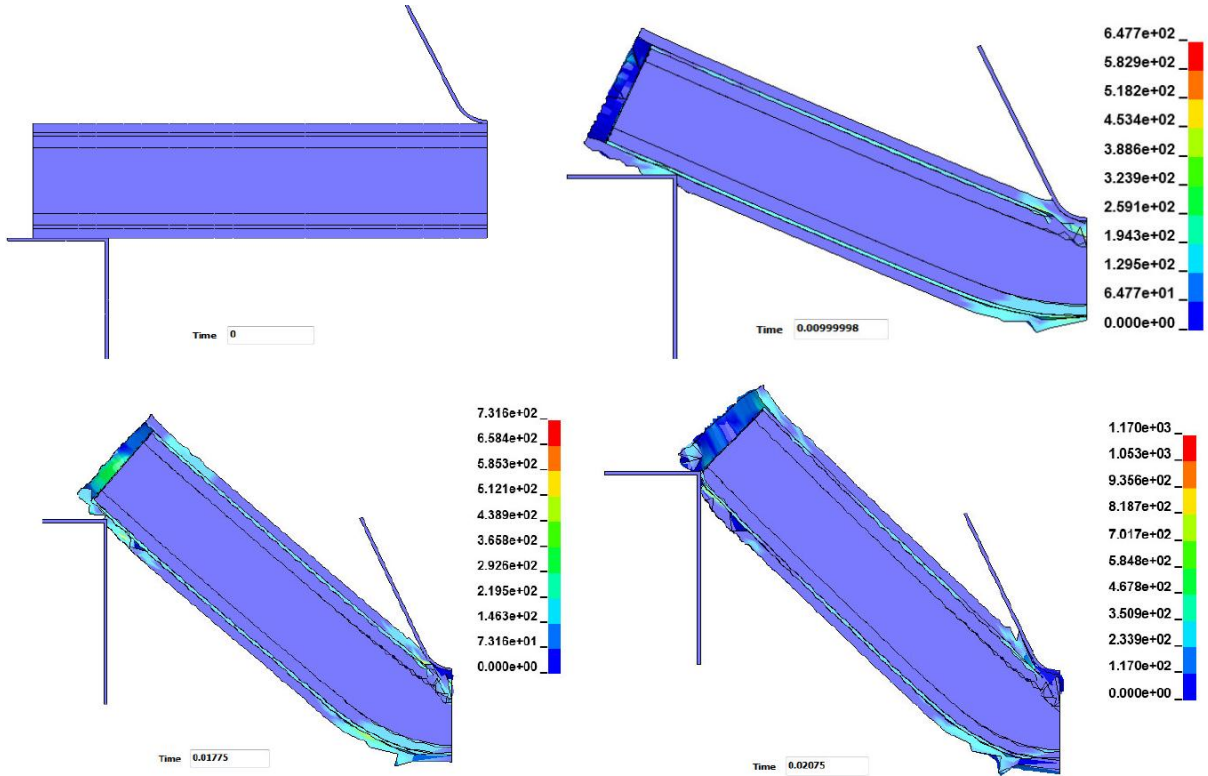
0,01 saniye: Bu safhada, numune içten çok daha rijit bir şekilde desteklenmiş olması nedeniyle, orta noktada, tüp yüzeyinde gelişen gerilme değeri hızla yükselmiştir. Yalnız bir önceki numunede bahsedilen iç takviyelerin kalınlığının artmasıyla dıştaki cam elyafın daha kolay deforme olduğu tespit edilmiştir. Bu numune için bu zaman diliminde de tam dolu olmasına rağmen maksimum gerilme değeri 3,5mm kalınlığında PP kullanılan numunede 674MPa iken bu numunede 647MPa değerine ancak ulaşabilmiştir. Yalnız, kritik bölgelerde ortalama olarak 195MPa civarında gerilmeler oluşmaktadır.

0.01775 saniye:Önceki kademelerde de gözlemlendiği gibi mesnet bölgesinde biraz cam elyafın uzadığı tespit edilmiştir. Bu süreçte önceki numunelerde olduğu gibi gerilmenin arttığı anlaşılmıştır. Boru alt cidarının büyük miktarda zorlandığı görülmektedir. Yalnız bir önceki numuneye göre daha az gerilme meydana gelmekte yalnız bu zaman dilimi aşıldığında beklendiği gibi gerilme artarak devam etmektedir. Koçun baskısından sonra boru alt bölgesindeki cidarınkestamit etrafına sarılmasıyla bu zaman dilimi akabinde gerilme değerleri tüm simülasyonlardakinin beklenen şekilde üstüne çıkmaktadır.



Şekil 118. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim (1: T, 4: CE, 5: K, 6: PP).

0.02075 saniye: Bu kompozit kiriş, mesnetler arasında diğer numunelere yakın bir süreçte girmektedir. Yalnız boru içerisine yapılan takviyenin kalınlaşmasıyla iç dayanım çok artmakta ve önceden de belirtildiği gibi kompozit cidarında bir gerilme azalması meydana gelmekte; ancak son ana ulaşılan kadar gerilme değerleri tekrar artma trendine girmektedir. Böylece dıştan cam elyaf takviye edilmiş Al boru 1170MPa değeri ile için en yüksek gerilmeye sahip numune olmaktadır.

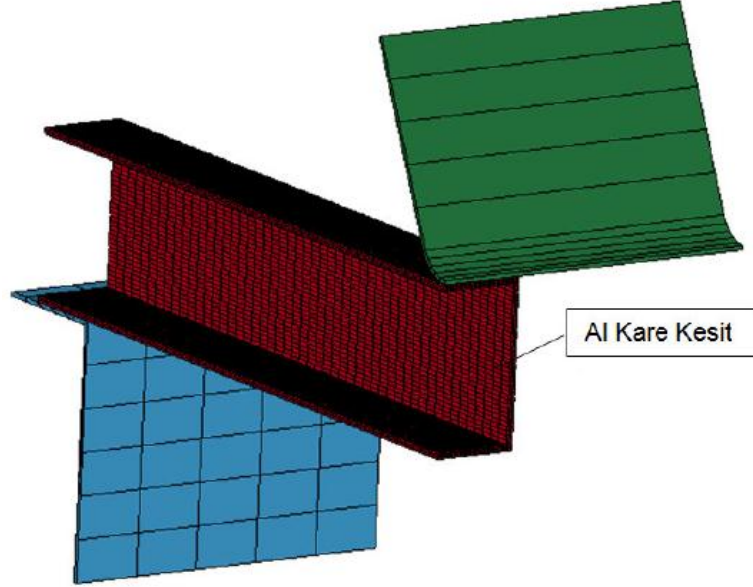


Şekil 119. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

Bilgisayar destekli zamana bağlı simülasyonlar neticesinde; takviyenin etkinliğine bağlı olarak deformasyon numunenin orta noktasında, koçun temas ettiği bölgede veya boru alt yüzeyinde olduğu ilk simülasyonlara benzer şekilde burada da tespit edilmiştir. Yalnız absorbe edilen enerji bakımından kıyaslama yapıldığında en iyi numunenin CE+T+K+PP(6,5) olduğu tespit edilmiştir.

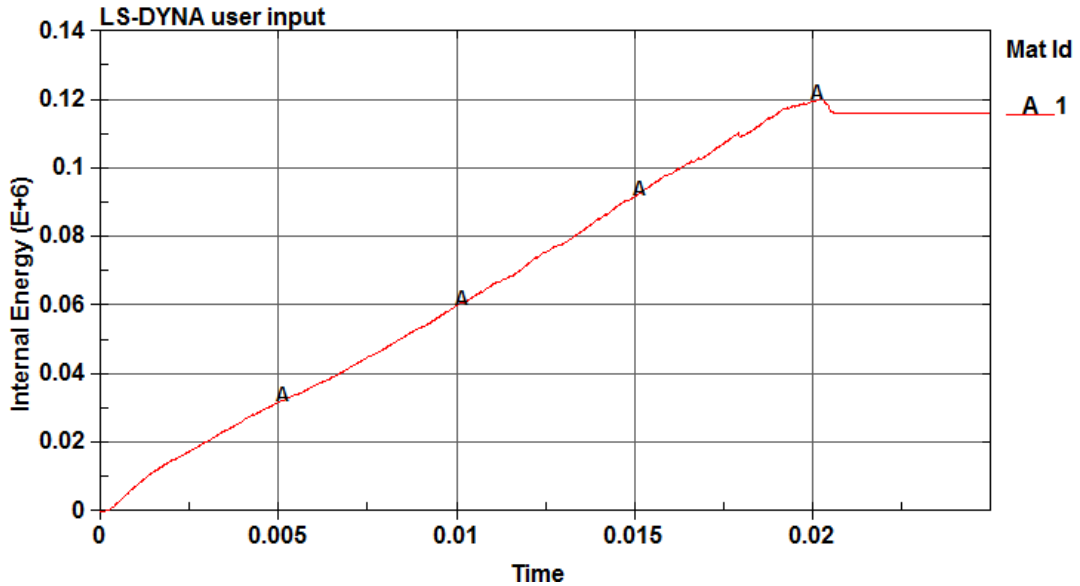
4.2.11. Kare Kesitli Tüp Kirişin Darbe Deneyi Simülasyonu

Kare kesitli Al borunun darbe simülasyonu için dış kenar uzunluğu 40 mm ve cidar kalınlığı 1,5 mm olan analiz için hazırlanan CAD modeli Şekil 120'de gösterilmiştir. Tam model için boru boyu 320 mm ve mesnet aralığı da 280 mm olarak tüm test ve simülasyon koşullarında aynı alınmıştır. Simülasyonda kullanılan tüm modeller için mesnet ve koçun basitleştirilmiş hali çizilmiştir.



Şekil 120. Simülasyonda kullanılan modeller.

Al kare kesitli tüpün simülasyonu sonucunda sırasıyla enerji değeri 119.080J (Al kare kesit) toplam enerji değeri $119.080 \times 4 = 476.320$ J' dür. Şekil 121'de çarpışma sürecinde iç enerjide meydana gelen değişim verilmiştir.



Şekil 121. Çarpışma sürecinde iç enerjideki değişim.

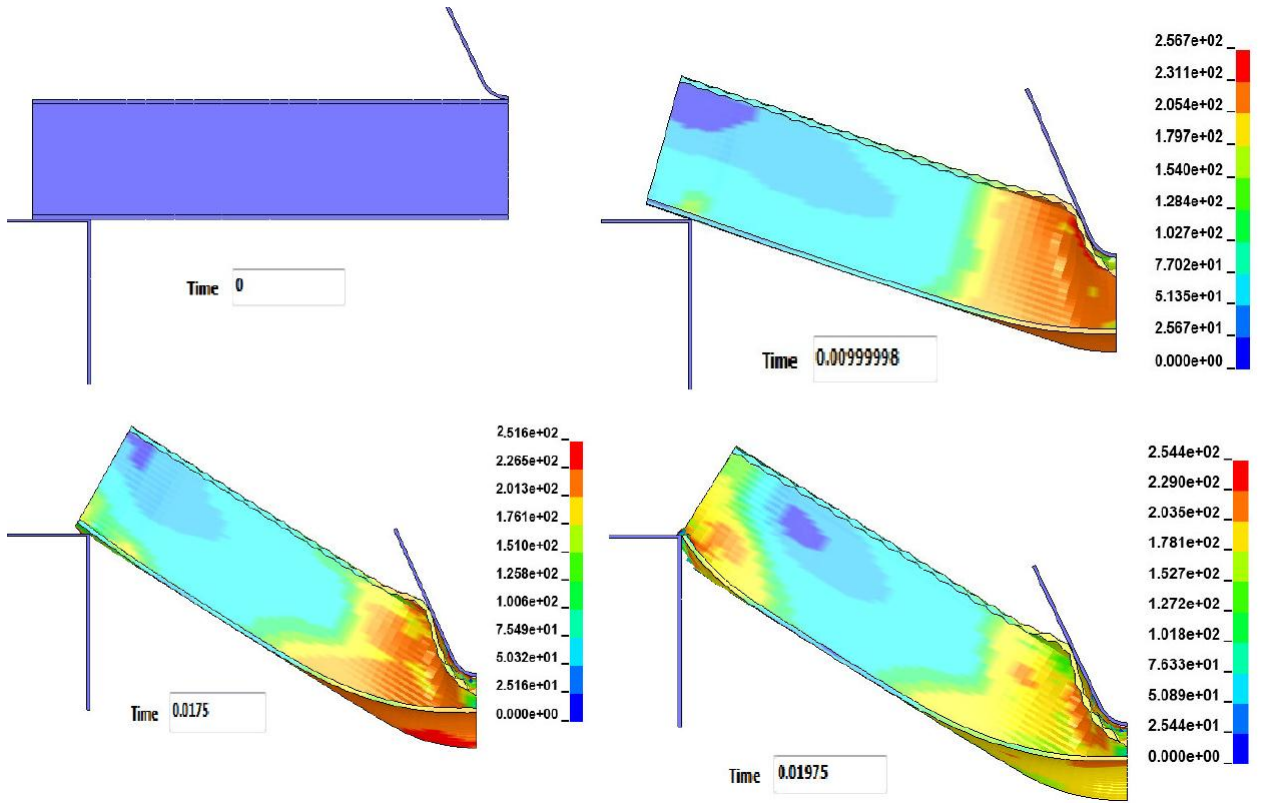
Farklı çarpışma anları için kompozit yapıdaki gerilme dağılımları Şekil 122'de verilmiştir.

Başlangıç anı: Alüminyum kare kesitli numenin çarpışma öncesi görüntüsü.

0,01 saniye: Diğer yapılarda olduğu gibi, numunenin orta noktasında deformasyona bağlı olarak gelişen gerilme değeri 256 MPa olup, dairesel kesite göre aynı zaman diliminde yaklaşık 80MPa daha az olduğu görülmektedir. Koçun temas bölgesi hariç gerilmeler beklendiği üzere kare profilli borunun kenarlarında artmaktadır.

0,0175 saniye: Maksimum gerilme değeri boş dairesel kesite göre göre, gene daha az olmakla beraber aynı boş dairesel kesitin farklı zaman dilimlerinde davrandığı gibi gerilme değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Buradaki maksimum gerilme değerinde bükülme durumu aşıldığı için biraz azalarak 251MPa'a düştüğü anlaşılmaktadır.yalnız önemli olan fark ise bu zaman diliminde boş daire kesitli tüp mesnetler arasına girmişken bu profil daha mesnetler arasına girememiş ve hala enerji absorbe etmeye devam etmiştir.

0,01975 saniye: Parça mesnet aralığına bir önceki kompozit numuneye göre daha erken girdiği görülmektedir. Bunun nedeni; kare kesitin kenarlarının olması ve daire kesitin çapı 31mm iken kare kesitin kenar uzunluğunun 40mm olmasıdır. Bu bir bakıma numunenin daha fazla zorlandığı, yani daha fazla enerji absorbe ettiğini göstermektedir.



Şekil 122. Farklı çarpma anları için boruda oluşan gerilme dağılımı.

4.3. Kompozit Kirişlerin Doğal Frekans Değerleri

Sonlu elemanlar analizleriyle elde edilen frekans değerleri Tablo 5-7'de verilmiştir. Bu analizler yapılırken iki ucu ankastre kiriş şartları dikkate alınmıştır.

Tablo 5. İçten ve dıştan takviye edilmiş 31 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Kombinasyon*		Frekans (Hz)
1	-	T	2199,0
2	CE	T	1778,9
3	CE	T+K(4)	1509,4
4	CE	T+K(4)+PP(3,5)	1419,7
5	CE	T+K(4)+PP(6,5)	1380,7
6	CE	T+K(4)+PP(10,5-dolu)	1364,7
7	KE	T	2511,4
8	KE	T+K(4)	2068,9
9	KE	T+K(4)+PP(3,5)	1938,4
10	KE	T+K(4)+PP(6,5)	1886,8
11	KE	T+K(4)+PP(10,5-dolu)	1867,0

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen, CE: Cam elyaf, KE: Karbon elyaf. Parantez içindeki rakamlar mm cinsinden katman et kalınlığını göstermektedir.

Tablo 6. İçeriden ve dışarıdan takviye edilmiş, 19, 24 ve 40 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Çap (mm)	Kombinasyon*	Frekans (Hz)
1	19	T	3087,8
2		T+K	1976,2
3		CE+T	2615,2
4		CE+T+K	2000,1
5		KE+T	3565,1
6		KE+T+K	2598,6
7	24	T	2081,5
8		T+K	1232,6
9		CE+T	1719,9
10		CE+T+K	1366,8
11		KE+T	2566,1
12		KE+T+K	1985,2
13	40	T	1896,0
14		T+K	1137,3
15		T+K+PP	1053,3
16		CE+T	1580,2
17		CE+T+K	1214,7
18		CE+T+K+PP	1108,0
19		KE+T	2161,4
20		KE+T+K	1605,3
21		KE+T+K+PP	1531,2

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen, CE: Cam elyaf, KE: Karbon elyaf.

Tablo 7. İçeriden ve dışarıdan takviye edilmiş, PB takviyeli, 30 mm çaplı kompozit kirişlerin sonlu elemanlar analiziyle belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Kombinasyon*		Frekans (Hz)
1	-	T	2164,3
2	-	T+PB(3)	1666,7
3	-	T+PB(3)+P(2)	1529,4
4	-	T+PB(3)+P(2)+PP(3)	1433,6
5	-	T+PB(3)+P(2)+PP(6)	1387,1
6	-	T+PB(3)+P(2)+PP(9-dolu)	1373,8
7	-	T+PB(3)+P(8)	1362,8
8	-	T+PB(3)+P(11-dolu)	1348,1
9	-	T+PB(3)+K(2)	1530,1
10	-	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	1434,2
11	-	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	1387,8
12	-	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	1374,5
13	-	T+PB(3)+K(8)	1364,7
14	-	T+PB(3)+K(11-dolu)	1350,1
15	CE	T	1749,4
16	CE	T+PB(3)	1596,0
17	CE	T+PB(3)+K(2)	1519,4
18	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	1460,3
19	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	1430,7
20	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	1422,2
21	CE	T+PB(3)+K(8)	1417,0
22	CE	T+PB(3)+K(11-dolu)	1407,7
23	KE	T	2490,9
24	KE	T+ PB (t=3 mm)	2134,4
25	KE	T+PB(3)+K(2)	2022,2
26	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	1939,1
27	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	1900,4
28	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	1889,9
29	KE	T+PB(3)+K(8)	1887,1
30	KE	T+PB(3)+K(11-dolu)	1876,3

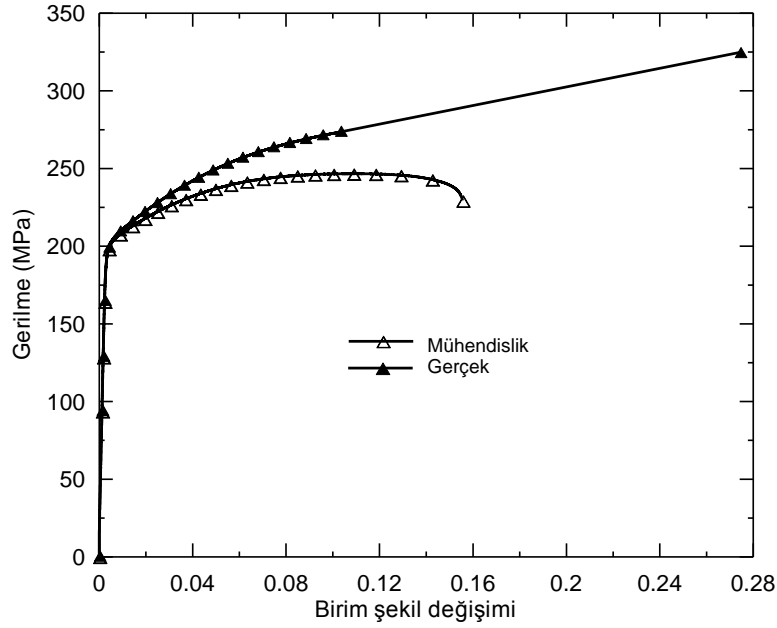
*T: Alüminyum tüp kiriş, PB: Pultruzyon boru, K: Kestamit, PP: Polipropilen, CE: Cam elyaf, KE: Karbon elyaf. Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir.

5. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

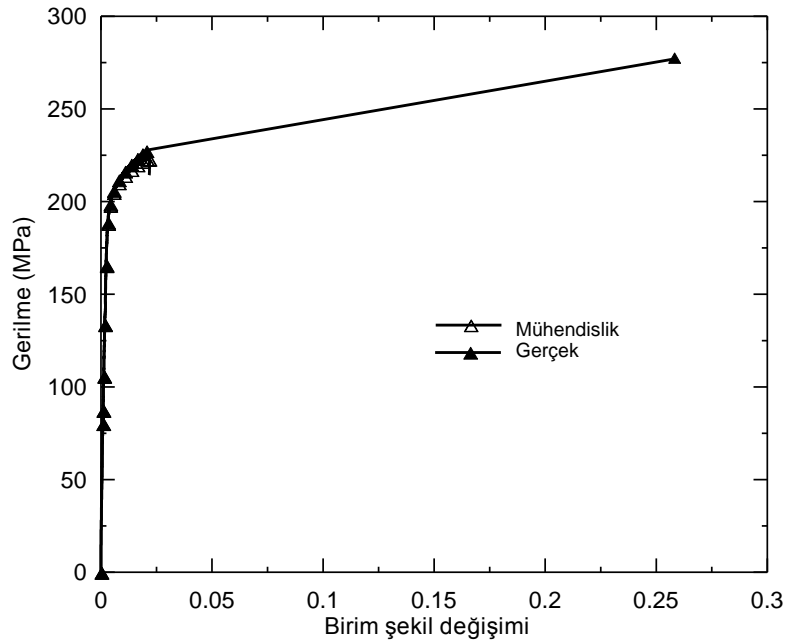
5.1. Çekme Deneyleri

5.1.1. Alüminyum Tüp

Çapları 19, 24, 30, 31, 40 mm olan dairesel kesitli alüminyum tüplerin ve 40x40x1,5 kare kesitli alüminyum tüpün çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri ve çekme deneyi sonrasındaki hasarlanmış numune görüntüleri Şekil 123-133'de verilmiştir.



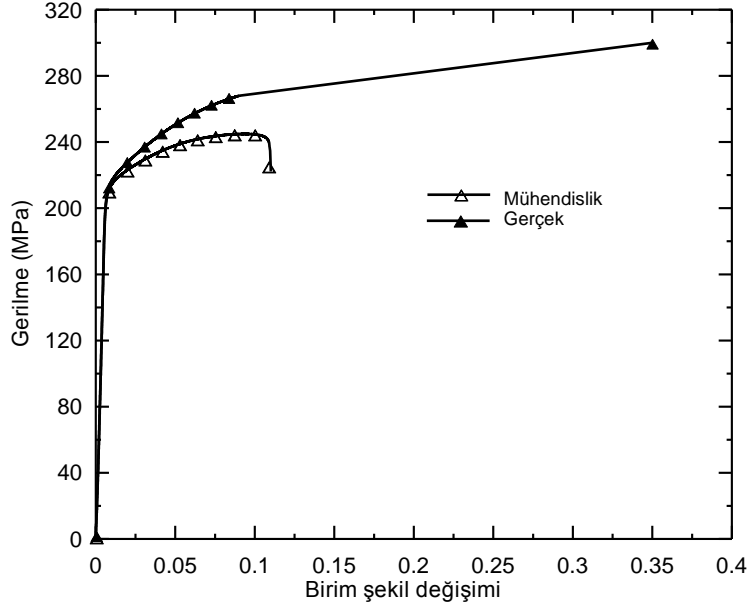
Şekil 123. D/t:19/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



Şekil 124. D/t:24/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



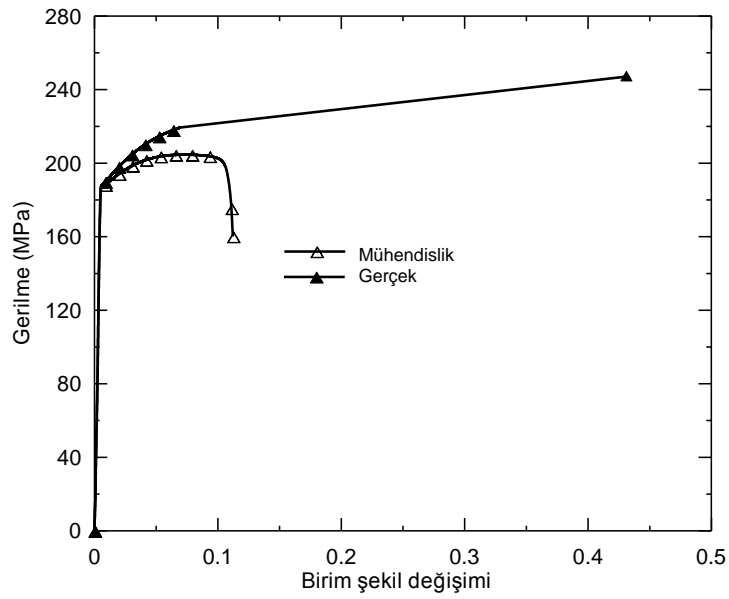
Şekil 125. D/t:24/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.



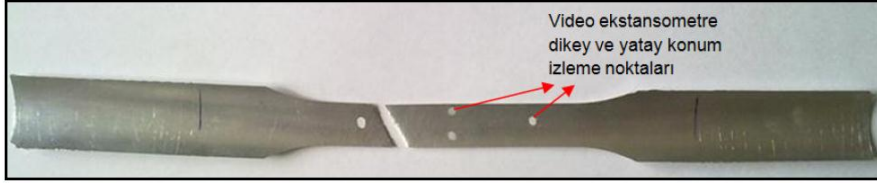
Şekil 126. D/t:30/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



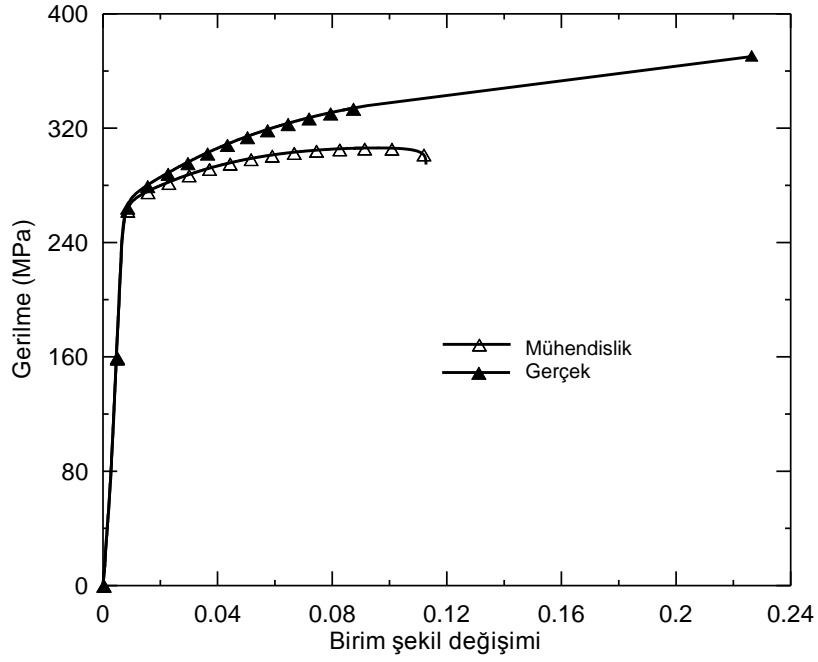
Şekil 127. D/t:30/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.



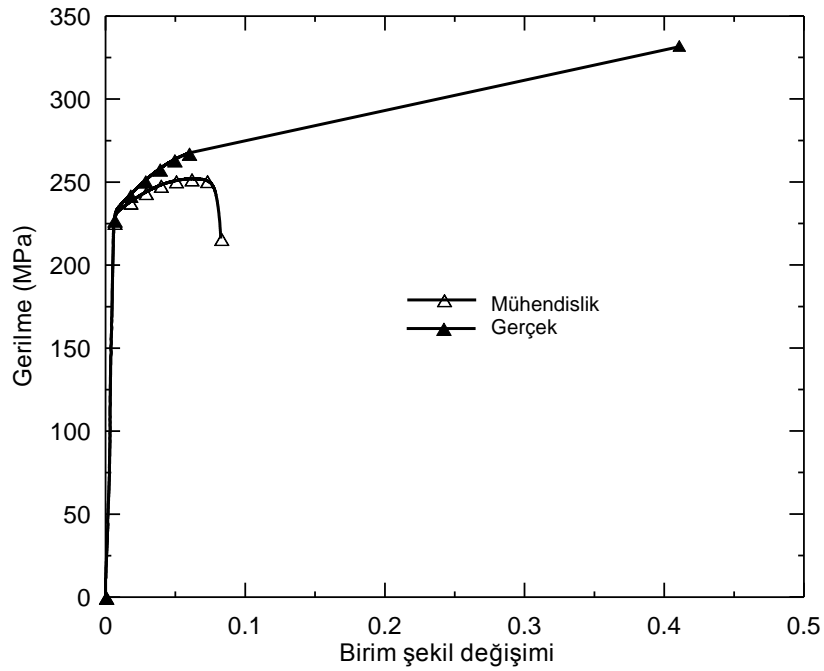
Şekil 128. D/t:31/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



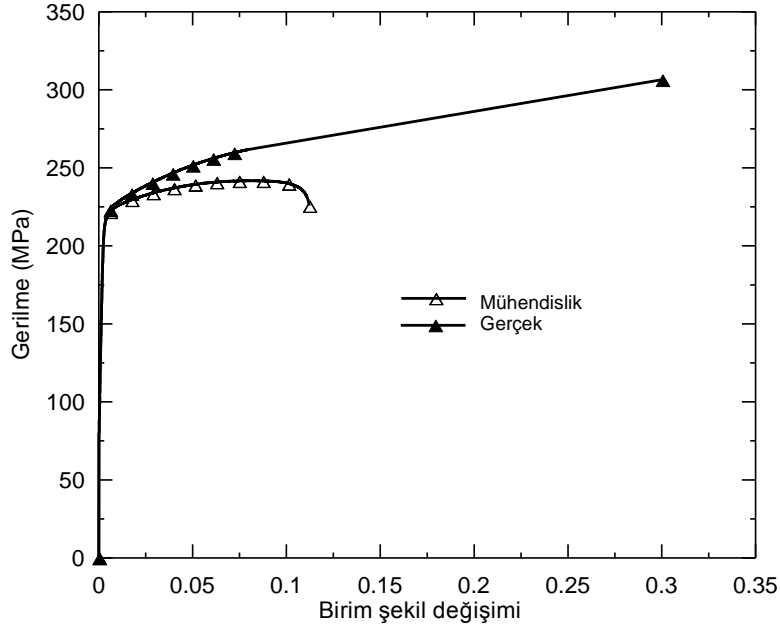
Şekil 129. D/t:31/1 mm alüminyum tüpe ait numunenin çekme deneyi sonrası görünüşü.



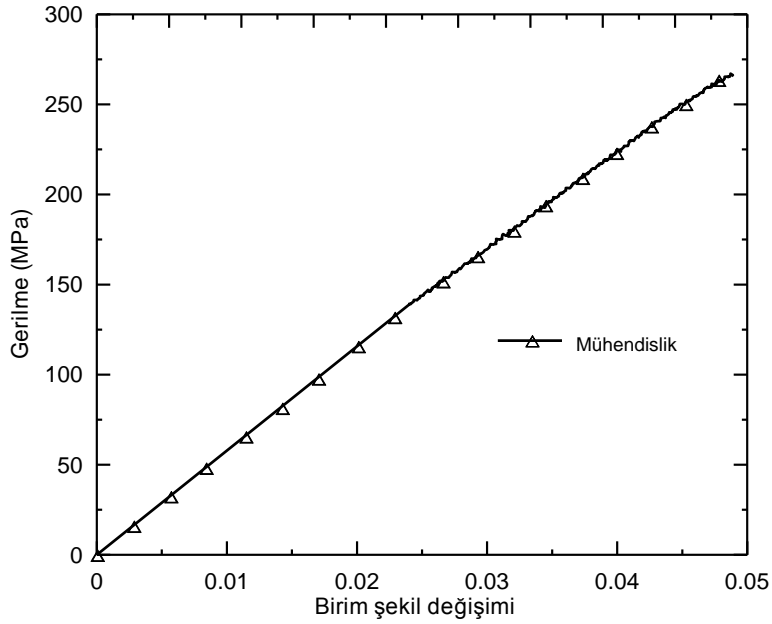
Şekil 130. D/t:31/1 mm ve sertliği 95-100 HB olan alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



Şekil 131. D/t:40/1 mm alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



Şekil 132. 40x40x1,5 kare kesitli alüminyum tüpün gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.



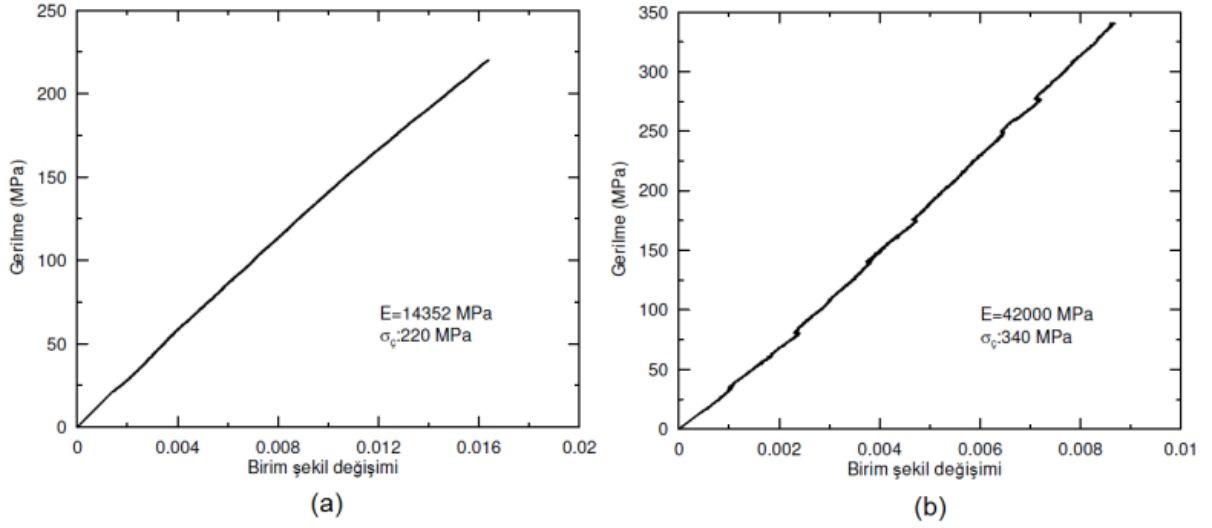
Şekil 133. Pultruzyon ürünü borunun gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.

5.1.2. Farklı Elyaf Yönlenmesine Sahip Numuneler

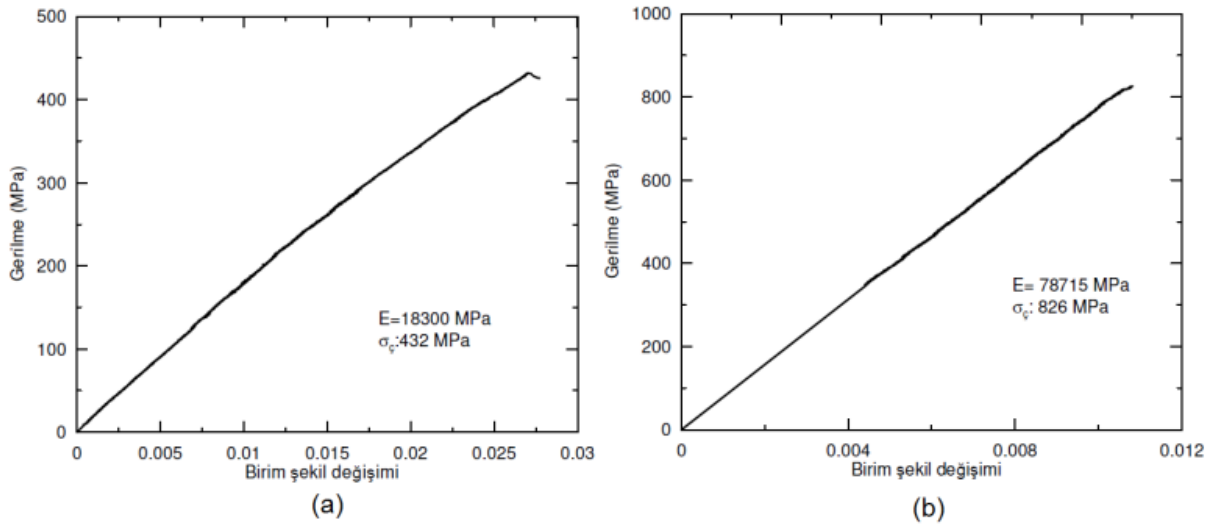
Hazırlanan numunelerin deneyleri Şekil 134'de görülen Instron marka çekme cihazında yapılmıştır. Çekme ve kayma deneyleri 2 mm/dak ve basma deneyleri 1,5 mm/dak çene hızında gerçekleştirilmiştir. Dokuma ve tek eksenli elyaf kumaşların çekme deneyi sonuçları Şekil 135-137'de, basma deneyi sonuçları Şekil 138-140'da ve kayma deneyi sonuçları Şekil 141-142'de verilmiştir. Dokuma ve tek eksenli elyaflardan hazırlanan numunelerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrasındaki hasar durumları Şekil 143-144'de ve deneylerde elde edilen değerler Tablo 8'de verilmiştir.



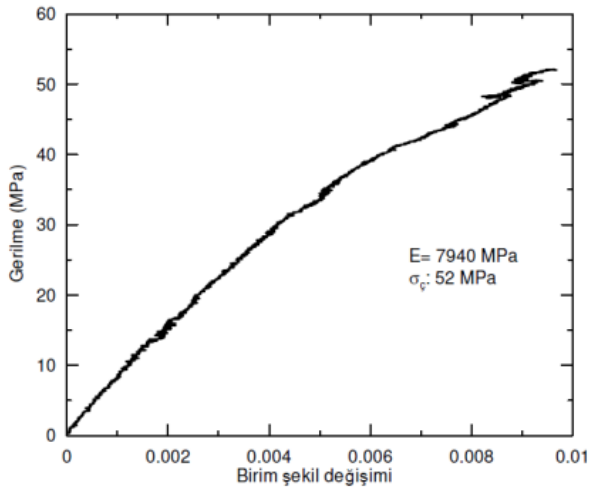
Şekil 134. Cam elyaftan hazırlanan çekme numunesine deneyin uygulanışı.



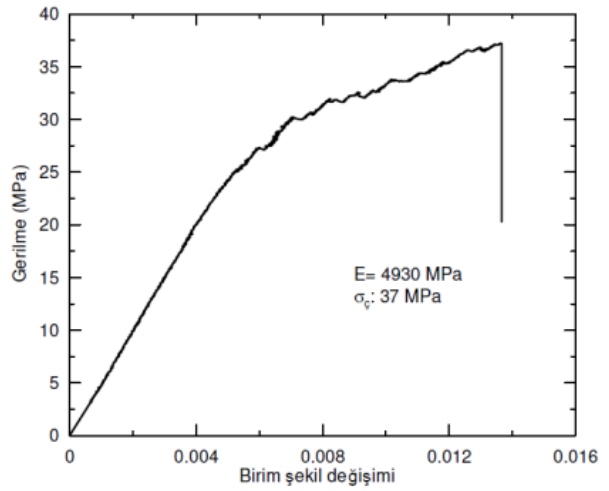
Şekil 135. Dokuma elyafların çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.



Şekil 136. Tek eksenli boyuna çekme numunelerinin çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

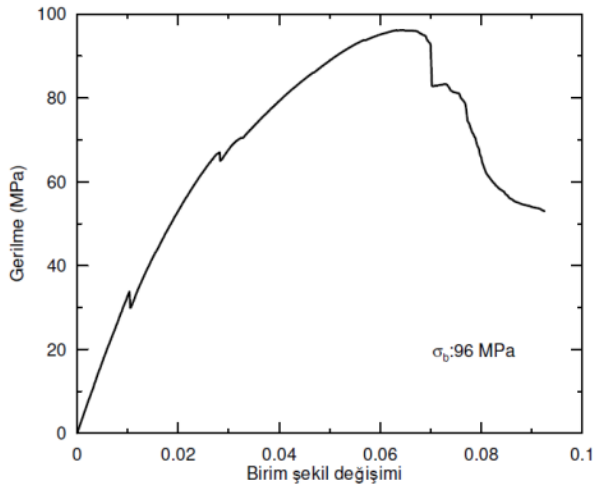


(a)

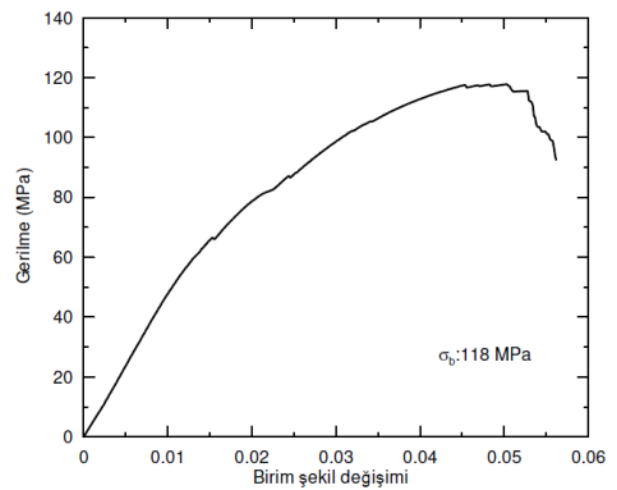


(b)

Şekil 137. Tek eksenli enine çekme numunelerinin çekme deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

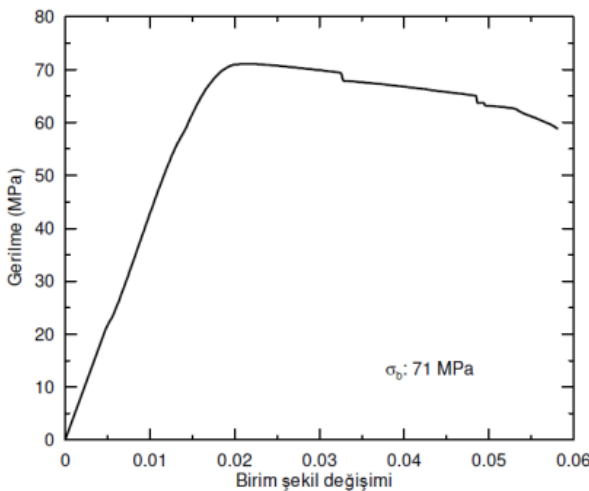


(a)

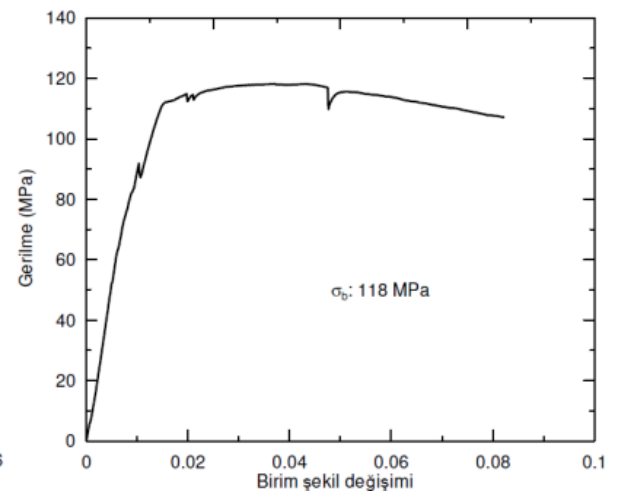


(b)

Şekil 138. Dokuma elyafların basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

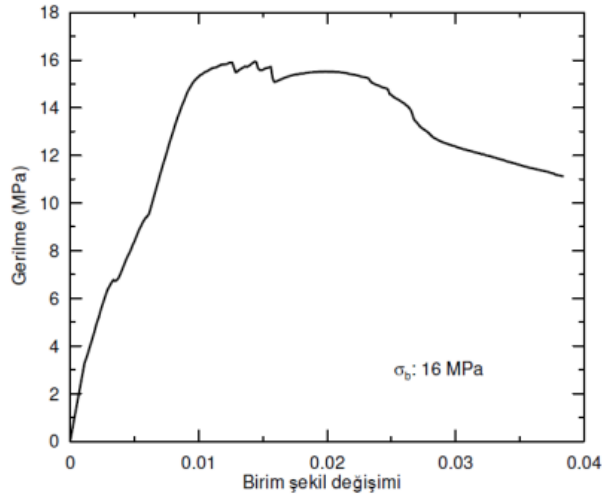


(a)

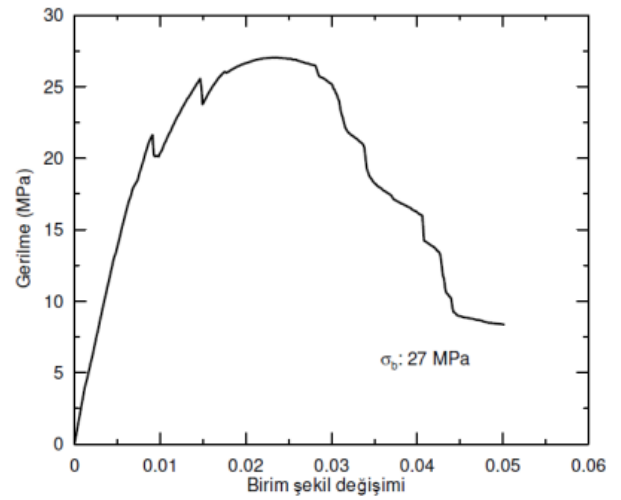


(b)

Şekil 139. Tek eksenli boyuna basma numunelerinin basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

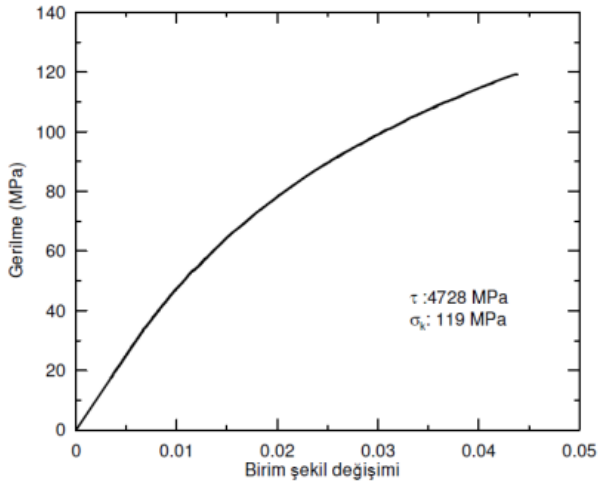


(a)

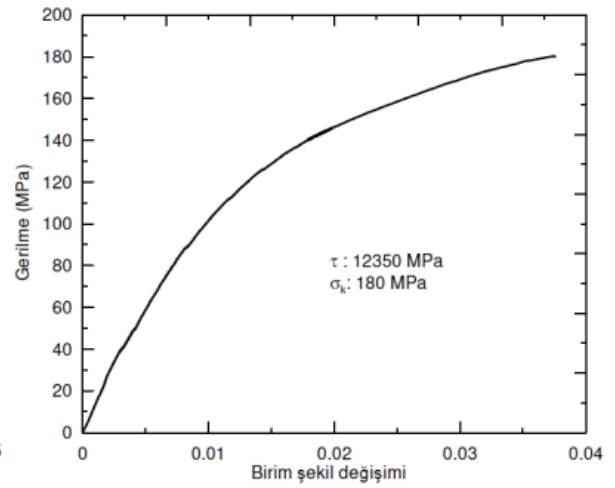


(b)

Şekil 140. Tek eksenli enine basma numunelerinin basma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

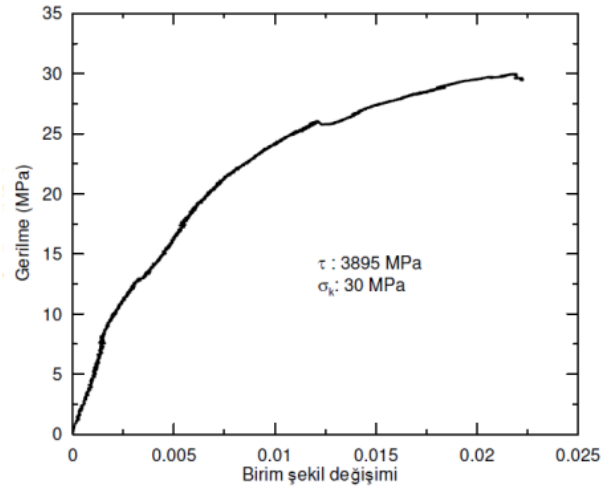


(a)

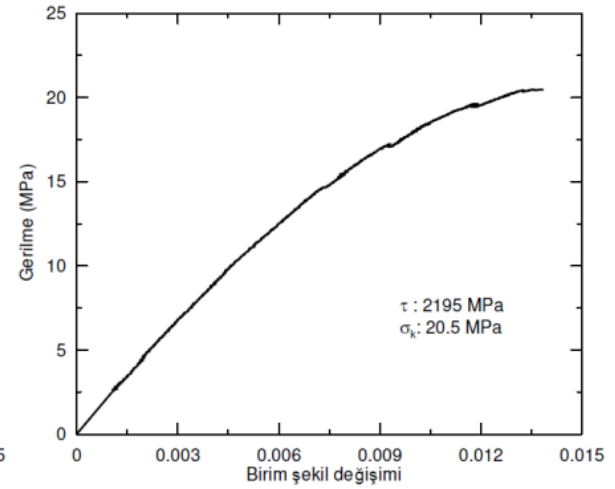


(b)

Şekil 141. Dokuma elyafların (45° yönlenmeli) kayma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.

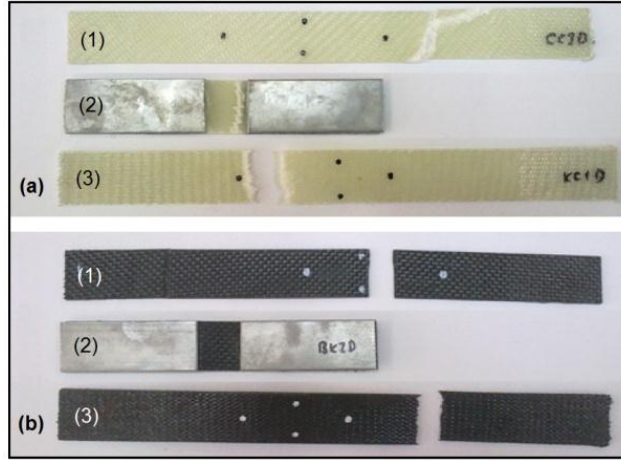


(a)

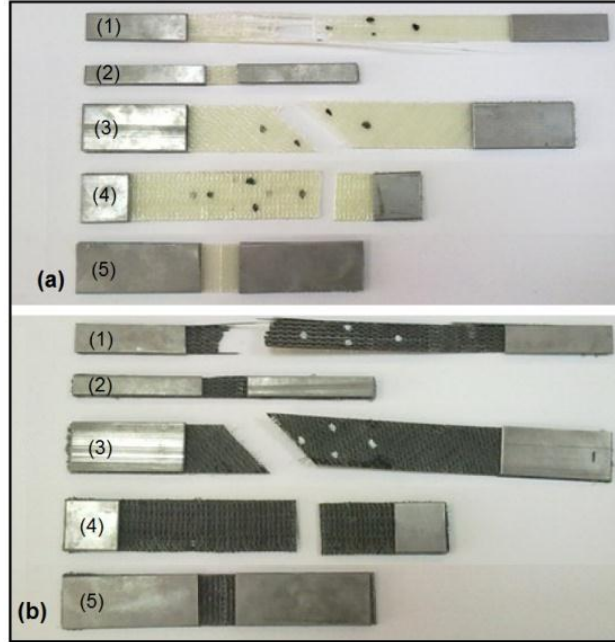


(b)

Şekil 142. Tek eksenli numunelerin kayma deneyi eğrileri: (a) CE, (b) KE.



Şekil 143. Dokuma elyaflardan hazırlanan numunelerin deney sonrası hasar durumları: (a) CE, (b) KE, (1: çekme numunesi, 2: basma numunesi, 3: kayma numunesi).



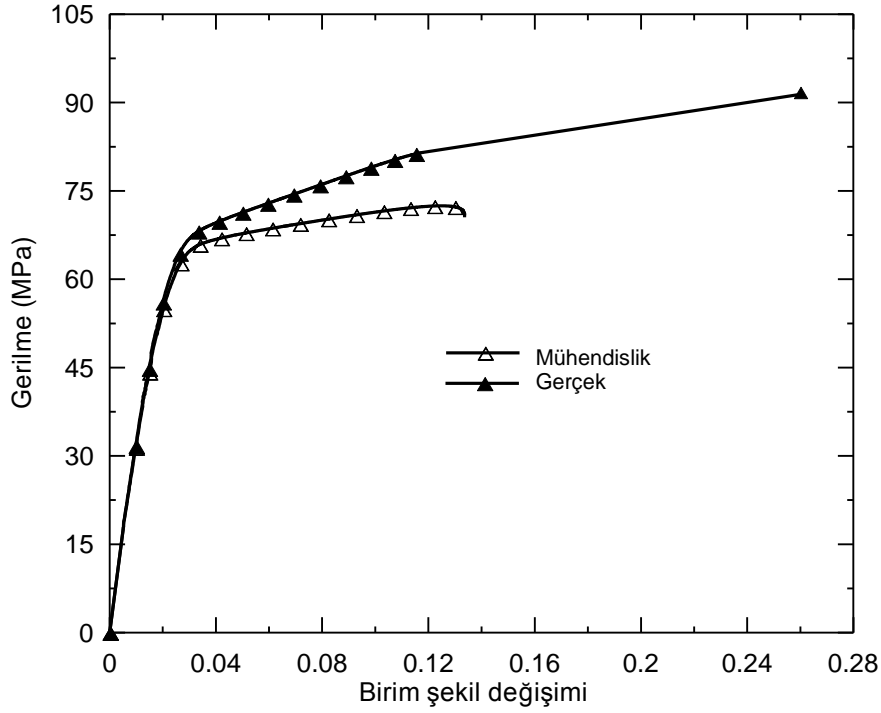
Şekil 144. Tek eksenli elyaflardan hazırlanan numunelerin deney sonrası hasar durumları: (a) CE, (b) KE, (1: boyuna çekme numunesi, 2: boyuna basma numunesi, 3: kayma numunesi, 4: enine çekme numunesi, 5: enine basma numunesi).

Tablo 8. Dokuma ve tek eksenli elyafların çekme, basma ve kayma deneyi sonuçları.

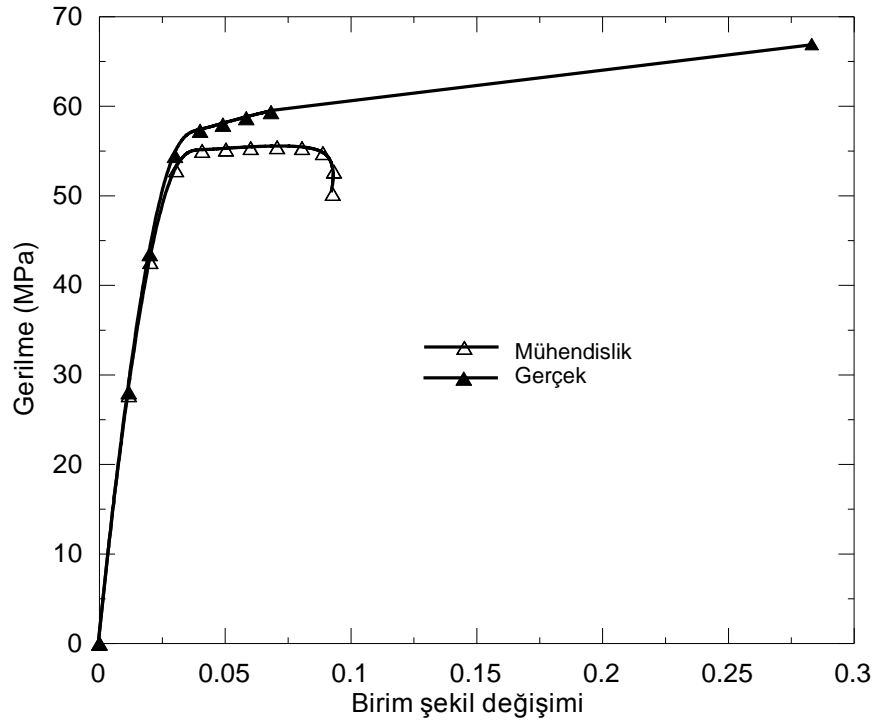
Elyaf Türü	Hacimce elyaf oranı (Vf)	Elastiklik modülü (MPa)	Kayma modülü (MPa)	Poisson oranı (-)	Çekme dayanımı (MPa)	Kayma dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)
Dokuma CE	30	14352	4728	0.3	220	119	96
Dokuma KE	30	42000	12350	0.25	340	180	118
Boyuna CE	30	18300	3895	0.17	432	30	71
Enine CE	30	7940	3895	0.17	52	30	16
Boyuna KE	30	78715	2195	0.25	826	20	118
Enine KE	30	4930	2195	0.25	37	20	27

5.1.3. Polimerik Malzemeler

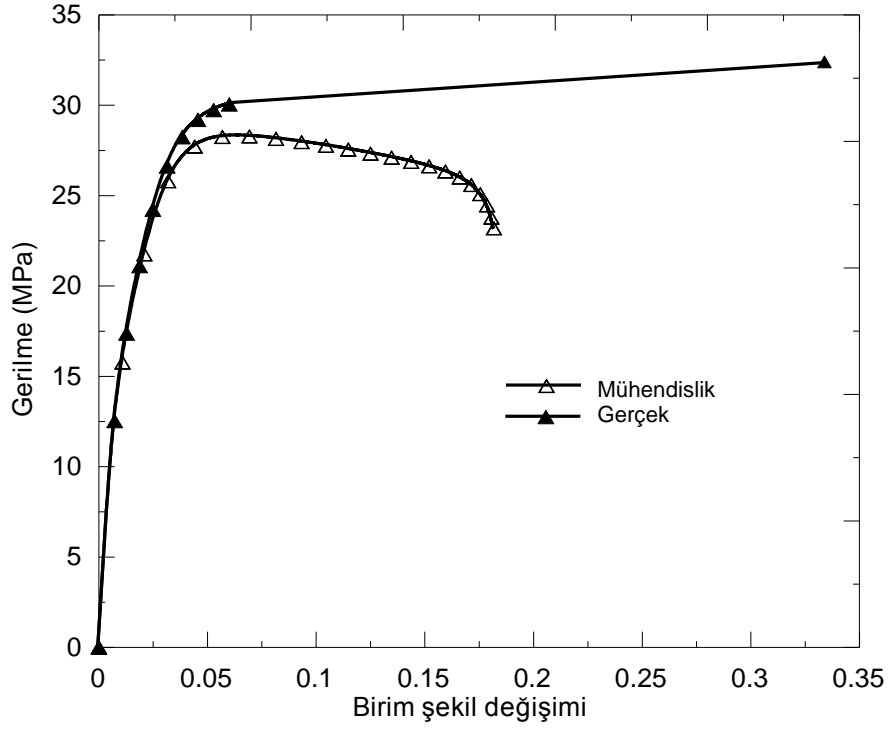
Kestamit (K), polyamit (P) ve polipropilen (PP) malzemelerden hazırlanan deney numunelerine çekme deneyleri uygulanmıştır. Deneylerde elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrileri ve deney numunelerin çekme deneyi sonrasındaki hasar durumları Şekil 145-146'de verilmiştir.



Şekil 145. Kestamite ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



Şekil 146. Polyamite ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



Şekil 147. Polipropilene ait gerilme-birim şekil değışimi eğrisi

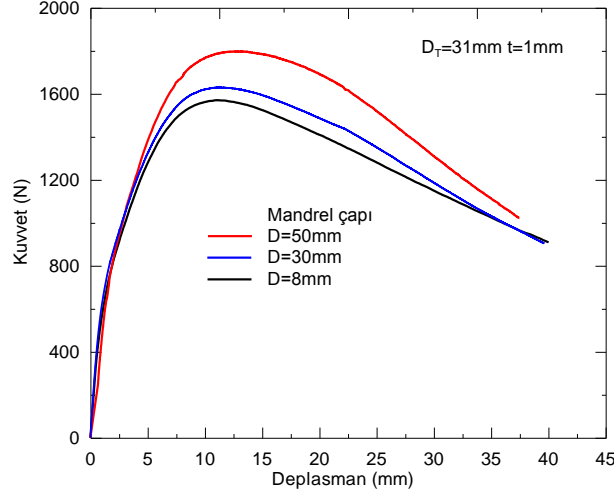


Şekil 148. Polimerik malzemelerden hazırlanan numunelerin çekme deneyi sonrası hasar durumları.

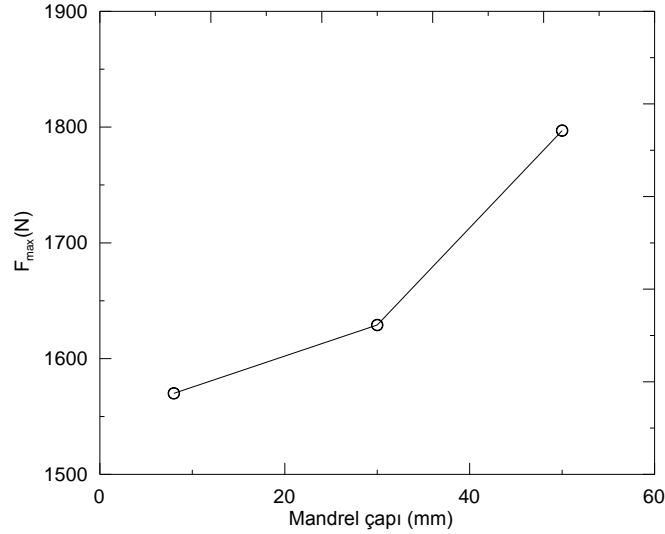
5.2. Üç Nokta Eğme Deneyleri

5.2.1. Farklı Mandrel Çaplarıyla Yapılan Deneyler

Farklı mandrel çaplarının YTK'ne olan etkisini incelemek amacıyla 8, 30 ve 50 mm çaplarındaki mandreller kullanılarak, D/t:31/1 mm'lik tüp kirişe üç nokta eğme deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerin sonuçları Şekil 149'da verilmiştir. Mandrel çapının büyümesiyle temas bölgesinin artması ve ilerleyen deplasmanlarda malzemenin sarılmasının zorlaşması nedeniyle YTK'nde artış görülmektedir. En büyük kuvvet değerinin (F_{max}) mandrel çapına bağlı olarak değişimi Şekil 150'de verilmiştir.



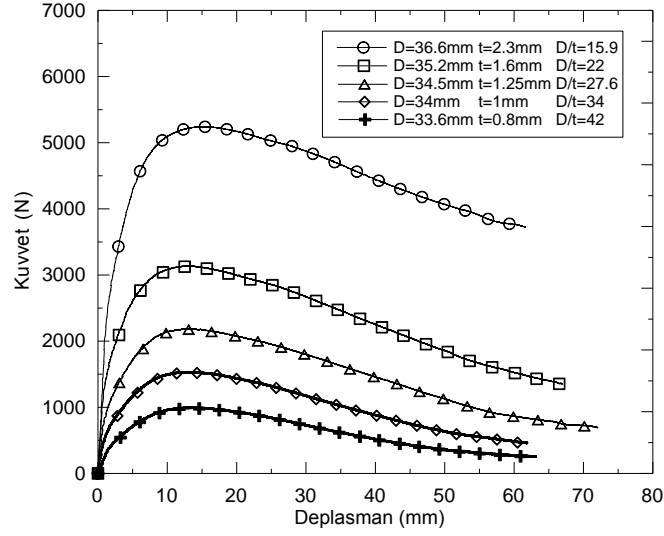
Şekil 149. D/t:31/1 mm'lik tüp kirişte, farklı mandrel çapları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 150. En büyük kuvvet değerinin (F_{max}) mandrel çapına bağlı olarak değişimi.

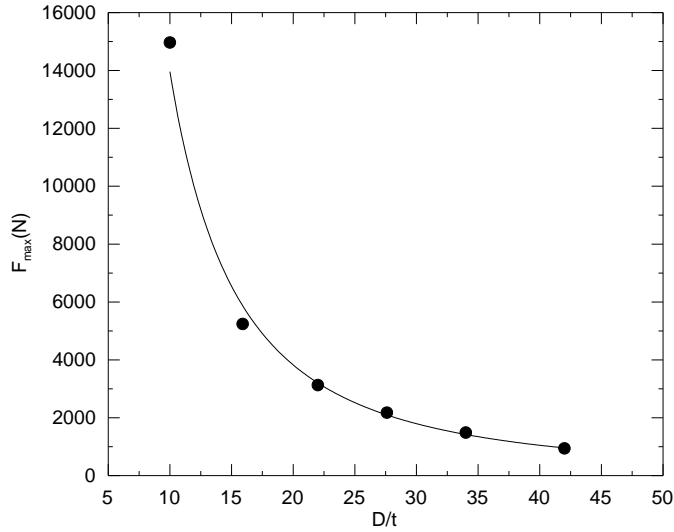
5.2.2. Farklı Çap ve Cidar Kalınlıklarındaki Tüp Kirişler

D/t:38/3 mm ölçülerindeki 6063-T6 tüp kirişin dış yüzeyinden talaş kaldırılarak üretilen beş farklı çaptaki parçaya uygulanan üç nokta eğme deneylerinin sonuçları Şekil 151'de verilmiştir. Bükülme deplasman değerlerinin çapa oranlarının %37-41 arasında değiştiği görülmüştür. Bu oranlar, sonlu eleman analizi sonuçlarından elde edilen oranlarla uyumludur.



Şekil 151. Farklı çap ve cidar kalınlığındaki tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

En büyük kuvvet değerinin (F_{max}) D/t oranına göre değişimi Şekil 152'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, D/t oranı artışıyla F_{max} 'ın azaldığı görülmektedir. Deneysel olarak belirlenen bu davranışın, D/t oranı yaklaşık 15 değerini aldığı anda atalet momentinde önemli artışın elde edildiği bölgeye karşılık gelmesi dikkat çekicidir. Diğer bir deyişle, dolu kesite doğru gidildikçe taşıma yükünün artması temel mekanik esaslarıyla uyum göstermektedir. Borunun içinden ve dışından yapılacak takviye bileşenlerinin optimize edilmesi de dâhil olmak üzere, ön gerilme için yapılacak çalışmalar $D/t:31/1$ mm ölçüsündeki borular üzerinde gerçekleştirilecektir.



Şekil 152. En büyük kuvvetin (F_{max}) D/t oranına göre değişimi

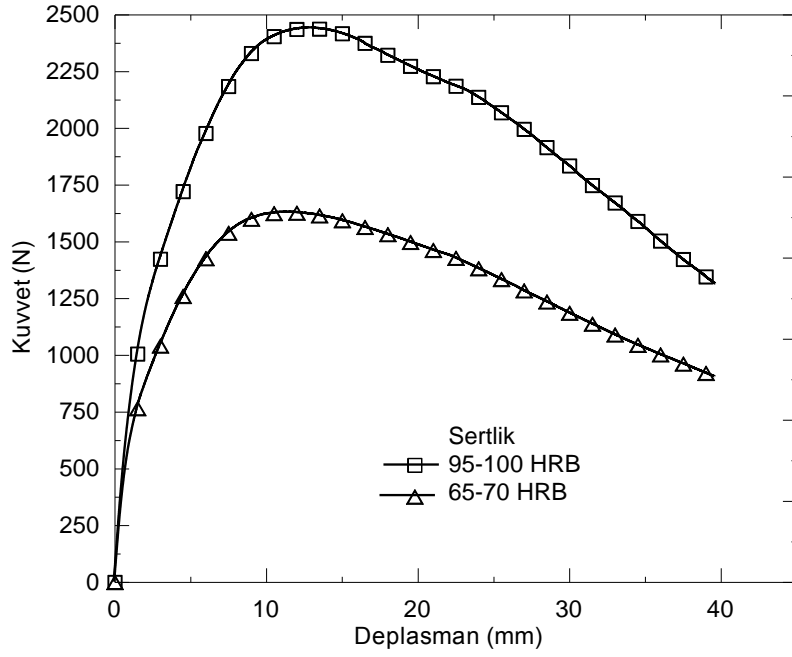
5.2.3. Takviyesiz Tüp

Üç nokta eğme deneyine tabii tutulmuş bir grup numunenin görünümü Şekil 153'de görülmektedir. Farklı sertlik değerlerine sahip takviyesiz tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 154'de verilmiştir. Alımı yapılan boruların üç farklı sertlikteki boylardan oluştuğu tespit edilmiştir. Sertliği yüksek olan (95-100 HB) borularla yapılan deneylerden daha yüksek eğme yükü elde edilmiş olmasına rağmen, ince cidarlı (1 mm) olanlarda deformasyonunun etkisiyle şişme gösteren köşelerde yırtılmalar olduğu (Şekil 155.a), kalın cidarlı olanlarda ise (2 mm) mandrelin temas ettiği bölgede yerel olarak büyük hasarların oluştuğu görülmüştür (Şekil 155.b). Sertlik değeri 65-70 HB olan boruların, içten yeterli deformasyon kabiliyeti göstermiş olması nedeniyle, takviye edilmeleri durumunda erken kırılmaların oluşmayacağı

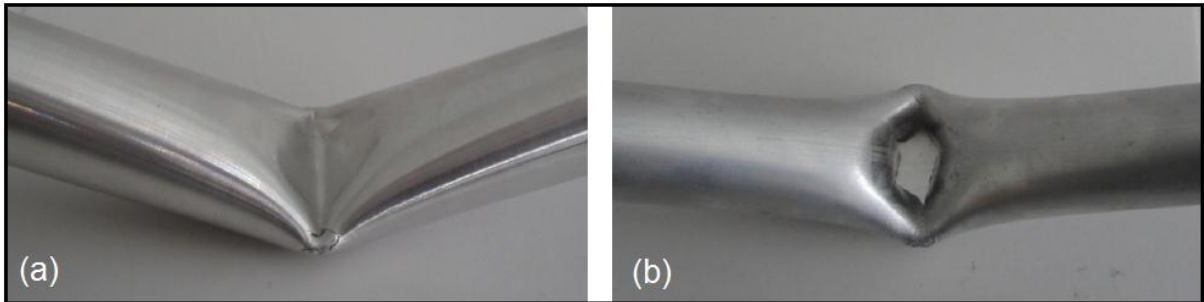
düşünülmüş ve bu grup malzemelerin kullanımına karar verilmiştir. Diğer malzemelerin ise (95-100 HB) tamamlayıcı nitelikte, malzemenin mukavemetinin ayrıca ele alınacağı kısımda kullanılmasına düşünülmüştür.



Şekil 153. Üç nokta eğme deneyine tabii tutulmuş bir grup numunenin görünümü.



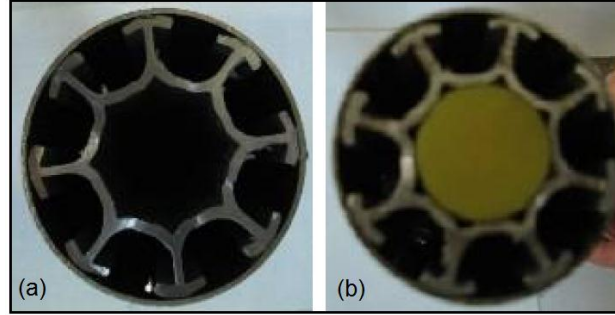
Şekil 154. Farklı sertlik değerlerine sahip tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



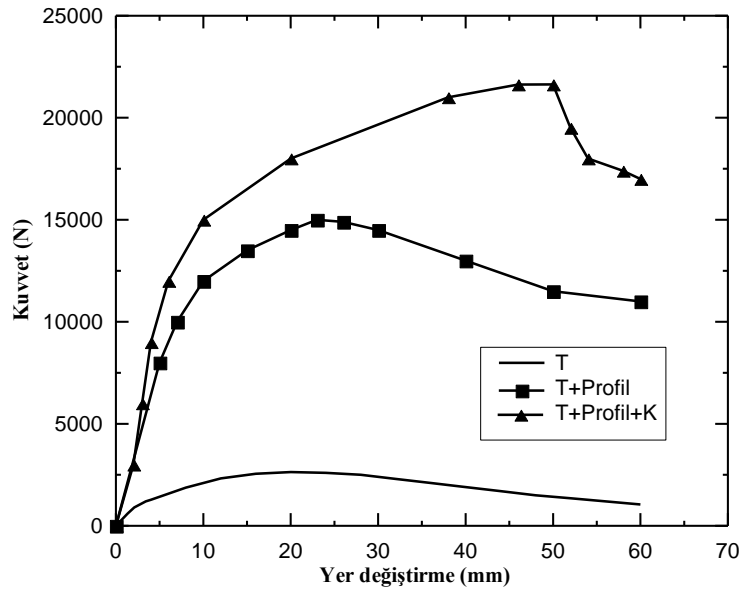
Şekil 155. Yüksek sertlikteki (95-100HB) numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşleri, (a) İnce cidarlı (1 mm), (b) Kalın cidarlı (2 mm).

5.2.4. Profil Takviyeli Numuneler

Profille takviye edilen, D/t:48/1 mm ölçülerindeki 6063 alüminyum tüp ile üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. 375 mm boyunda tüp içine alüminyum kanatlı profil ilave edilmiştir. İkinci durumda ise, kanatlı profil ilave edilen tüpün merkez kısmına dairesel kesitli K ilave edilerek, mesnetler arası mesafe 300 mm olacak şekilde, üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Kanatlı profil ve K ile takviye edilen tüp kirişler Şekil 156'da görülmektedir. Uygulanan üç nokta eğme deneylerinin sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekli 157'de ve elde edilen veriler Tablo 9'da verilmiştir. Tablo incelendiğinde, kanatlı profil takviyenin YTK'ni 7 kat, kanatlı profil+K takviyenin ise 10 kat artırdığı, EAK'ndeki artışın 11 katı geçtiği, ÖYTK'nde 2.3 kat ve ÖEAK'nde 2.5 kat artış olduğu görülmektedir.



Şekil 156. İçten kanatlı profil takviyeli tüp kiriş. (a) Sadece kanatlı profil, (b) Kanatlı profil+K.



Şekil 157. Kanatlı profil takviyeli tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Tablo 9. İçten profil ve kestamit takviyeli tüp kirişlerin üç nokta eğme deneyi sonuçları.

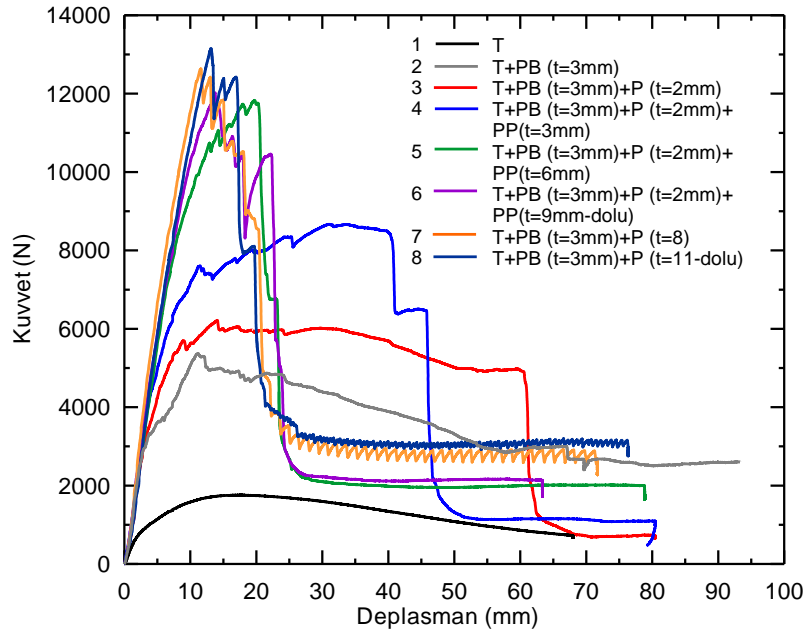
No	Kombinasyon	F _{max} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	F _{max} oranı	Enerji oranı	F _{max} /ağırlık ÖYTK (N/gr)	Enerji/ağırlık ÖEAK (J/gr)
1	T	2100	89.2	156	1,0	1,0	13,5	0,6
2	T+Profil	15000	725	530	7,1	8,1	28,3	1,4
3	T+Profil+K	21650	1046	700	10,3	11,7	30,9	1,5

*Enerjiler 60 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır.

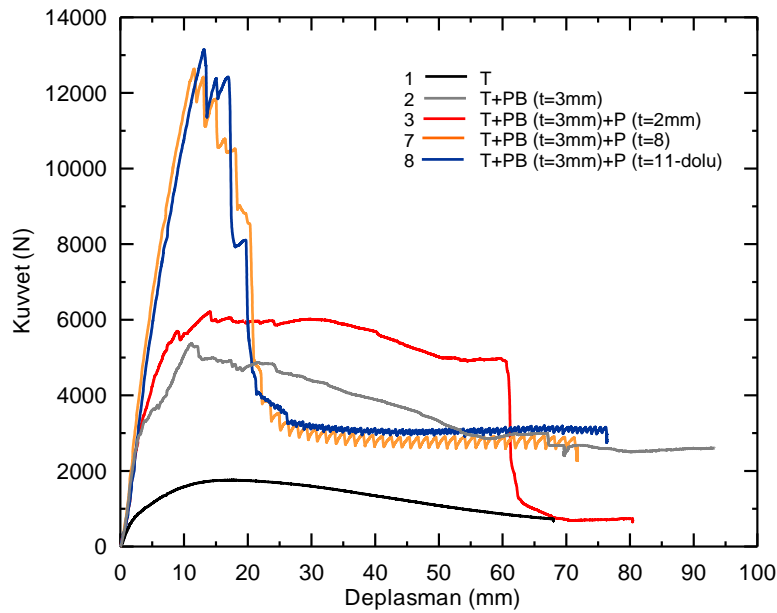
5.2.5. İçten Takviye Edilen Kompozit Numuneler

5.2.5.1. Ø 30 Numuneler

30 mm çaplı alüminyum tüpün, PB, P ve PP ile içten takviye edilmesiyle üretilen kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 158-160'da verilmiştir. Deney sonuçlarından, tüp kirişin PB, P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kombinasyonlarda kuvvet değerinin 7,5 kat artarak 13151 N değerine ulaştığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, PB'nin yanında farklı kalınlıklarda P'nin takviyesiyle kalınlığa bağlı olarak YTK artmıştır (Şekil 159). P kalınlığı arttıkça YTK artarken mak. kuvvetin görüldüğü deplasmandan sonra, öncelikle tüp yapıda, daha sonra da PB'de ani yırtılmalar görülmüştür. Bu ani yırtılmalara bağlı olarak absorbe edilen enerji değerleri de kalın ve dolu kesitli parçalarda azalmıştır.

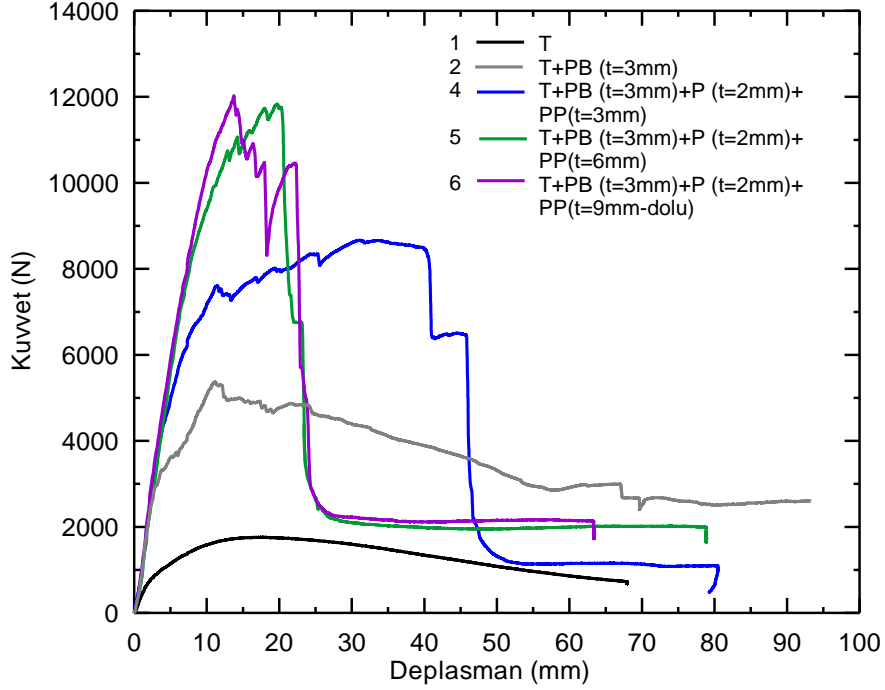


Şekil 158. Boş tüpün PB, P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 159. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta P ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Şekil 160'da farklı kalınlıklardaki PP'nin kompozit yapının yük taşıma davranışına olan etkisi açık bir şekilde görülmektedir. 5 ve 6 nolu kombinasyonlarda belirlenen en büyük kuvvet değerleri arasında önemli bir fark yoktur. Enerji absorbe etme açısından da aynı durum söz konusudur. Erken kırılmalara bağlı olarak kalın ve dolu kesitli parçalarda absorbe edilen enerji değerlerinin düştüğü görülmüştür.

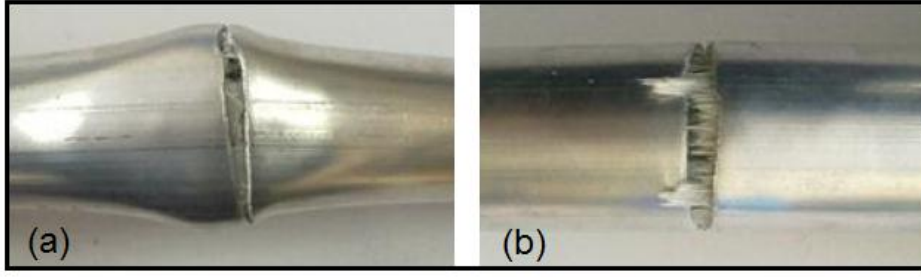


Şekil 160. Boş tüpün PB, P ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Deney sonucu oluşan hasara ait toplu resim Şekil 161'de ve kırılma bölgesinin daha detaylı resimleri Şekil 162'de verilmiştir. Soldan sağa doğru artan takviye unsurlarıyla yük değerindeki artışa paralel olarak cidardaki yırtılmanın daha düşük deplasmanlara geliştiği görülmektedir.



Şekil 161. PB, P ve PP'li kombinasyonların üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşleri.

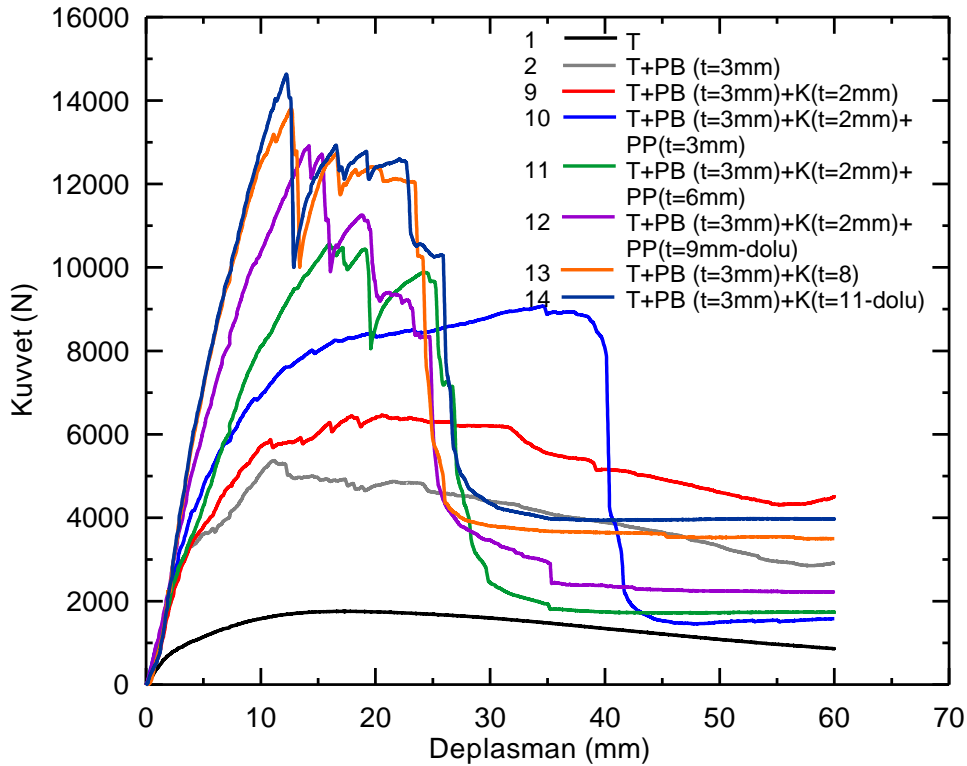


Şekil 162. Üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşler: (a) T+PB(3)+P(2), (b) T+PB(3)+P(11-dolu)

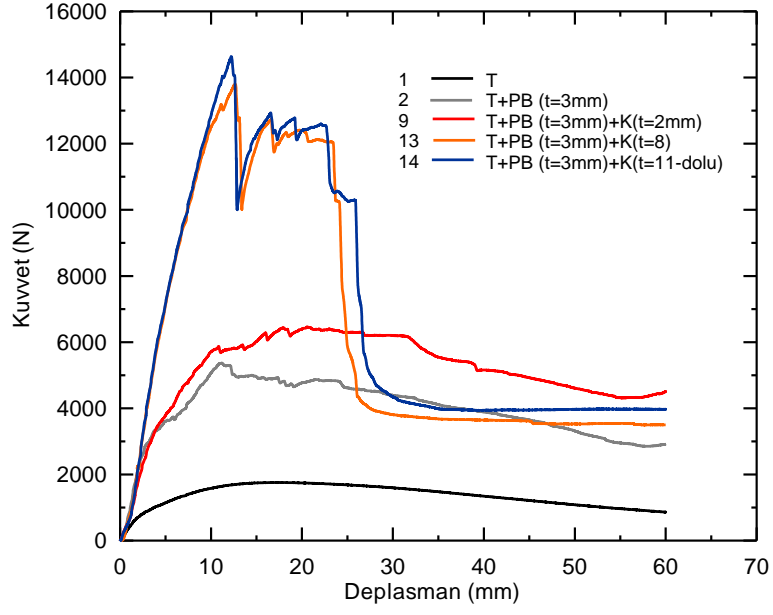
Boş tüpün içten PB, K ve PP takviye edilmesiyle oluşturulan kombinasyonların üç nokta eğme deney sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 163-165'de verilmiştir. Deney sonuçlarından, bu kombinasyonlar için, kuvvet değerinin 8,3 kat artarak 14633 N değerine ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 163). Hasar mekanizmaları P'li grupla benzerlik göstermektedir. Şekil 164'den anlaşılacağı gibi, K cidar kalınlığının 8 mm'den daha kalın olması numune ağırlığını arttırmakta, ancak taşınabilecek yük değerine efektif bir katkısı olmamaktadır.

Boş tüpün, PB ile beraber farklı kalınlıklarda P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kombinasyonlarda ise, artan kalınlığa bağlı olarak YTK artmaktadır. Erken kırılmalara bağlı olarak 11 ve 12 nolu numunelerde absorbe edilen enerji değerlerinin düştüğü görülmüştür.

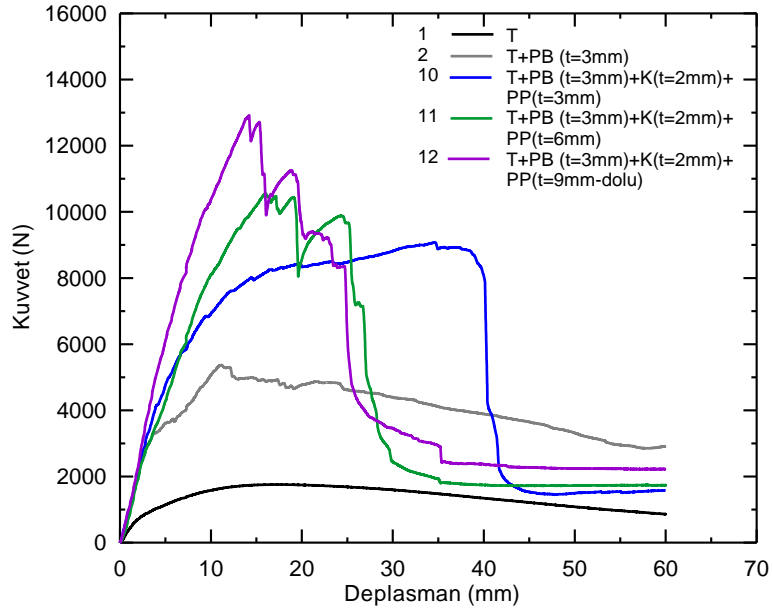
Deney sonucu oluşan hasara ait toplu resim Şekil 166'da ve kırılma bölgesinin daha detaylı resimleri Şekil 167'de verilmiştir.



Şekil 163. Boş tüpün PB, K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 164. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta K ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 165. Boş tüpün PB, K ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

İçten takviye unsuru olarak T, K, P, PP'nin kullanıldığı kompozit kirişlere ait deneysel veriler Tablo 10'da listelenmiştir.

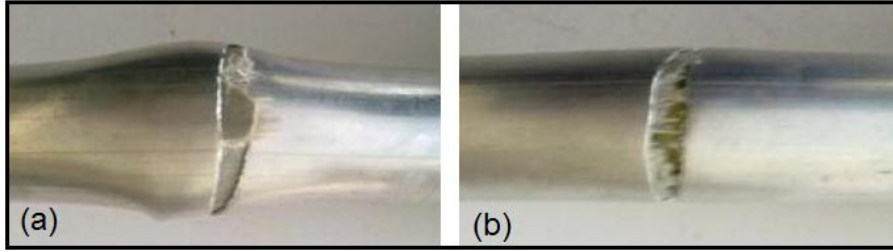
Tablo 10. Çapı 30 mm olan tüp kirişe içten takviye edilerek oluşturulan numunelerin üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon*		F_{max} (N)	Enerji** (J)	Ağırlık (gr)	F_{max} oranı	Enerji oranı	$F_{max}/ağırlık$ (N/gr)***	Enerji/ağırlık (J/gr)****	Enerji/ağırlık (J/gr)
1	-	T	1756	98,3	61	1,00	1,00	28,79	0,73	1,61
2	-	T+PB(3)	5368	206	170	3,06	2,89	31,58	0,76	1,21
3	-	T+PB(3)+P(2)	6214	268	202	3,54	3,52	30,76	0,77	1,33
4	-	T+PB(3)+P(2)+PP(3)	8666	338	233	4,94	4,58	37,19	0,87	1,45
5	-	T+PB(3)+P(2)+PP(6)	11832	245	255	6,74	4,61	46,40	0,80	0,96
6	-	T+PB(3)+P(2)+PP(9-dolu)	12026	254	262	6,85	4,74	45,90	1,00	1,20
7	-	T+PB(3)+P(8)	12638	267	274	7,20	4,73	46,12	0,77	0,97
8	-	T+PB(3)+P(11-dolu)	13151	264	280	7,49	4,56	46,97	0,73	0,94
9	-	T+PB(3)+K(2)	6460	263	201	3,68	3,55	32,14	0,79	1,31
10	-	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	9070	316	235	5,17	4,67	38,60	0,89	1,34
11	-	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	10561	250	256	6,01	4,79	41,25	0,83	0,98
12	-	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	12921	287	262	7,36	5,30	49,32	0,90	1,10
13	-	T+PB(3)+K(8)	13805	339	275	7,86	5,98	50,20	0,97	1,23
14	-	T+PB(3)+K(11-dolu)	14633	363	282	8,33	6,34	51,89	1,00	1,29

*T: Alüminyum tüp kiriş, PB: Pultruzyon boru, K: Kestamit, P: Polyamit, PP: Polipropilen; Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir; **Enerjiler 50 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır; *** ÖYTK: Özgül Yük Taşıma Kabiliyeti; **** ÖEAK: Özgül Enerji Absorbe Etme Kabiliyeti.



Şekil 166. PB, K ve PP'li kombinasyonların üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşleri.

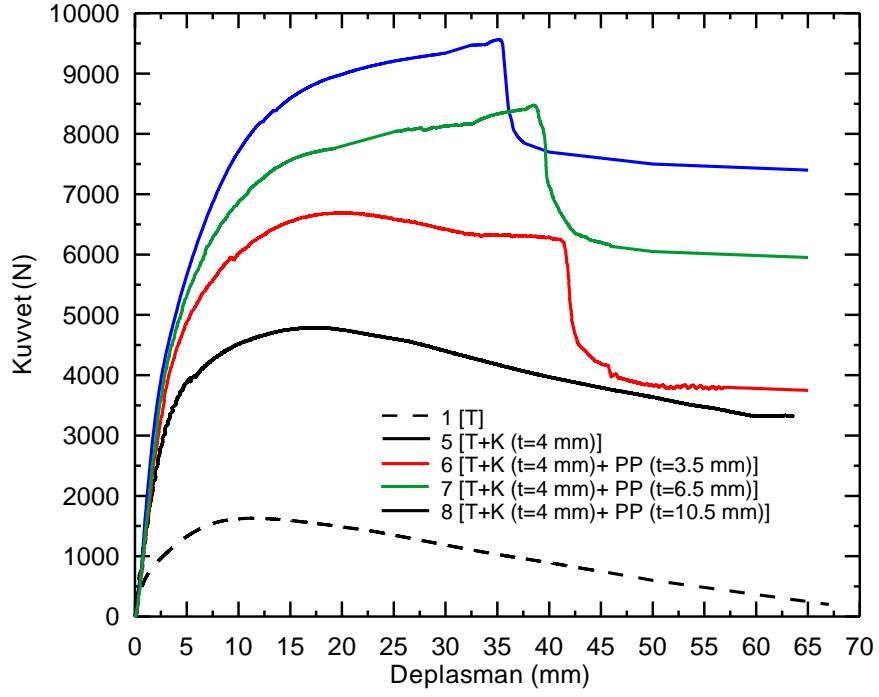


Şekil 167. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri: (a) T+PB(3)+K(2)+PP(3), (b) T+PB(3)+K(8)

Buraya kadar yapılan incelemelerden, içinde K bulunan kombinasyonların, P bulunan kombinasyonlara göre daha yüksek YTK değerleri sağladığı belirlenmiştir. Bu sebeple, içten yapılacak takviyelerde K'lı grup seçilerek deney numuneleri hazırlanmıştır.

5.2.5.2. Ø 31 Numuneler

31 mm çaplı alüminyum tüpün K ve PP ile içten takviye edilmesiyle üretilen kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 168'de ve bir grup numunenin deney sonrası görünüşü Şekil 169'da verilmiştir. Deney sonuçlarından, tüp kirişe K ve PP ilave edilmesiyle yapılan takviye neticesinde, kompozit kirişin YTK ve rijitlik değerlerinin arttığı, kuvvet değerinin 5,9 kat artarak 9564 N değerine ulaştığı belirlenmiştir. Bunların yanı sıra maksimum kuvvette ulaşılan deplasman değerinin de ötelenerek kirişin tokluğunu arttığı görülmektedir. K+PP(6,5) durumundaki kuvvet-deplasman eğrisinde, tepe noktasından tüpün yırtılması sonucu kuvvet hızlı bir şekilde düşmektedir. K+PP(3,5) durumunda tüp yapıda yırtılma oluşmamaktadır. Bunun nedeni, tüpün yanal doğrultuda şişmeye çalışması ve içerideki malzemenin bir miktar ezilerek buna izin vermesine bağlıdır. Cidar kalınlığının yüksek olduğu diğer numunelerde sözü edilen nedenden dolayı tüp yapı yırtılmaktadır.

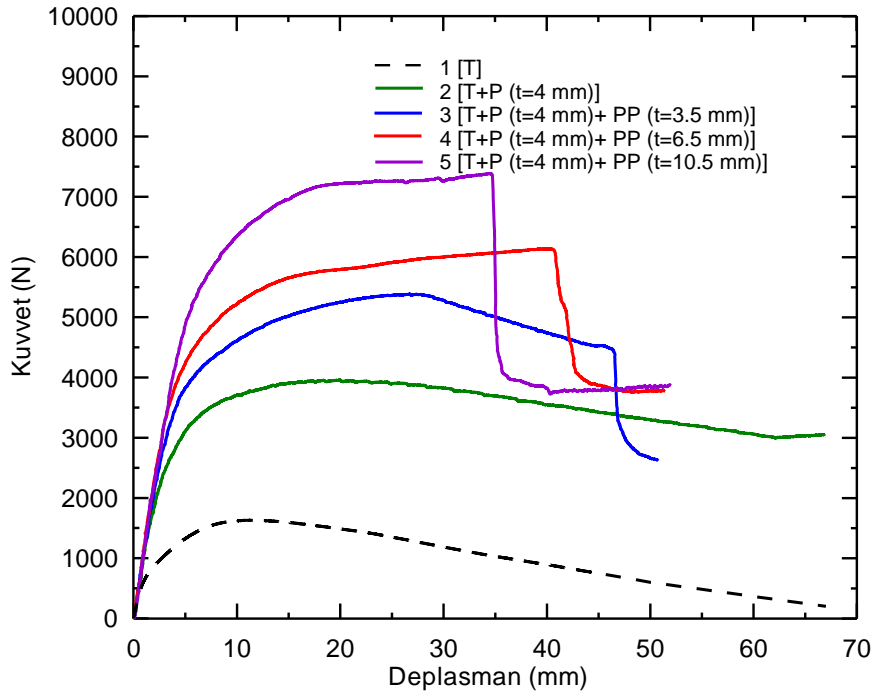


Şekil 168. Boş tüpün K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 169. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri.

K yerine P kullanılan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 170'de verilmiştir. Şekilden, kuvvet değerinin 4,4 kat artarak yaklaşık 7150 N ulaştığı görülmektedir. Farklı kalınlıklardaki PP takviye unsurunun kullanılmasıyla elde edilen numunelerin kuvvet-deplasman eğrilerinde, kuvvette ani bir düşüşün görüldüğü tepe noktasında tüpün yırtıldığı görülmektedir.



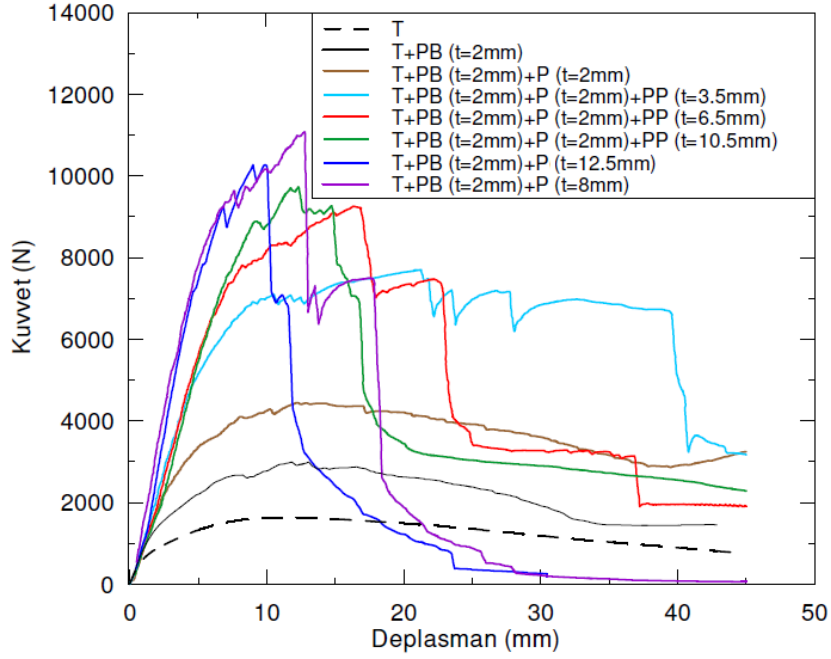
Şekil 170. Boş tüpün P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

P+PP'ye ek olarak PB'nin de ilave edildiği kompozit kirişin üç nokta eğme deneyine ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 171'de verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere yapılan takviyeyle orantılı olarak kirişin YTK ve rijitlik değerleri artmaktadır. Takviyesiz tüp yapının maksimum eğme kuvveti 1620 N iken, yapılan takviye neticesinde kuvvet değerinin 6,8 kat artarak 11000 N değerine ulaştığı belirlenmiştir. Polimerik takviyelerin zorlanma esnasında gösterdiği direnç cidar kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca alüminyum tüpün bükülme esnasında yanıl doğrultuda yayılmaya çalışması, içerideki takviye unsurun rijitliğine bağlı olarak kısıtlanmakta bu durum tüpün alt yüzeyinde iki eksenli gerilmenin etkisini arttırarak yırtılma oluşumunu hızlandırmaktadır. Genel olarak grafiklerdeki ani kuvvet düşüşlerinin, yapıda sünekliliği az olan ve parçanın daha çok yüzeyine yakın kısımlardaki takviye unsurunun hasarlanmasından kaynaklandığı görülmüştür. Şekil 171'de, kuvvetin en büyük değerine yaklaştığı deplasmanlarda küçük süreksizlikler (zig-zag) pultrüzyon ürünü borunun yapısındaki elyafların hasarlanmasına, kesintili ani düşüşler ise ara yüzeydeki yapıştırmanın görevini yitirdiğini işaret etmektedir. Deney sonuçları ve parametrelere ait veriler Tablo 11 de verilmiştir.

Tablo 11. İçeriden takviye edilmiş kompozit kirişler

No	Kombinasyon	F _{max} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	F _{max} oranı	Enerji oranı	F _{max} /ağırlık (ÖYTK) (kN/kg)	Enerji /ağırlık (ÖEAK) (kJ/kg)
1	T	1620	59,2	69	1,0	1,0	23,5	0,86
2	T+ P (t=4 mm)	3956	176	160	2,4	3,0	24,7	1,10
3	T+ P (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	5381	226,5	205	3,3	3,8	26,2	1,10
4	T+ P (t=4mm) + PP (t=6.5 mm)	6137	255,2	232	3,8	4,3	26,5	1,10
5	T+P (t=4mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	7384	278,2	240	4,6	4,7	30,8	1,16
6	T+ K (t=4 mm)	4790	206,5	163	3,0	3,5	29,4	1,27
7	T+ K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	6695	281,6	206	4,1	4,8	32,5	1,37
8	T+ K (t=4mm) + PP (t=6.5 mm)	8475	346	232	5,2	5,8	36,5	1,49
9	T+K (t=4mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	9564	392	240	5,9	6,6	39,9	1,63

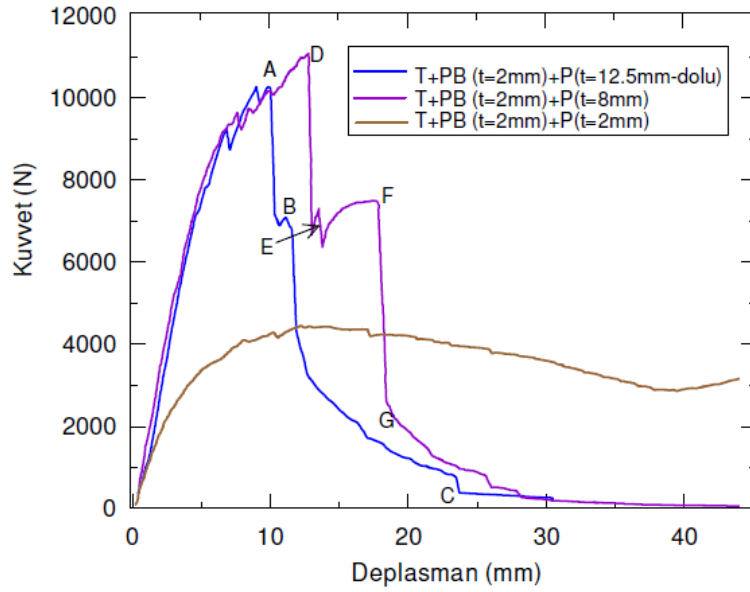
T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamid, P: Polyamid, PP: Polipropilen. *50 mm'lik deplasmana kadar hesaplanmıştır



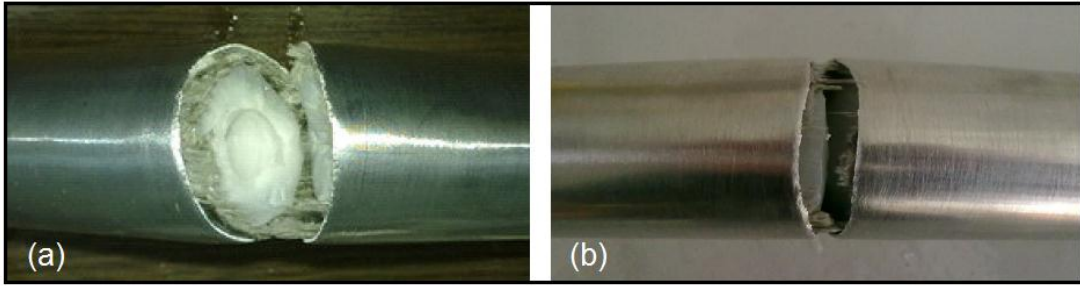
Şekil 171. Boş tüpün PB, P ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Kompozit kirişte kullanılan P kalınlığının YTK'ne olan etkisi Şekil 172'de daha açık bir şekilde görülmektedir. 8 mm P içeren yapının (mor eğri), küçük süreksizliklerle 11000 N kuvvetin bir miktar üzerine, nispeten daha büyük deplasmanla (13 mm) çıktığı D noktasında, PB'deki aylanma kuvvetin çok hızlı bir şekilde 6200 N değerine düşmesine neden olmuştur. Boru ve P'nin birbirlerine yaklaşarak sıkışması neticesinde bir miktar kuvvet artmaktadır. F noktasında başlayan, G noktasına kadar devam eden borudaki yırtılmayı takiben içi boş P'nin de 45 mm deplasmanda hasarlanmasıyla parça üzerinde kuvvet tamamen sıfırlanmıştır. Hasarlanma neticesinde ayrılan yüzeylerin görünümü aşağıda Şekil 173.a'de görülmektedir. 12,5 mm P içeren yapının (mavi eğri) küçük süreksizliklerle kuvvet değeri 10270 N değerine yükselmekte, A noktasında başlayan PB'deki ayrılma, kuvvetin 7000 N değerine düşmesine neden olmakta, B-C arasında ise borudaki yırtılmayla birlikte P'nin tamamen ayrılarak hasarlanması gerçekleşmektedir. Kırılmış numuneye ait görünüş Şekil 173.b'de görülmektedir.

Yukarıda söz edildiği gibi, artan P cidar kalınlığı ile YTK'nın artması beklenen bir durumdur. Ancak tamamen dolu kesite sahip P yapının, 8 mm cidar kalınlığındaki içi boş yapıya göre kuvvet açısından bir üstünlüğü olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni içi dolu kesitte radyal yönde rijitliği artmış olan yapı botunun daralmasını kısıtlamakta ve borunun daha küçük deplasmanlarda yırtılmasına yol açmaktadır. Bu durum dolu kesitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş parçaların ortak bir davranışıdır.



Şekil 172. Boş tüpün PB ve üç farklı kalınlıkta P ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

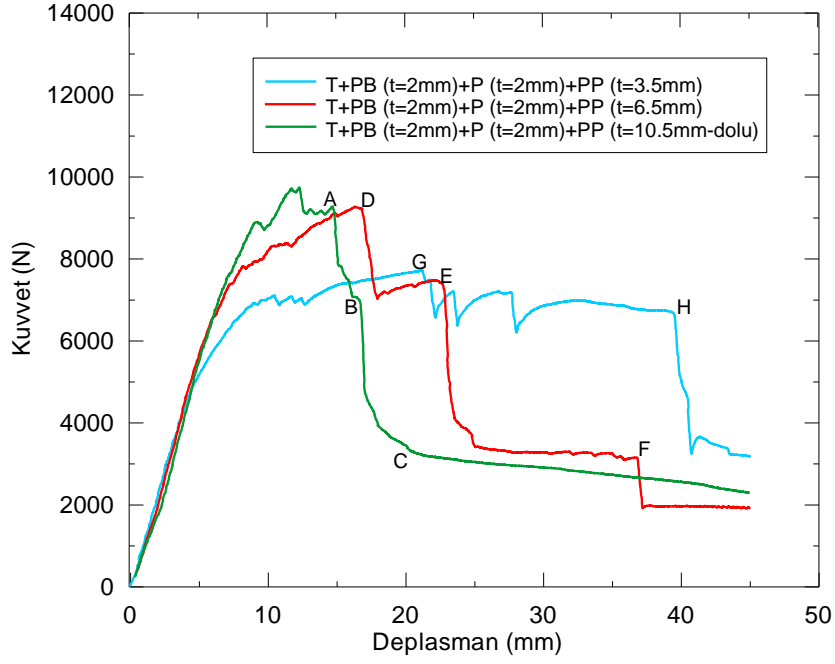


Şekil 173. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görüntüleri: (a) PB(2)+P(8), (b) PB(2)+P(12,5-dolu).

Takviye edilen PP kalınlığının kompozit yapının davranışına olan etkisi Şekil 174'de görülmektedir. PP kalınlığının artmasıyla YTK'nın arttığı açık bir şekilde görülmektedir. 3,5 mm PP içeren yapı (açık mavi), maksimum 7700 N taşımaktadır. G noktasında PB'nin hasarlanmasıyla kuvvet düşmüştür, H noktasında ise boruda hasarın oluşmasıyla geride yükü taşıyan P ve PP kalmıştır.

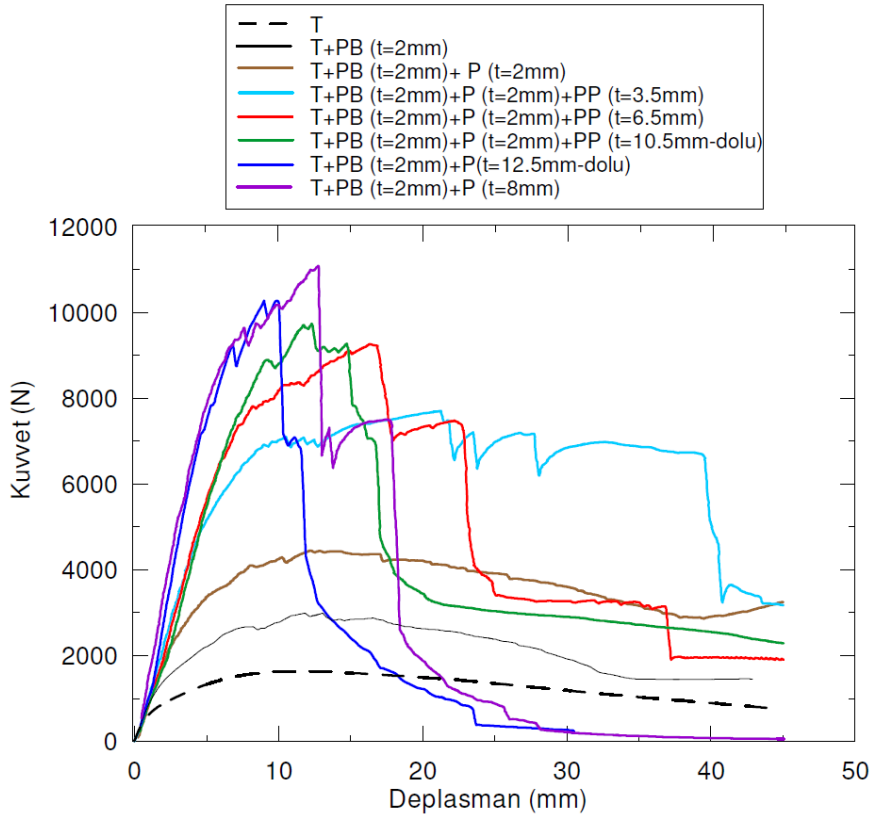
6,5 mm PP içeren yapı (kırmızı), diğerlerinden biraz farklı olarak, kademeli bir hasar davranışı göstermiştir. 9200N değerinde PB hasarlanarak kuvvet hızlıca düşmekte, E noktasında tüp kırış, F noktasında ise P hasarlanarak, YTK kademeli bir şekilde azalmaktadır. Nihayet hasara uğramayan PP üzerinde 2000N mertebelerinde kuvvet taşımaktadır.

10,5 mm polipropilen içeren yapı (yeşil eğri), 9700 N'a kadar kadar fiber yırtılmasının etkisiyle süreksizlik göstermektedir. A noktası (9300 N) ve B noktası arasında PB tamamen ayrılmakta, B noktası ve C noktası arasında ise borudaki yırtılmayla kuvvet düşüşü devam etmektedir. C noktasından sonra yapıda P ve PP'nin sağlam kalması nedeniyle 45 mm deplasmana kadar yapının yaklaşık olarak 2100 N'luk kuvvet taşımaktadır. PP'nin elastiklik modülünün P'ye göre daha düşük (%25) olması nedeniyle elastik bölgedeki kirişin rijitliğinin diğerlerine göre daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.



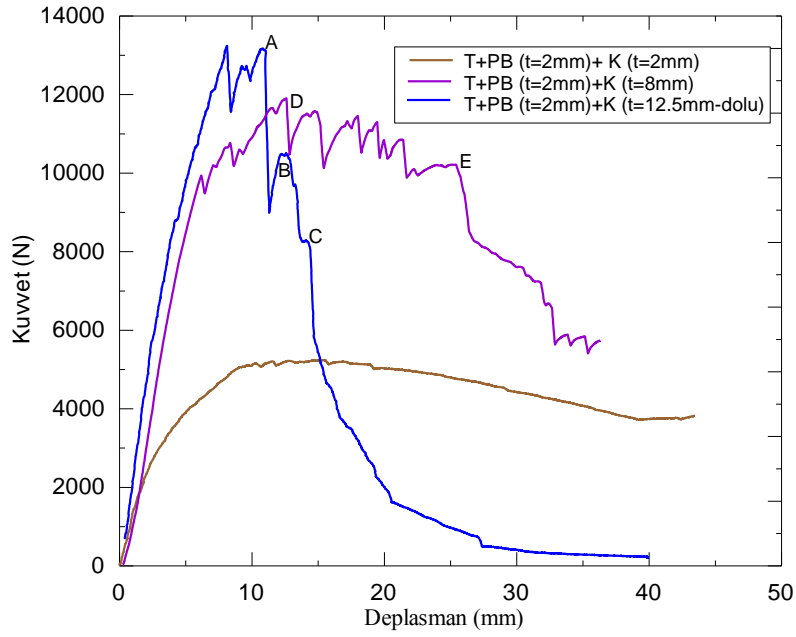
Şekil 174. PP kalınlığının eğme davranışına olan etkisi.

P yerine K kullanılarak üretilen kompozit kirişlerin eğme davranışına ait grafikler aşağıda topluca Şekil 175'de verilmiştir. Kuvvetin 13200 N'u aşarak takviyesiz duruma (1620 N) göre 8,1 kat artış sağlanmıştır. Daha önce yukarıda da söz edildiği gibi, kuvvet-deplasman eğrisindeki zig-zaglar PB'deki elyaf hasarlarından kaynaklanmaktadır.

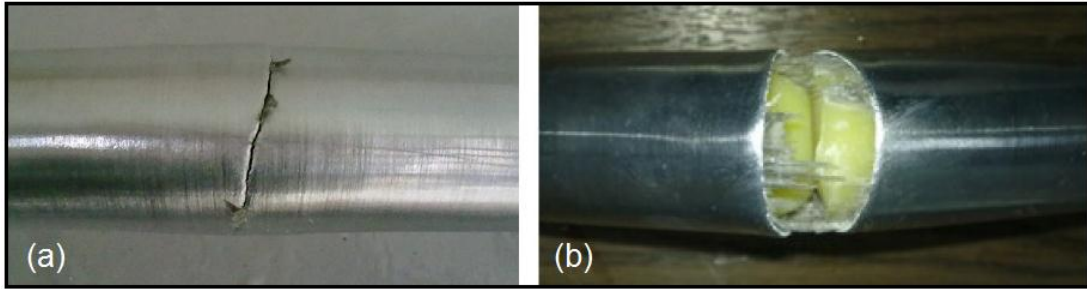


Şekil 175. Boş tüpün ($\varnothing 31$) PB, K ve PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

K kalınlığının kompozit kirişin eğme davranışına olan etkisi Şekil 176'da açık bir şekilde görülmektedir. PB(2)+K(8) durumunda YTK'da 6,15 kat artış sağlamıştır. D noktasında PB'de hasarlanma görülmüş, E noktasında ise tüp kiriş hasarlanarak yükün sadece K tarafından taşındığı görülmektedir. Numuneye ait kırılma resmi Şekil 177.a'da görülmektedir. Yükün kaldırılmasıyla çatlak ağı kapanması nedeniyle içeride sağlam olarak kalan K resimde görülmemektedir. PB(2)+K(12,5-dolu) durumunda taşınan maksimum yük 13200 N'ü aşmıştır. Şekildeki mavi ile gösterilen eğride, PB deki elyafların A noktasında hasarlanmasına bağlı olarak kuvvette düşüş gözlemlenmiştir. B noktasında boruda çatlama nedeniyle kuvvet değeri ani olarak düşmüştür. C noktasında K tamamen ayrılarak kirişin üzerindeki kuvvet tamamen sıfırlanmıştır. Numuneye ait kırılma resmi Şekil 184.b'de görülmektedir.

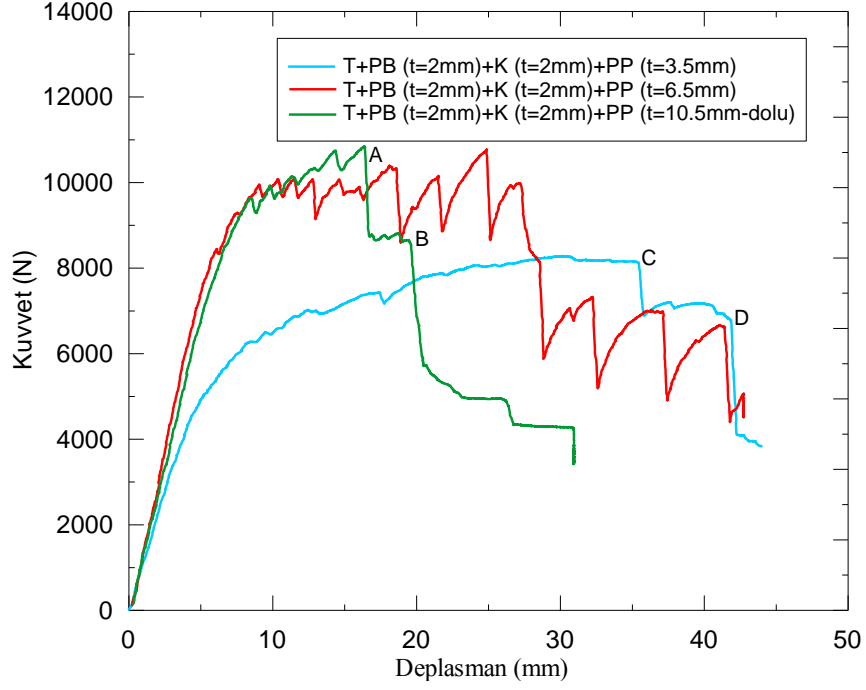


Şekil 176. Boş tüpün ($\varnothing 31$) PB ve üç farklı kalınlıkta K ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

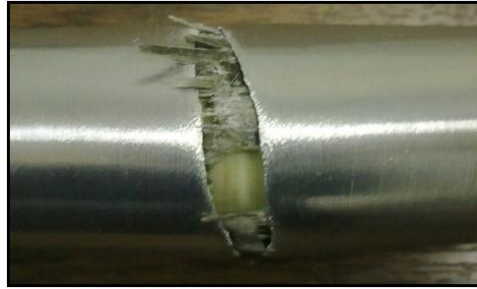


Şekil 177. Üç nokta eğme deneyi sonrası numune görünüşleri: (a) PB(2)+K(8), (b) PB(2)+K(12,5-dolu).

PP kalınlığının kompozit yapının davranışına olan etkisi Şekil 178'de görülmektedir. PB(2)+K(2)+PP(10,5-dolu) durumunda YTK 6,7 kat artmıştır. A noktasında PB, B noktasında tüp kiriş hasarlanarak kuvvette ani düşüşler gerçekleşmiştir. Daha sonra K ve PP'nin devreye girmesi ve küçük deplasmanlarda çatlamların olması grafikte basamaklı görünüme neden olmuştur. Bu numunenin deneyinde, tüpün çevresel olarak yarı simetriden fazlasının yırtılması nedeniyle deney yarıda kesilmiştir. Numune alt kırılma bölgesi resmi Şekil 179'da görülmektedir.



Şekil 178. Boş tüpün ($\varnothing 31$) PB, K ve üç farklı kalınlıkta PP ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 179. PB(2)+K(2)+PP(10,5-dolu) numunenin cidarında oluşan yırtılma.

Çapı 31 mm olan tüp yapının PB, K, P, PP ile birlikte kullanıldığı kompozit kirişlere ait deneysel veriler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. İçten takviye edilen (T, PB, K, P, PP) kompozit kirişlere ait deneysel veriler.

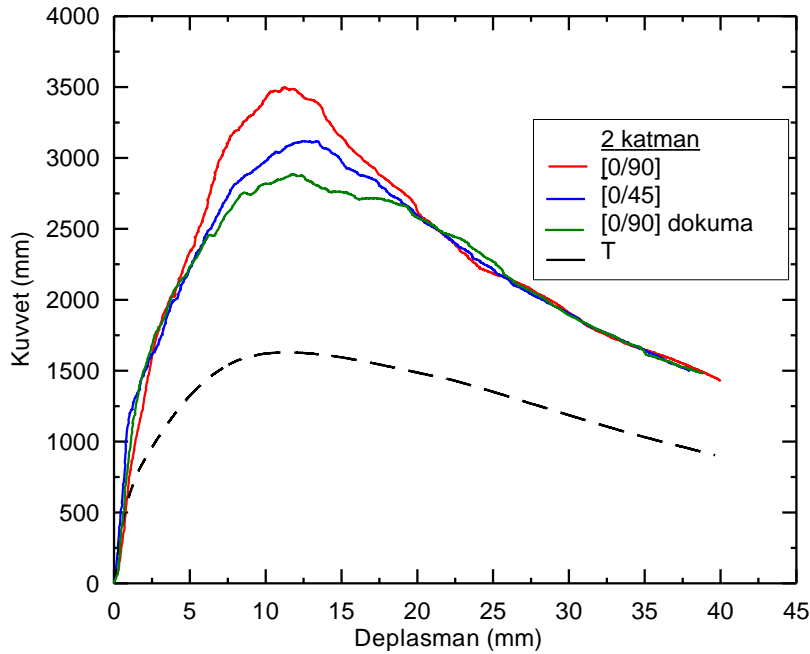
No	Kombinasyon*	F _{max} (kN)	Enerji** (kJ)	Ağırlık (kg)	Maliyet/parça (TL)	Maliyet oranı	F _{max} oranı	F _{max} /ağırlık (kN/kg)***	Enerji/ağırlık (kJ/kg)****	F/Maliyet (kN/TL)
1	T	1,62	0,04	0,07	0,54	1,0	1,00	23,14	0,57	3,00
2	T+PB(2)	2,98	0,07	0,15	1,8	3,3	1,84	19,87	0,47	1,66
3	T+PB(2)+K(2)	5,21	0,18	0,18	2,9	5,4	3,22	28,94	1,00	1,80
4	T+PB(2)+K(2)+PP(3,5)	8,46	0,26	0,23	3,1	5,7	5,22	36,78	1,13	2,73
5	T+PB(2)+K(2)+PP(6,5)	10,76	0,36	0,25	3,9	7,2	6,64	43,04	1,44	2,76
6	T+PB(2)+K(2)+PP(10,5-dolu)	10,83	0,29	0,26	4,11	7,6	6,69	41,65	1,12	2,63
7	T+PB(2)+K(8)	10,02	0,27	0,26	4,3	8,0	6,19	38,54	1,04	2,33
8	T+PB(2)+K(12,5-dolu)	13,22	0,23	0,29	5,4	10,0	8,16	45,59	0,79	2,45
9	T+PB(2)+P(2)+PP(3,5)	7,70	0,26	0,22	2,6	4,8	4,75	35,00	1,18	2,96
11	T+PB(2)+P(2)+PP(6,5)	9,26	0,25	0,25	3,4	6,3	5,72	37,04	1,00	2,72
12	T+PB(2)+P(2)+PP(10,5-dolu)	9,73	0,21	0,26	3,6	6,7	6,01	37,42	0,81	2,70
13	T+PB(2)+P(8)	11,08	0,21	0,26	3,1	5,7	6,84	42,62	0,81	3,57
14	T+PB(2)+P(12,5-dolu)	10,27	0,10	0,29	3,7	6,9	6,34	35,41	0,34	2,78

*T: Alüminyum tüp kiriş, PB: Pultruzyon boru, K: Kestamit, P: Polyamit, PP: Polipropilen; Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir; **Enerjiler 30 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır; *** ÖYTK: Özgül Yük Taşıma Kabiliyeti; **** ÖEAK: Özgül Enerji Absorbe Etme Kabiliyeti.

5.2.6. Dıştan Takviye Edilen Kompozit Numuneler

Dıştan takviye yapılarak oluşturulan kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney sonuçları aşağıda verilmiştir. CE sarım sayısı ve yön sırası değiştirilerek oluşturulan kombinasyonlara ait deneylerin sonuçları incelenecektir. Şekil 180-182'de görüldüğü gibi, CE takviyeli kirişlerin YTK ve rijitlik değerleri takviyesiz tüp kirişe göre önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca, içten takviye edilmiş kompozit yapılardan farklı olarak, maksimum kuvvetteki deplasman değerinin azalması ortak bir davranış olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 180'de farklı yönlenmelere sahip CE ile iki katmanlı olarak dıştan takviye edilmiş kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Tüpün dışına yapılan takviye efektif çapı arttırmaktadır. Bununla birlikte, gerilmenin dıştan en büyük değerini alması ve takviye tabakasının alüminyuma göre daha az sünek olması nedeniyle, yüzeyde başlayan kırılma veya süreksizlikler grafikte daha düşük deplasmanlarda yük değerinin düşmesine yol açmaktadır. İki katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerde en iyi yönlenme [0/90] olarak görülmektedir. YTK'daki artış oranı 2,15 kat şeklindedir.



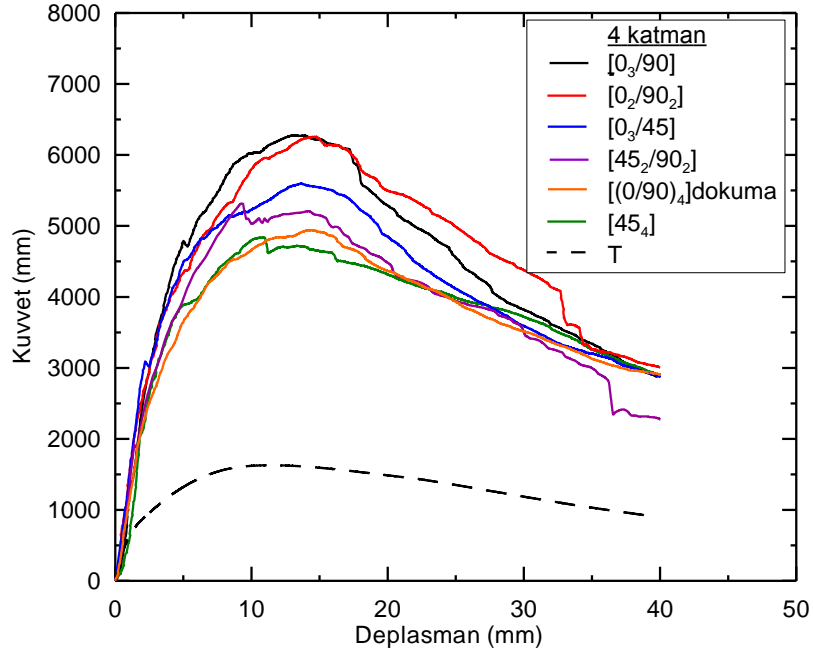
Şekil 180. Farklı yönlenmelerde iki katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Dört katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 181'de verilmiştir. Elde edilen en iyi sonuç [0₃/90] ve [0₂90₂] elyaf yönlenmelerinde görülmüştür. Bu konunun açıklığa kavuşturulması amacıyla düz zemin üzerinde (mesnetsiz) basma deneyleri yapılarak oluşturulan her iki kompozitin radyal yöndeki YTK ve rijitlikleri incelenerek her iki yönlenmedeki davranış irdelenmiştir. [45] yönünde yapılan takviyenin YTK'ya katkısı, [0] ve 90° yönünde yapılan takviyelere göre daha az olduğu görülmüştür. Kirişin deformasyon esnasında yanıl doğrultudaki şişme hareketi büyük ölçüde [90] yönlenmeye sahip elyaflara bağlıdır. Yanıl doğrultuda yapılan [90] takviyenin katman sayısı arttıkça mandrelin hareketiyle tüp kirişte oluşan lokal deformasyon zorlaşarak YTK artmaktadır. [45] yönlenmeye sahip elyafın katkısı bu bağlamda sınırlı kalmıştır.

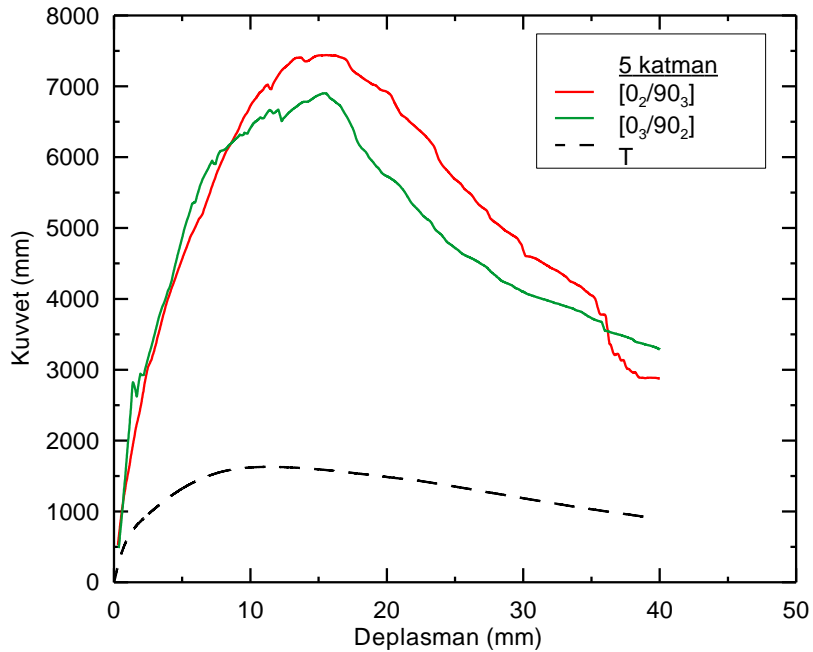
Beş katmanlı CE takviyeli kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 182'de verilmiştir. Takviyesiz tüp kiriş 1620 N yük taşıırken, [0₂90₃] ve [0₃90₂] şeklinde yapılan takviyelerle güçlendirilen kompozit kirişler, 4,6 kat artışla, maksimum 7400 N yük

taşımaktadır. Beş katmanlı CE takviyeli kirişlerde en iyi sarım yönünün $[0_2 90_3]$ olduğu belirlenmiştir. Yukarıda da sözü edildiği gibi, yanal doğrultudaki şekil değişiminin $[90]$ yönlenmeye sahip elyafar tarafından kısıtlanmış olması lokal deformasyonu zorlaştırmakta ve dolayısıyla kirişin YTK'sı artmaktadır. Eksenel doğrultudaki elyafar tütün bükülme esnasında alt yüzeyindeki şekil değişimini kısıtlayarak bükülmeyi zorlaştırmakta ve dolayısıyla tokluğu arttırdığı düşünülmektedir. Bu nedenle, katman sayısı aynı olduğu halde, $[0_2 90_3]$ yönlenme açısına sahip tüp kirişin taşıdığı yük, $[0_3 90_2]$ yönlenme açısına sahip tüp kirişe göre daha yüksektir.

Dıştan takviye edilmiş kompozit kirişlere ait deneysel veriler Tablo 12'de listelenmiştir.



Şekil 181. Farklı yönlenmelerde dört katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 182. Farklı yönlenmelerde beş katmanlı CE takviyesi yapılan kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Tablo 12. Dıştan takviye edilmiş kompozit kirişlere ait deneysel veriler.

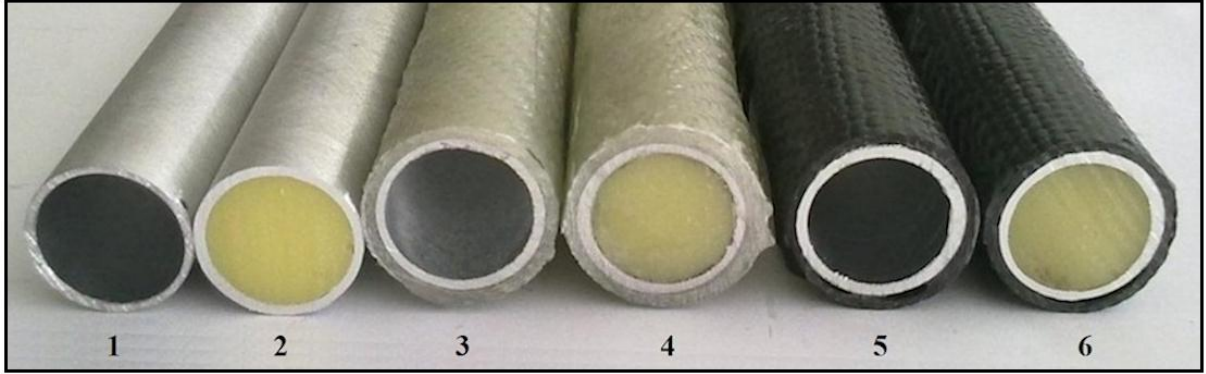
No	Cam Elyaf Yönlendmesi	Katman sayısı	F _{max} (kN)	Enerji (kJ)	Ağırlık (kg)	Maliyet/parça (TL)	Maliyet oranı	F _{max} oranı	F _{max} /ağırlık (kN/kg)*	Enerji/ağırlık (kJ/kg)**	F _{max} /Maliyet (kN/TL)
1	T	-	1,62	0,04	0,070	0,54	1,0	1,00	23,4	0,59	3,00
2	[(0/90) ₄] dok.	2	2,89	0,10	0,120	1	1,9	1,78	24,0	0,82	2,89
3	[0/90]	2	3,50	0,11	0,120	1	1,9	2,16	29,1	0,89	3,50
4	[0/45]	2	3,41	0,11	0,120	1	1,9	2,10	28,3	0,87	3,41
5	[45 ₄]	4	4,84	0,17	0,175	1,45	2,7	2,99	27,6	0,98	3,34
6	[(0/90) ₄] dok.	4	4,94	0,17	0,170	1,45	2,7	3,05	29,0	1,02	3,41
7	[45 ₂ /90 ₂]	4	5,31	0,13	0,185	1,45	2,7	3,28	28,7	0,67	3,67
8	[0 ₂ /90 ₂]	4	6,26	0,21	0,180	1,45	2,7	3,86	34,7	1,19	4,31
9	[0 ₃ /90]	4	6,28	0,21	0,188	1,45	2,7	3,88	33,3	1,14	4,33
10	[0 ₃ /45]	4	5,60	0,19	0,194	1,45	2,7	3,45	33,0	0,98	3,86
11	[0 ₃ /90 ₂]	5	6,90	0,16	0,203	1,68	3,1	4,26	34,0	0,77	4,11
12	[0 ₂ /90 ₃]	5	7,44	0,17	0,205	1,68	3,1	4,59	36,3	0,83	4,43

* ÖYTK: Özgül Yük Taşıma Kabiliyeti; ** ÖEAK: Özgül Enerji Absorbe Etme Kabiliyeti.

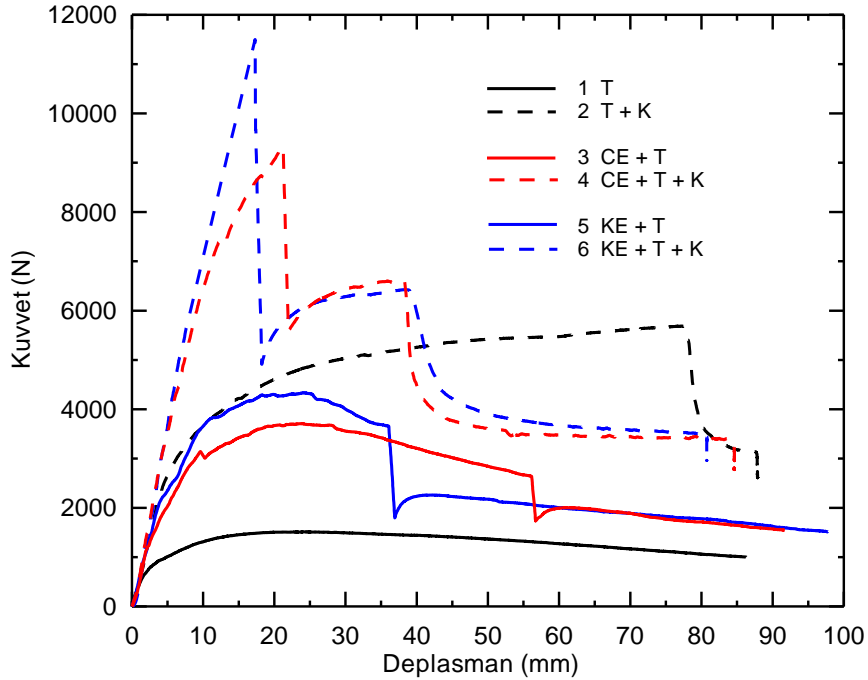
5.2.7. İçten ve Dıştan Takviye Edilen Kompozit Numuneler

5.2.7.1. Ø 19 Numunelerle Yapılan Deneyler

Çapı 19 mm, boyu 180 mm olan alüminyum tüp kirişler, dıştan 4 katman dokuma CE (280 g/m² twill) ve KE (200 gr/m² plain) ve içten K ile takviye edilerek elde edilen numunelerle üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Bu numuneler Şekil 183'de verilmiştir. Üç nokta eğme deneylerinde mesnetler arası mesafe 133 mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 183. Ø19x180 mm alüminyum tüp kirişler için içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numuneler: (1:T, 2:T+K, 3:CE+T, 4:CE+T+K, 5: KE+T, 6:KE+T+K).



Şekil 184. Ø19x180 mm alüminyum tüp kirişler için içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Altı farklı kombinasyonda hazırlanan deney numunelerine uygulanan üç nokta eğme testlerinin sonuçları kuvvet-deplasman eğrileri olarak Şekil 184'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre T durumu için 1512 N olan eğme yükü, T+K durumunda 5686 N'a yükselmiştir. Sadece dıştan CE ve KE katmanlarının ayrı ayrı kullanılması durumlarında, eğme yükü sırasıyla 3710 N ve 4335 N değerlerine ulaşmıştır. İçten K ve dıştan elyaf takviyeler birlikte

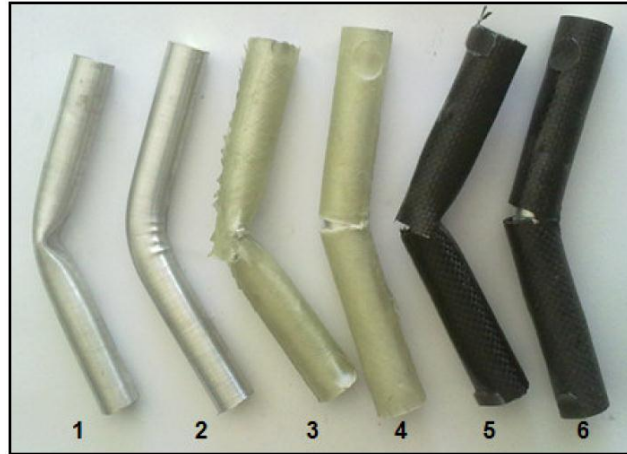
kullanıldığında ise, eğme yükü CE için 9332 N ve KE için 11500 N değerlerine ulaşmıştır. Şekil 184'den de görüleceği gibi, en yüksek eğme yükü 6 nolu kombinasyonla elde edilmiştir. Bu kombinasyon aynı zamanda, yüksek eğme yükünün yanı sıra hafifliğin de istendiği durumlarda tercih edilebilecek bir seçenek sunmaktadır.

Numunelerin üç nokta eğme deneyleri sırasındaki hasarlanma durumlarına bakıldığında, sadece içten K takviyeli numunede, 78 mm deplasman değerinden sonra borunun yırtılması nedeniyle kuvvetin hızla azaldığı görülmektedir. Dıştan elyaf takviyeli numunelerde, en büyük kuvvetin görüldüğü deplasmandan bir süre sonra, kuvvetin ani bir şekilde düşmesi elyafın kısmi olarak hasarlanmasıyla ilişkilidir. Hem içten ve hem de dıştan takviyenin uygulandığı 4 ve 6 nolu numunelerde kuvvetin iki kademe oluşturarak düşmesi ise, yukarıdaki sözü edilen iki hasarın peşi sıra meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu numunelerden, KE içeren 6 nolu numunenin, CE içeren 4 nolu numuneye göre daha düşük deplasmanda hasarlanması, KE kopma uzaması değerinin CE'ye göre daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, deney sonuçlarından elde edilen ÖYTK ve ÖEAK değerleri Tablo 13'de verilmiştir. Tabloda verilen enerji değerleri tüm numuneler için 50 mm deplasman esas alınarak hesaplanmıştır. En yüksek EAK, KE+T+K durumunda (6 nolu numune) ortaya çıkmıştır. ÖEAK açısından ise CE+T+K durumu (5 nolu numune) daha iyi bir seçenek sunmaktadır. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup numunenin deney sonrası görünüşü Şekil 185'de verilmiştir.

Tablo 13. İçten ve dıştan takviyeli Ø19x180 mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.

No	Kombinasyon	F_{max} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	F_{max} oranı	Enerji oranı	$F_{max}/ağırlık$ ÖYTK (N/gr)	Enerji/ağırlık ÖEAK (J/gr)
1	T	1512	67,6	28	1,0	1,0	54,0	2,41
2	T+K	5686	218,5	74	3,8	3,2	76,8	2,95
3	CE+T	3710	154,1	52	2,5	2,3	71,3	2,96
4	CE+T+K	9332	281,3	100	6,2	4,2	93,3	2,81
5	KE+T	4335	158,6	48	2,9	2,3	90,3	3,30
6	KE+T+K	11500	288,3	96	7,6	4,3	119,8	3,00

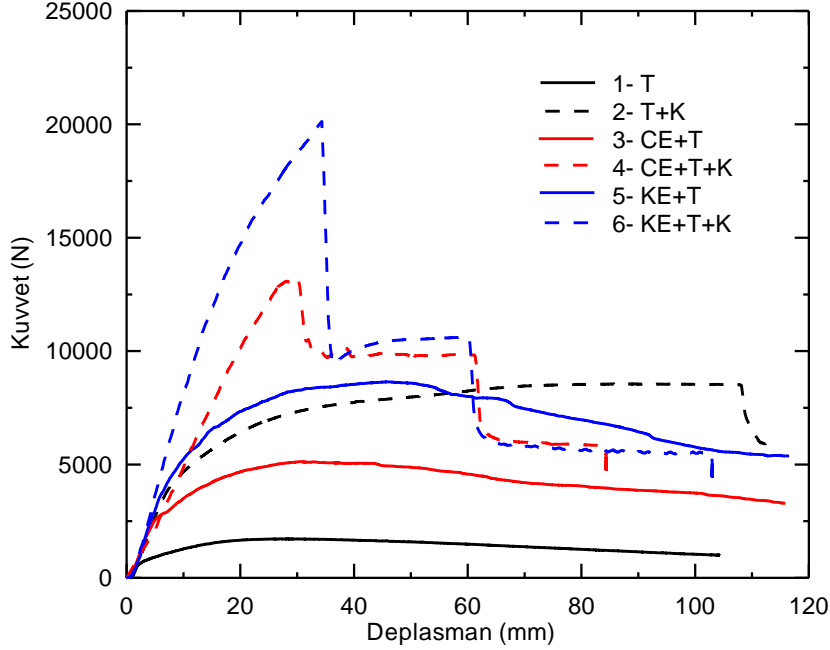
*Enerjiler 50 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır



Şekil 185. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø19x180 mm numunenin deney sonrası görünüşü.

5.2.7.2. Ø 24 Numunelerle Yapılan Deneyler

Çapı 24 mm, boyu 250 mm olan alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan takviye edilerek elde edilen numunelerle üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Dıştan takviye olarak CE ve KE [0₂/90₃] elyaf düzeninde sarılmıştır. İçten takviye olarak sadece K kullanılmıştır. Mesnetler arası mesafe 168 mm olarak uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 186'da verilmiştir.



Şekil 186. Ø24x250 mm alüminyum tüp kirişler için içten ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Dıştan CE ve KE takviyesiyle tüp yapının YTK'sı önemli oranda artmıştır. Sadece içten takviyenin YTK'ya etkisi, sadece dıştan takviyeye göre daha etkindir. İçten ve dıştan takviyeli yapılarda takviye malzemelerinin ve tüp yapının farklı deplasmanlarda hasarlanması sonucu grafiklerde basamak oluşumu gerçekleşmiştir. İlk basamak elyaf takviyenin, ikinci basamak ise tüp yapının hasarlanması sonucu oluşmaktadır. İçten ve dıştan takviyeli numunelerin üç nokta eğme deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 14'de listelenmiştir.

Tablo 14. İçten ve dıştan takviyeli Ø24x250 mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.

No	Kombinasyon	F _{max} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	F _{max} oranı	Enerji oranı	F _{max} /ağırlık ÖYTK (N/gr)	Enerji/ağırlık ÖEAK (J/gr)
1	T	1720	74	52	1,0	1,0	33,1	1,4
2	T+K	8558	305	151	5,0	4,1	56,7	2,0
3	CE+T	5126	213	139	3,0	2,9	36,9	1,5
4	CE+T+K	13253	421	234	7,7	5,7	56,6	1,8
5	KE+T	8643	341	143	5,0	4,6	60,4	2,4
6	KE+T+K	20131	574	245	11,7	7,8	82,2	2,3

*Enerjiler 50 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır.

Tablo incelendiğinde, içten yapılan takviye neticesinde F_{max} oranının 5 ve enerji oranının 4,1 olduğu görülmektedir. Dıştan yapılan elyaf takviyesi neticesinde YTK 5 kat, EAK ise 4,6 kat

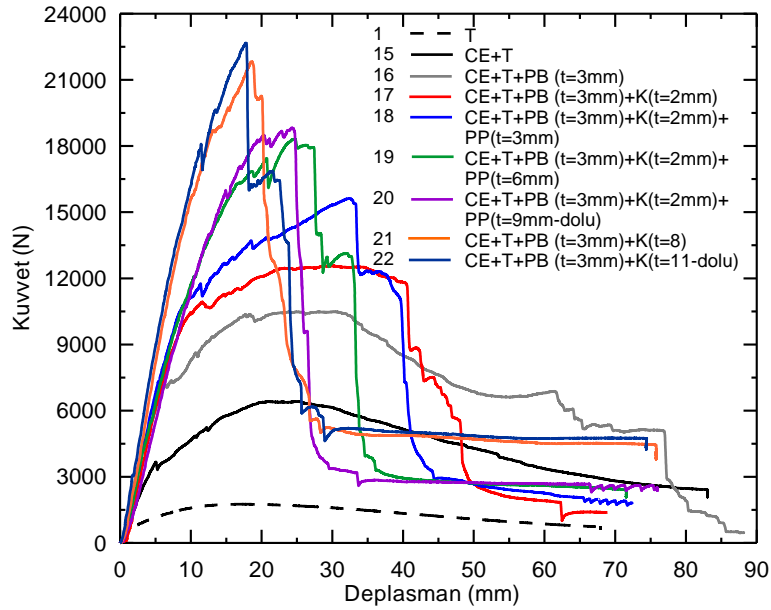
artış göstermiştir. İçten ve dıştan yapılan takviye neticesinde en iyi sonucu 6 nolu kombinasyon vermiştir. YTK yaklaşık 12 kat ve EAK ise yaklaşık 8 kat artış göstermiştir. ÖYTK açısından en yüksek değer yine 6 nolu kombinasyonda, ÖEAK açısından ise optimum değer 5 nolu kombinasyonda görülmektedir. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup numunenin deney sonrası görünüşü Şekil 187'de verilmiştir.



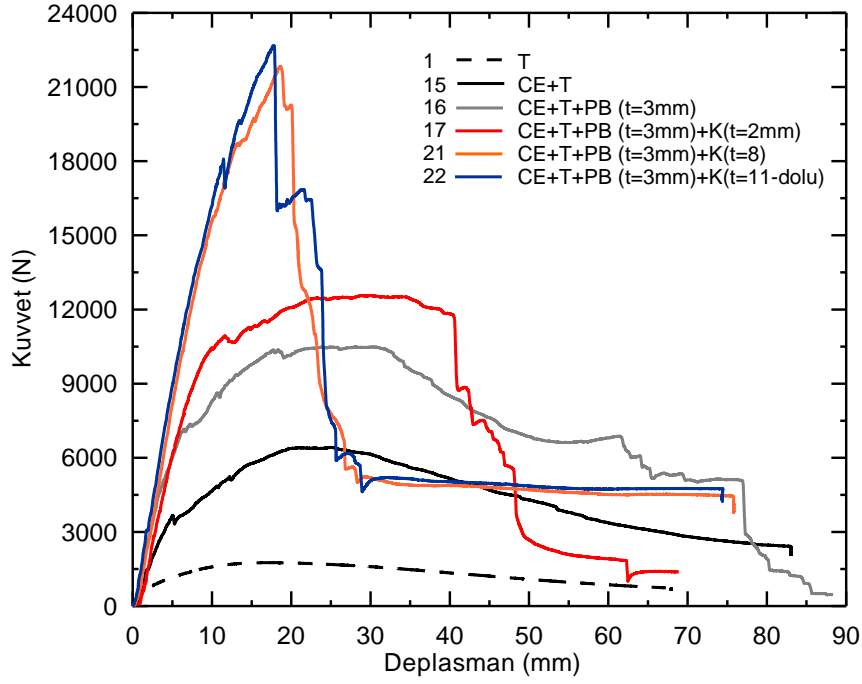
Şekil 187. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø24x250 mm numunenin deney sonrası görünüşü.

5.2.7.3. Ø 30 Numunelerle Yapılan Deneyler

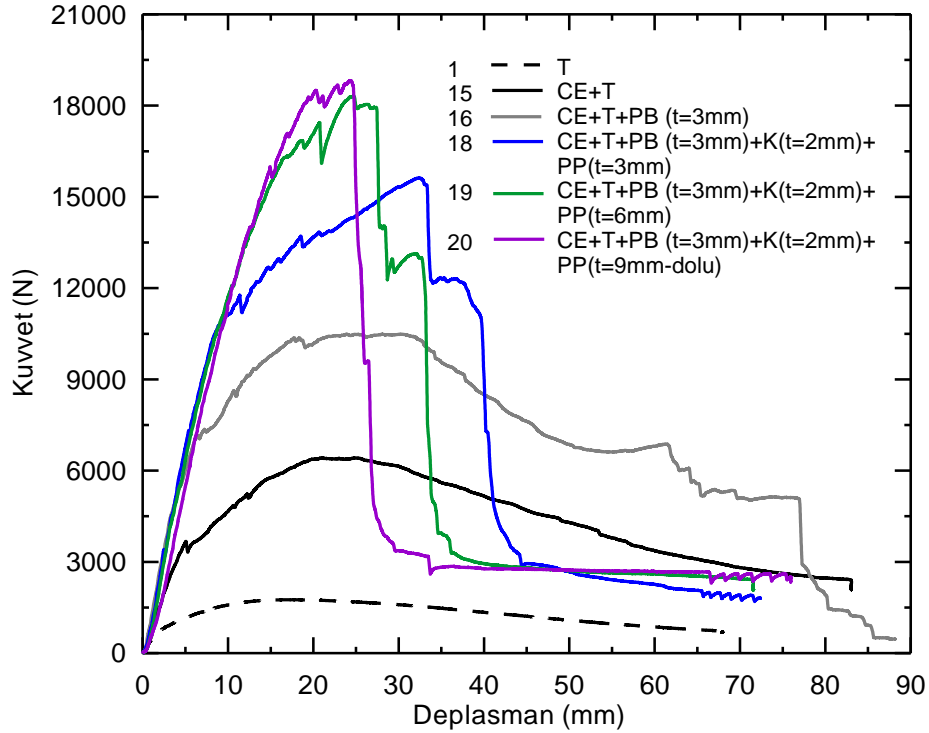
Çapı 30 mm olan alüminyum tüpün dışına CE [0₂/90₃] sarılarak oluşturulan kompozit kirişlere uygulanan üç nokta eğme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 188-190'da verilmiştir. Deney sonuçlarından, CE takviyesinin kompozit numunenin YTK'ni önemli derecede arttırdığı, F_{max} oranınının 12,9 kat arttığı görülmektedir. Bu grup numunelerde CE varlığından dolayı hasar daha yüksek yük değerlerinde ve öncelikle CE'de oluşmuştur.



Şekil 188. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

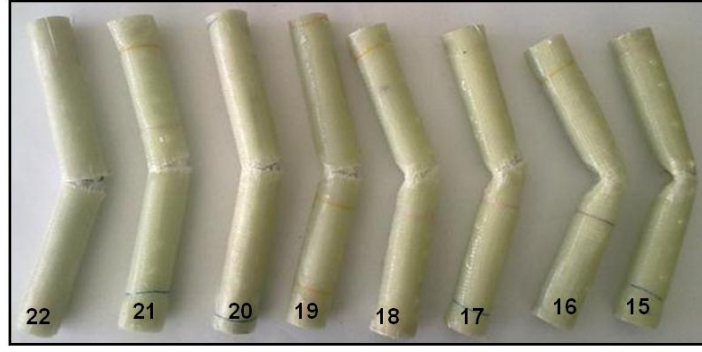


Şekil 189. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (K kalınlığının etkisi).



Şekil 190. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PP kalınlığının etkisi).

Deney sonucu oluşan hasara ait toplu resim Şekil 191'de ve kırılma bölgesinin daha detaylı resimleri Şekil 192'de verilmiştir.

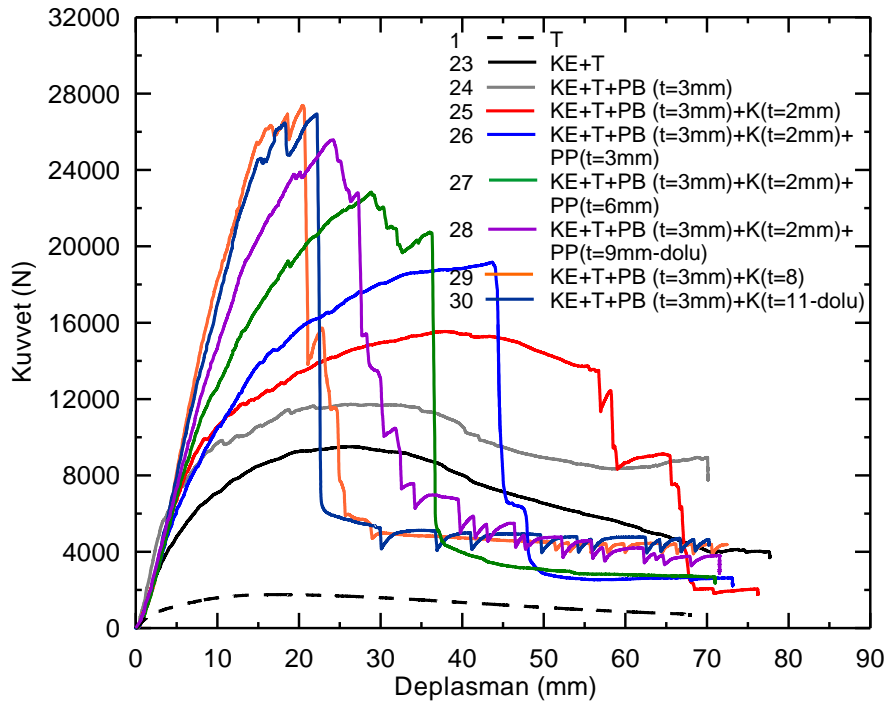


Şekil 191. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup CE'lı numunenin deney sonrası görünüşü.



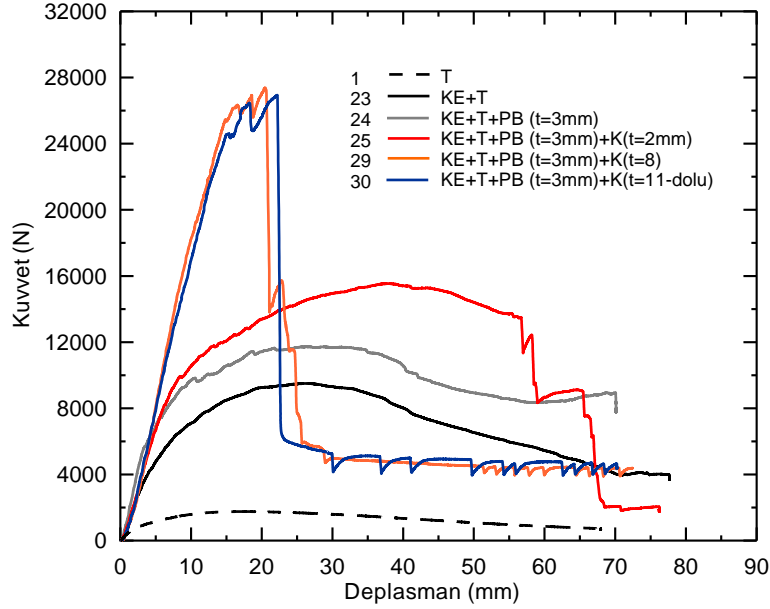
Şekil 192. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış CE'lı numunelerde kırılma bölgesi resimleri: (a) CE+T+PB+K(2), (b) CE+PB+K+PP(6), (c) CE+T+PB+K(11-dolu).

CE yerine KE kullanılarak yapılan üç nokta eğme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 193-195'de verilmiştir. Yapılan değerlendirmeler neticesinde, YTK açısından en büyük F_{max} oranı 15,6 olarak belirlenmiştir. 30 mm ve 50 mm deplasman değerleri için enerji oranlarındaki artışın sırasıyla 10 ve 6 katı aştığı görülmüştür. Kesitin eğilme rijitliğindeki artışa bağlı olarak, hasarın olduğu deplasman değeri azalmaktadır.

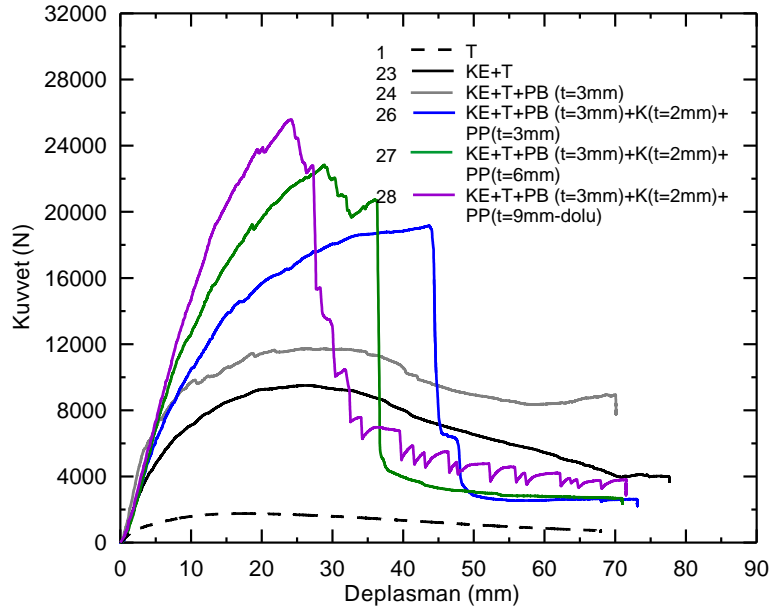


Şekil 193. Ø30 mm alüminyum tüp kirişler için ten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Şekil 194'deki 30 numaralı numunede, diğer numunelerden farklı olarak, numunenin alt kısmında KE, T ve PB aynı anda hasarlanarak eğride keskin düşüşe neden olmuştur. PP'nin etkisinin grafiksel olarak gösterildiği Şekil 195'de 26-28 numaralı numunelerde rijitlikle birlikte hasarın oluştuğu deplasman değeri de azalmaktadır.

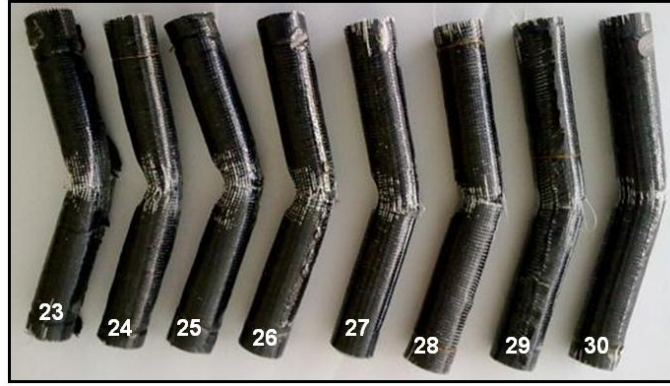


Şekil 194. $\varnothing 30$ mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (K kalınlığının etkisi).

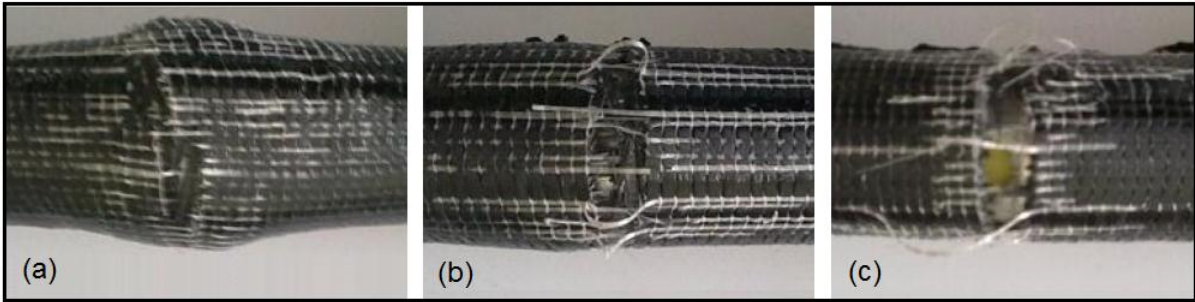


Şekil 195. $\varnothing 30$ mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri (PP kalınlığının etkisi).

Deney sonucu oluşan hasara ait toplu resim Şekil 196'da ve kırılma bölgesinin daha detaylı resimleri Şekil 197'de verilmiştir.



Şekil 196. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup KE'lı numunenin deney sonrası görünüşü.



Şekil 197. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış KE'lı numunelerde kırılma bölgesi resimleri: (a) KE+PB+K(2), (b) KE+PB+K+PP(6), (c) KE+PB+K(11-dolu).

İçten ve dıştan takviyeli numunelerin üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 15'te listelenmiştir. Bu tablodan, içten yapılan takviye neticesinde F_{max} oranının 8,3'ü enerji oranının 6,3'ü aştığı görülmektedir. 1-14 nolu kombinasyonlar arasında ÖYTK ve ÖEAK açısından en iyi kombinasyon 14 numaraya aittir. Ayrıca içten yapılan takviyede P yerine K kullanılan kombinasyonlarda sağlanan iyileşmenin daha yüksek olduğu görülmektedir.

CE kullanılan 15-22 nolu kombinasyonlarda en iyisi, F_{max} oranının 12,9 ve enerji oranının 8,5 olduğu 22 nolu kombinasyondur. ÖYTK ve ÖEAK açısından en yüksek performansı 22 ve 19 nolu kombinasyonlar göstermiştir.

KE kullanılan kombinasyonlarda sağlanan iyileşmenin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu gruptaki 23-30 nolu kombinasyonlar arasında, 29 ve 28 nolu kombinasyonlarda F_{max} oranının 15,5'i ve enerji oranının ise 11'i aştığı görülmüştür. ÖYTK ve ÖEAK açısından en yüksek performansı 28 nolu kombinasyon göstermiştir.

Tablo 15. Çapı 30 mm olan tüp kirişe içten ve dıştan takviye edilerek oluşturulan numunelerin üç nokta eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

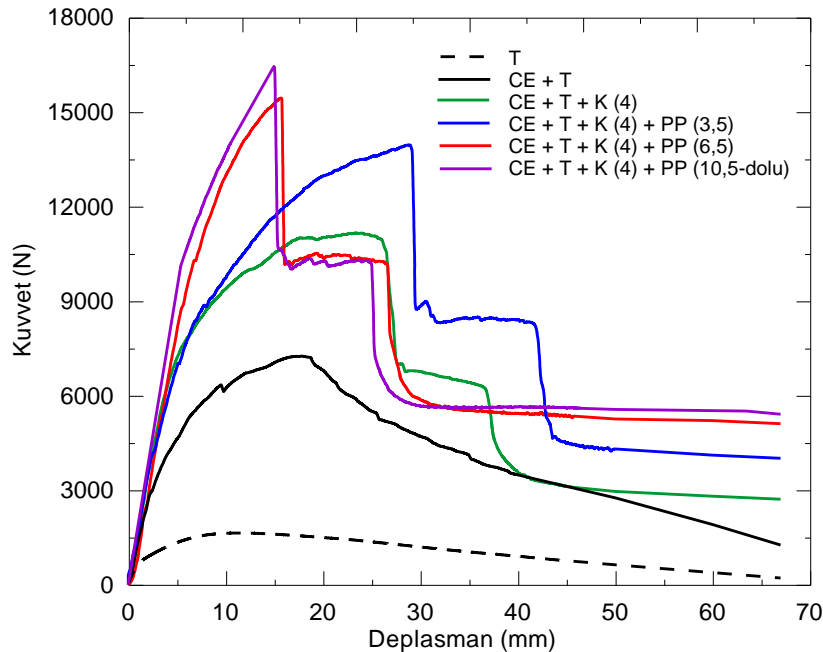
No	Kombinasyon*		F _{max} (N)	Enerji** (J)	Ağırlık (gr)	F _{max} oranı	Enerji * oranı	F _{max} /ağırlık (N/gr)***	Enerji/ağırlık (J/gr)
1	-	T	1756	98,3	61	1,00	1,00	28,79	1,61
2	-	T+PB(3)	5368	206	170	3,06	2,89	31,58	1,21
3	-	T+PB(3)+P(2)	6214	268	202	3,54	3,52	30,76	1,33
4	-	T+PB(3)+P(2)+PP(3)	8666	338	233	4,94	4,58	37,19	1,45
5	-	T+PB(3)+P(2)+PP(6)	11832	245	255	6,74	4,61	46,40	0,96
6	-	T+PB(3)+P(2)+PP(9-dolu)	12026	254	262	6,85	4,74	45,90	1,20
7	-	T+PB(3)+P(8)	12638	267	274	7,20	4,73	46,12	0,97
8	-	T+PB(3)+P(11-dolu)	13151	264	280	7,49	4,56	46,97	0,94
9	-	T+PB(3)+K(2)	6460	263	201	3,68	3,55	32,14	1,31
10	-	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	9070	316	235	5,17	4,67	38,60	1,34
11	-	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	10561	250	256	6,01	4,79	41,25	0,98
12	-	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	12921	287	262	7,36	5,30	49,32	1,10
13	-	T+PB(3)+K(8)	13805	339	275	7,86	5,98	50,20	1,23
14	-	T+PB(3)+K(11-dolu)	14633	363	282	8,33	6,34	51,89	1,29
15	CE	T	6419	253	172	3,66	3,35	37,32	1,47
16	CE	T+PB(3)	10486	425	281	5,97	5,66	37,32	1,51
17	CE	T+PB(3)+K(2)	12563	484	313	7,15	6,58	40,14	1,55
18	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	15619	500	348	8,89	7,46	44,88	1,44
19	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	18321	472	360	10,43	8,47	50,89	1,31
20	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	18824	391	364	10,72	7,51	51,71	1,07
21	CE	T+PB(3)+K(8)	21832	457	382	12,43	8,07	57,15	1,20
22	CE	T+PB(3)+K(11-dolu)	22671	478	387	12,91	8,47	58,58	1,24
23	KE	T	9505	380	182	5,41	4,97	52,23	2,09
24	KE	T+PB(3)	11722	492	273	6,68	6,36	42,94	1,80
25	KE	T+PB(3)+K(2)	15538	628	321	8,85	7,28	48,40	1,96
26	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	19162	660	352	10,91	8,09	54,44	1,88
27	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	22842	630	355	13,01	10,02	64,34	1,77
28	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	25576	618	365	14,56	11,01	70,07	1,69
29	KE	T+PB(3)+K(8)	27380	526	392	15,59	9,71	69,85	1,34
30	KE	T+PB(3)+K(11-dolu)	26938	516	398	15,34	9,42	67,68	1,30

*T: Alüminyum tüp, PB: Pultruzyon boru, P: Polyamid, K: Kestamid, PP: polipropilen, CE: Cam elyaf, KE:Karbon elyaf; Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir; **Enerjiler 50 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır; *** ÖYTK: Özgül Yük Taşıma Kabiliyeti; **** ÖEAK: Özgül Enerji Absorbe Etme Kabiliyeti

5.2.7.4. Ø 31 Numunelerle Yapılan Deneyler

Çapı 31 mm olan alüminyum tüpe CE sarılarak oluşturulan kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 198'te verilmiştir. Takviye malzemelerinin ilave edilmesiyle kompozit kirişin YTK artmıştır. Maksimum kuvvetin görüldüğü deplasman değerinin de ötelendiği ve kirişin tokluğunun arttığı görülmektedir. CE+T+K(4) numunesinin YTK yaklaşık olarak 3 kat artmıştır. Değişen cidar kalınlığına sahip diğer numunelerde, cidar kalınlığı ile YTK'nde önemli oranda iyileşmeler elde edilmiştir. Takviyesiz tüpün maksimum yük değerinin 1620 N olduğu dikkate alınır, en yüksek iyileşmenin elde edildiği numunede (CE+T+K(4)+PP(10,5)), 16420 N ile 10 katı aşan bir iyileşme sağlanmıştır. Takviyesiz yapıya göre YTK 5,8 kat artmıştır. CE+T+K(4) ve CE+T+K(4)+PP(3,5) numunelerinde, yükün en büyük değerini aldığı bükülme deplasmanından sonra deplasmana bağlı olarak deformasyonun devam ettiği, diğer taraftan CE+T+K(4)+PP(6,5) ve CE+T+K(4)+PP(10,5) numunelerinde ulaşılan en büyük yük değerinde tüp cidarında oluşan yırtılmaya bağlı olarak eğrilerde ani düşüş olduğu görülmektedir. Polimer takviyeli kompozit yapı burkulma oluşumunu engellemiş ve yük altında eğilmenin etkisiyle boru alt cidarında yırtılma ortaya çıkmıştır. İçten yapılan polimer takviyenin rijitliğinin bu davranış üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. İçi dolu numunenin bir miktar daha küçük deplasmanda hasarlanmış olması bunun bir göstergesidir.

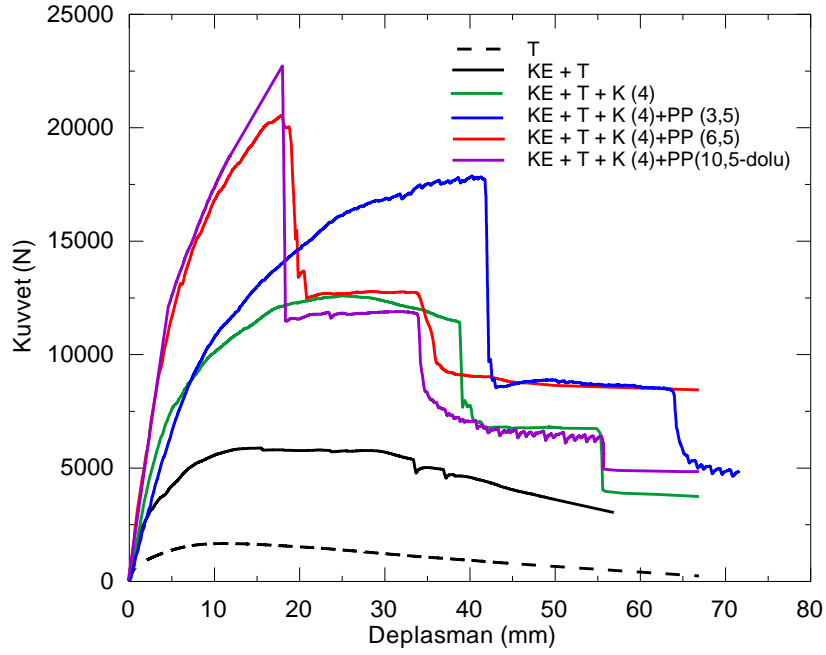
Bu gruptaki numunelerin yük-deplasman eğrilerinin ortak davranışı olan basamak formunun oluşumu, sırasıyla elyaf tabakanın ve tüp cidarının hasarlanmasıyla ilgilidir. Numunenin ilk olarak büküldüğü nokta olan, borunun alt cidarında dış taraftaki elyafların kopmasıyla kuvvette ani düşüş görülmektedir. Bu aşamada oluşan plato kısmında artan deplasman ile parça üst yüzeyinde epoksi-metal ara yüzeyinde ayrılma ve yapının orta noktasında bükülme birlikte oluşmaktadır. Yük seviyesi ve içerideki takviye unsurunun rijitliğine bağlı olarak, ilerleyen deplasmanlarda boru hasarlanmaktadır. Örneğin, içi dolu kompozit yapıda, en yüksek yük değerine ulaştıktan hemen sonra, boru alt yüzeyindeki CE yapının kısmi olarak hasarlanmasıyla yük değeri 10500 N'a düşmektedir. Bu yük değerinde, yaklaşık 28 mm deplasmana kadar elyafta yapıda devam eden kopmalara bağlı olarak, grafikte zig-zag oluşmakta ve boru yırtılmasıyla 6000 N'nun hemen altına düşmektedir.



Şekil 198. Ø31 mm alüminyum tüp kirişler içten ve dıştan (CE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Dıştan beş katmanlı, $[0_2/90_3]$ yönlenmeye sahip KE ve içten farklı cidar kalınlıklarındaki farklı polimerik malzemeler kullanılarak oluşturulan hibrit kompozit yapının üç nokta eğme deney

sonuçları Şekil 199'da verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, genel olarak eğri karakterlerinin değişmediği ve tüm kombinasyonlar için YTK'nin orantılı olarak yükseldiği, basamak gerilme seviyelerinin de orantılı olarak bir miktar yükseldiği dikkat çekmektedir. KE+T+K(4)+PP(10,5) numunesinde maksimum yük değeri 22680 N'a ulaşmış ve takviyesiz tüpe göre 14 kat artış sağlanmıştır. Üretilen kompozit yapıların her biri için kuvvet ve enerji değerleri ve bunlardan hesaplanan ÖYTK ve ÖEAK büyüklükleri Tablo 15'de toplu olarak verilmiştir. Takviye bileşen sayısı ile F_{max} oranı ve bunun paralelinde YTK tüm kompozit kombinasyonları için artmıştır. ÖYTK takviyesiz yapıda 23 mertebelerinde iken, sadece içten takviye ile yaklaşık 40, CE dahil edilmesi durumunda yaklaşık 46, KE kullanıldığında ise 61 olmaktadır. Buna göre, KE+T+K(4)+PP(10,5) için kabaca ÖYTK 2,65 oranında artmıştır. Literatürde yapılan çalışmalardan bu iyileşmenin sınırlı kaldığı dikkate alınır, hibrid yapının bu açıdan önemli bir üstünlük sağladığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 199. Ø31 mm alüminyum tüp kirişler için içten ve dıştan (KE) takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

EAK açısından durum bir miktar farklıdır. Bileşen sayısı ile birlikte enerji değerleri artmış olmasına rağmen, dıştan elyaf takviye edilen numunelerde, CE+T+K(4)+PP(3,5) ve KE+T+K(4)+PP(3,5) numuneleri en yüksek enerji değerine sahiptir. Şekilden de görüleceği gibi, elyaf ve boru hasarlanması bu iki numunede daha yüksek deplasman değerlerinde oluşmuştur. Spesifik enerji değeri bakımından da aynı numunelerin tercih edilebilecek performansa sahip oldukları anlaşılmaktadır. Tabla 16 da deney sonuçları ve elde edilen parametreler verilmiştir.

Tablo 16. Dışarıdan ve içeriden takviye edilmiş kompozit kirişler

No	Kombinasyon		Fmax (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (kg)	Fmax oranı	Enerji oranı	Fmax /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)
1	-	T	1620	59	69	1,00	1,0	23,5	0,86
2	CE	T	7240	207	210	4.5	3,5	34.5	0.99
3	CE	T + K (t=4 mm)	11160	340	270	6.9	5,8	41.3	1.26
4	CE	T + K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	13950	447	320	8.6	7,6	43.6	1.40
5	CE	T + K (t=4 mm) + PP (t=6.5 mm)	15430	377	350	9.5	6,4	44.1	1.08
6	CE	T+ K (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	16425	405	360	10.1	6,9	45.6	1.13
7	KE	T	8500	342	170	5.3	5,8	50.0	2.01
8	KE	T+K (t=4mm)	12540	484	280	7.7	8,2	44.8	1.73
9	KE	T+K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	17830	637	340	11.0	10,8	52.4	1.87
10	KE	T+K (t=4mm)+PP (t=6.5mm)	20490	585	360	12.7	9,9	56.9	1.63
11	KE	T+ K (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	22680	570	370	14.0	9,7	61.3	1,54

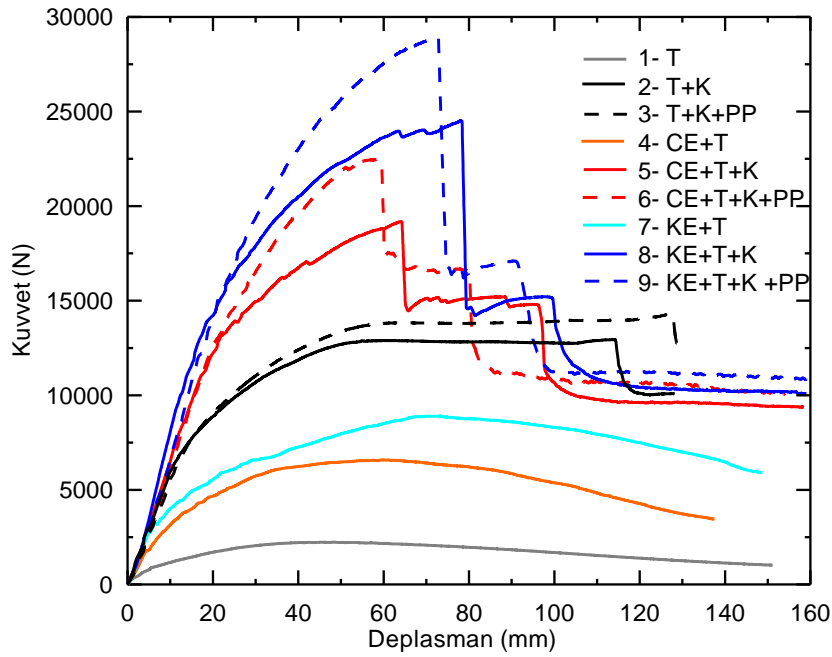
T: Alüminyum tüp kiriş, *50 mm'lik deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: Cam elyaf :2(0°)+3(90°), KE: Karbon elyaf (20°+390°), PB: Pultruzyon boru, K: Kestamid, PP: Polipropilen

5.2.7.5. Ø 40 Numunelerle Yapılan Deneyler

Çapı 40 mm ve boyu 320 mm olan alüminyum tüp kirişlerle oluşturulan kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Dıştan takviye olarak CE ve KE $[0_2/90_3]$ elyaf düzeninde sarılmıştır. İçten takviye olarak ise K ve PP kullanılmıştır. Numunelerin boyları 320 mm ve mesnetler arası mesafe 280 mm olarak uygulanmıştır. Hazırlana numunelere ait resimler Şekil 200'de verilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 201'de verilmiştir. Deney sonuçları ve değerlendirme parametreleri Tablo 17'de listelenmiştir.



Şekil 200. Ø40 mm olan alüminyum tüp ile oluşturulan kompozit kirişler.



Şekil 201. Ø40 mm alüminyum tüp kirişler için ve dıştan takviye edilerek hazırlanan numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Tablo 17. İçten ve dıştan takviyeli Ø40x320 mm kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi verileri.

No	Kombinasyon	F _{max} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	F _{max} oranı	Enerji oranı	F _{max} /ağırlık ÖYTK (N/gr)	Enerji/ağırlık ÖEAK (J/gr)
1	T	2238	184	106	1,0	1,0	21,1	1,7
2	T+K	12945	1082	378	5,8	5,9	34,2	2,9
3	T+K+PP	14292	1139	450	6,4	6,2	31,8	2,5
4	CE+T	6585	544	266	2,9	3,0	24,8	2,0
5	CE+T+K	19182	1388	507	8,6	7,5	37,8	2,7
6	CE+T+K+PP	22468	1443	585	10,0	7,8	38,4	2,5
7	KE+T	8900	708	275	4,0	3,8	32,4	2,6
8	KE+T+K	24511	1720	528	11,0	9,3	46,4	3,3
9	KE+T+K+PP	28869	1828	605	12,9	9,9	47,7	3,0

*Enerjiler 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır.

Şekil ve tablo incelendiğinde, YTK ve EAK'ndeki en yüksek artışların, sırasıyla 13 ve 10 kata yakın bir artışla 9 nolu kombinasyonda elde edildiği görülmektedir. ÖYTK açısından yine 9 nolu kombinasyon, ÖEAK açısından ise 8 nolu kombinasyon en iyi sonucu vermektedir. Deney sonrası numunelere ait görüntüler Şekil 202'de verilmiştir.



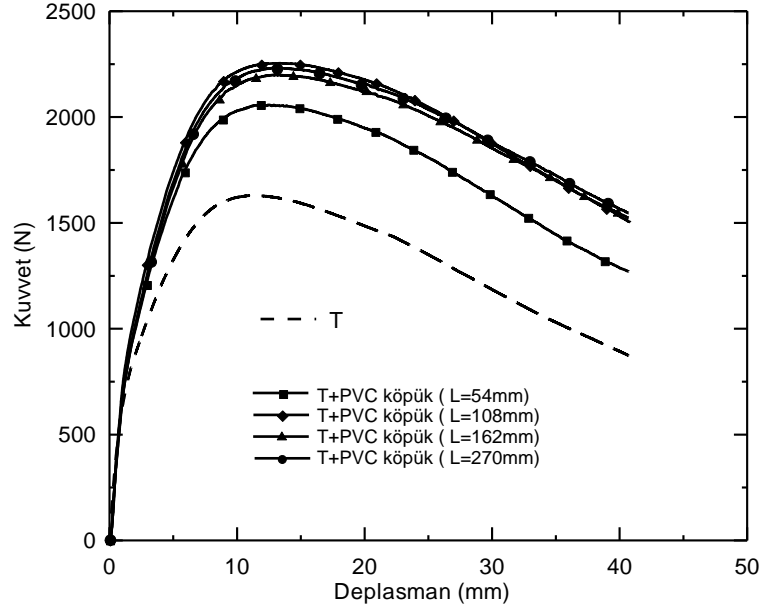
Şekil 202. Üç nokta eğme deneyi uygulanmış bir grup Ø40 mm numunenin deney sonrası görünüşü.

5.2.8. Enerji Absorbe Etme Davranışı İyileştirilmiş Numuneler

Tüp içine yerleştirilen farklı boylardaki PVC köpüğün kirişin yük taşıma davranışına olan etkisi Şekil 203'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, PVC köpüğün varlığı, özellikle bükülme sonrasında, parçanın şekil değişimine karşı gösterdiği direnci ve bunun sonucu olarak eğme kuvvetini artmıştır. Ancak, tüp içine üç nokta eğme deneyi sırasında kullanılan mesnet aralığından daha uzun köpük yerleştirilmiş olması, boyu kısa olanlara göre kayda değer bir performans sağlamamıştır. Köpük malzemenin alüminyuma göre çok daha esnek ve kıyaslanmayacak derece eğme dayanımı düşük olduğu dikkate alındığında bu davranış beklenen bir durumdur.

217 mm olan mesnetler arası mesafenin %25, 50 ve 75'ine karşılık gelen köpük boylarına (sırasıyla 54, 108 ve 162 mm) sahip numunelerle yapılan deneylerden, mandrelin temas bölgesinde köpük varlığının YTK'Nİ belirgin bir şekilde iyileştirdiği, artan köpük boyu ile eğrinin belirgin bir şekilde yukarıya kaydığı görülmektedir. Köpük yapının faydalı etkisi 108 mm'lik köpük boyuna kadar devam etmekle birlikte, daha uzun köpük boyları için önemli bir

iyileşme söz konusu değildir. Bu davranış, parçanın orta noktasından belirli bir uzaklığa kadar metal kesitte oluşan deformasyonun köpük yapı tarafından kısıtlandığı, ancak daha uzak noktalarda (dolayısıyla daha uzun köpük için) kesitte deformasyonun düşey doğrultuda daralma yerine genişlemeye terk etmiş olmasıyla (Şekil 204) açıklanabilir. Bu davranış diğerine göre ikinci derecede etkiye sahiptir.



Şekil 203. PVC köpük malzeme boyunun kuvvet-deplasman grafiğine olan etkisi.

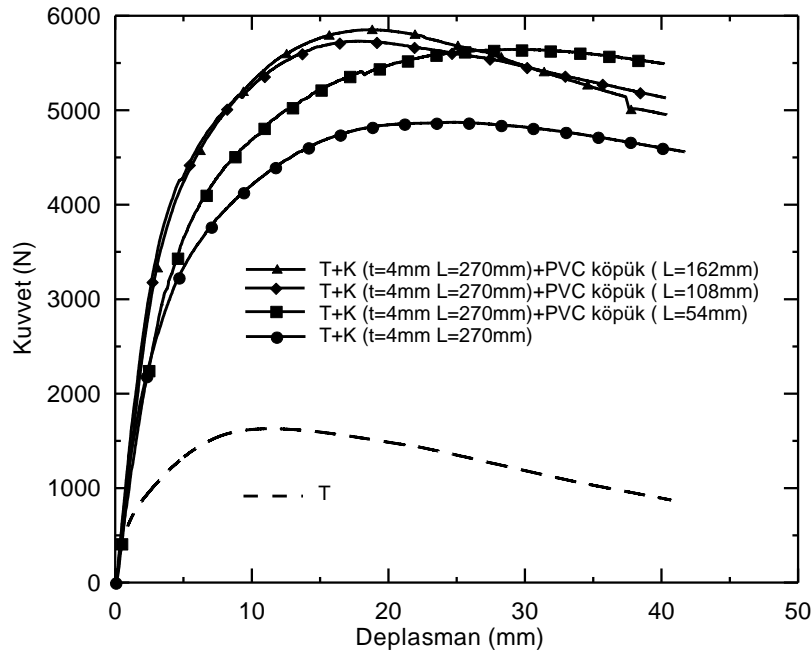
Şekil 204'de görüldüğü gibi, etkin olarak orta noktadan başlayan deformasyon uçlara doğru gidildikçe etkisini azaltmaktadır. Her iki tarafta a ve b noktalarına kadar, düşeyde çap doğrultusundaki azalma bu noktada etkisini yitirmekte (tam çap), daha sonraki kısımlarda ise yukarıda sözü edilen genişlemeyle elips formu oluşmaktadır.



Şekil 204. Alüminyum boruya PVC köpük (108 mm) yapının takviye edildiği numune.

Parçaya içten köpük takviye edilmiş olması, takviyesiz duruma göre sadece YTK'ni arttırmamış, aynı zamanda deformasyon için harcanan enerji miktarını da büyük oranda arttırmıştır. Ayrıca, kuvvetin en yüksek değerini ulaştığı büküm deplasman değerini de bir miktar arttırmıştır (Şekil 203).

Yukarıda özetlenen çalışmaya ilave olarak, kuvvet-deplasman davranışını daha fazla iyileştirmek amacıyla, metal tüp yapıya projenin önceki kısımlarında kullanılan cidar kalınlığı 4 mm olan K ve daha sonra bunun içine, Şekil 203'de en iyi sonuçların elde edildiği 108 ve 162 mm boylarında PVC köpükler yerleştirilmiş ve bu parçalar için deneyler tekrarlanmıştır. Deney sonuçları, sadece K takviyeli parçanın verileriyle birlikte Şekil 205'de sunulmuştur.



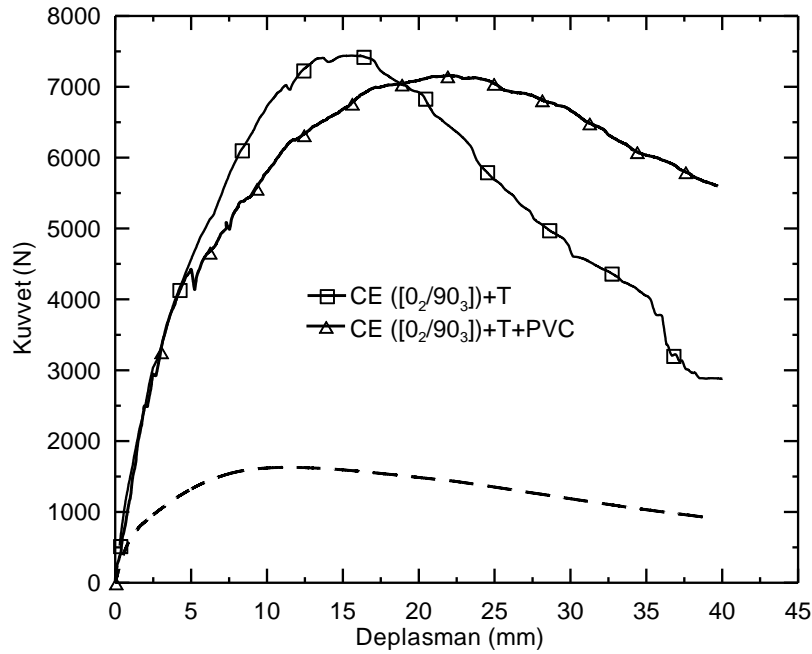
Şekil 205. K ve farklı boylardaki kısmi köpük malzemenin kuvvet-deplasman grafiğine etkisi.

PVC köpüğün K ile birlikte kullanılması kuvvet değerinin 5750 N'u aşmasına sağlamıştır. Yaklaşık 20 mm'lik deplasman değerlerinden sonra K'teki bükülmenin yoğunlaşmasına bağlı olarak köpük kısmen işlevini yitirmeye başlamış ve ezilme+kopma oluşumuyla kuvvet düşmeye devam etmiştir. EAK açısından bu takviye türünün kayda değer bir iyileşme sağladığı açıktır. PVC köpüğün yalnız ve K ile birlikte kullanıldığı iki tip tüp yapı için elde edilen grafiklerden hareketle hesaplanan büyüklükler Tablo 18'de listelenmiştir.

Boş tüpün dıştan elyaf ve içten PVC köpük ile takviye edilmesi durumunda kompozit yapının kuvvet-deplasman davranışı da ele alınmıştır (Şekil 206).

CE kullanılan numuneler için belirlenen en iyi yönlendirme $[0_2/90_3]$ ve katman sayısı (5) tercih edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi, içeride PVC köpüğün varlığı bu bölümde ele alınan kombinasyonlardaki gibi bükülme deplasmanını bir miktar ötelemekte ve daha büyük deplasmanlarda daha yüksek kuvvetlerin taşınmasına imkan sağlamaktadır. Buna göre yapının hasarlanması veya belirli bir deplasman için gerekli enerji miktarında artmıştır.

Bu çalışmada KE özellikle tercih edilmemiştir. KE'in kullanıldığı kompozit yapıların içten yeterince rijit malzemelerle takviye edilmesi durumunda, KE'in yapıya olan katkısı sınırlı kalmaktadır. Elyaf yönüne dik doğrultudaki elastiklik modülündeki düşüş, KE'ta oransal olarak 1/14, iken CE'ta kabaca 1/3 mertebelerindedir. KE'li yapıda mandrelin temasıyla metal üst yüzeyinde ve bükülme esnasında alt cidarda oluşan deformasyonlar elyafın birbirleriyle olan bütünlüğün bozulmasına yol açarak hasarlanmayı hızlandırmaktadır.



Şekil 206. Dıştan elyaf, içten PVC köpük takviyenin kompozit tüpün kuvvet-deplasman davranışına etkisi.

Tablo 18. EAK iyileştirilmiş kompozit yapı için incelenen kombinasyonlar.

Kombinasyon*	Ağırlık (kg)	F_{max} (kN)	F_{max} oranı	Enerji** (kJ)	Enerji oranı	F_{max} /ağırlık (kN/kg)	Özgül enerji (kJ/kg)
T	0,070	1,62	1,00	0,051	1,00	23,48	0,74
T+PVC(54)	0,072	2,06	1,27	0,067	1,31	28,61	0,93
T+PVC(108)	0,075	2,25	1,39	0,073	1,43	30,05	0,97
T+PVC(162)	0,076	2,20	1,36	0,076	1,49	28,93	1,00
T+PVC(270)	0,077	2,23	1,38	0,075	1,47	28,96	0,97
T+K(270)	0,160	4,87	3,01	0,17	3,33	30,40	1,06
T+K(270)+PVC(108)	0,170	5,73	3,54	0,2	3,92	34,11	1,19
T+K(270)+PVC(162)	0,170	5,85	3,61	0,2	3,92	34,42	1,19
***CE	0,180	7440	4,59	0,19	3,72	41,33	1,05

***CE+PVC	0,190	7164	4,42	0,22	4,31	37,7	1,16
-----------	-------	------	------	------	------	------	------

*Parantez içindeki rakamlar ilgili katmanın mm cinsinden boyunu vermektedir. K için cidar kalınlığı 4 mm olarak uygulanmıştır.

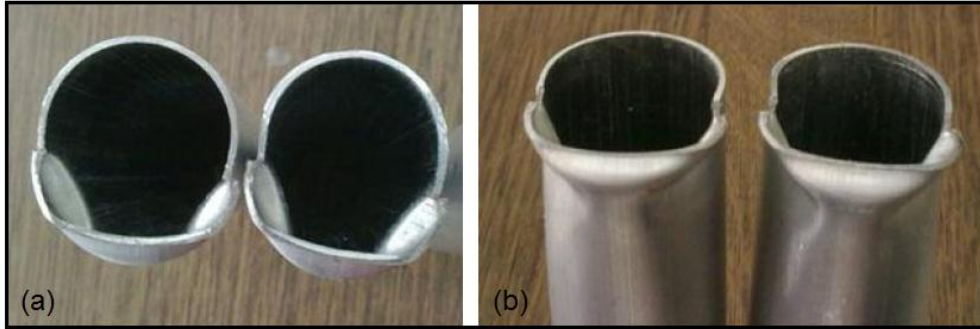
**Enerji değerleri 40 mm deplasman için hesaplanmıştır.

***Dıştan CE için takviyesi [0₂/90₃] şeklinde beş kat olarak uygulanmıştır.

5.2.9. Ön Gerilmeli Kompozit Kiriş

30 mm çaplı borunun alt yarı alın kısmına uygulanan kuvvetin tüp kirişin YTK'ne olan katkısını arttırmaya yönelik çok sayıda denemeler yapılmıştır. Deney planı oluşturulurken, sonlu eleman analiz sonuçları dikkate alınmasının yanı sıra ön görülen deneyin teknik olarak yapılabilmesi de ayrıca irdelenmiştir. Sonlu eleman çalışmasında çeyrek kesite gerilmenin uygulanması doğrudan alın kısmına basıncın tanımlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak deneysel çalışmada ön gerilmenin çelik kordon üzerinden alt çeyrek kesite homojen olarak uygulanabilmesi için, çeyrek kesitin ağırlık merkezi dikkate alındığında, kordonun alt cidarın çok yakından geçmesi (<1 mm) deneyin sağlıklı bir şekilde yapılması ve devam etmesine büyük bir engel teşkil etmektedir. Buna göre, ön gerilmenin tüpün alt yarı kesitine uygulanması durumu için deneyler planlanmıştır.

Yapılan denemelerden, boru alın yüzeyinin pürüzlü olmasının yükün homojen bir şekilde uygulanamamasına ve yükleme esnasında cidarda ani burkulmalara neden olarak ön yükleme kuvvetini önemli miktarda sınırladığı görülmüştür (Şekil 207). Bu küçük yüklemelerin eğme direncine katkısı ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Ayrıca, bükülme deplasman değerinin de yüzey durumundan etkilendiği anlaşılmıştır. Bu problemin aşılması için, boru alın kısmı özel olarak tornalandıktan sonra, taşlanmış daha sonra ön yükleme test düzeneğinde montajı sağlanmıştır. Diğer bir önemli konu ise, üç nokta eğme deneylerinde mandrelin temas ettiği boru yüzeyindeki lokal deformasyonun önlenerek ön gerilme etkisinin daha net bir şekilde gözlenebilmesi için tüp yapı içerisine yerleştirilen, genişliği mandrel çapına eşit (30 mm) K bileziğin sıklığıdır. Yapılan deneylerde K bileziğin boyut toleransları özellikle izlenmiş ve sıkı geçme olması sağlanmıştır.

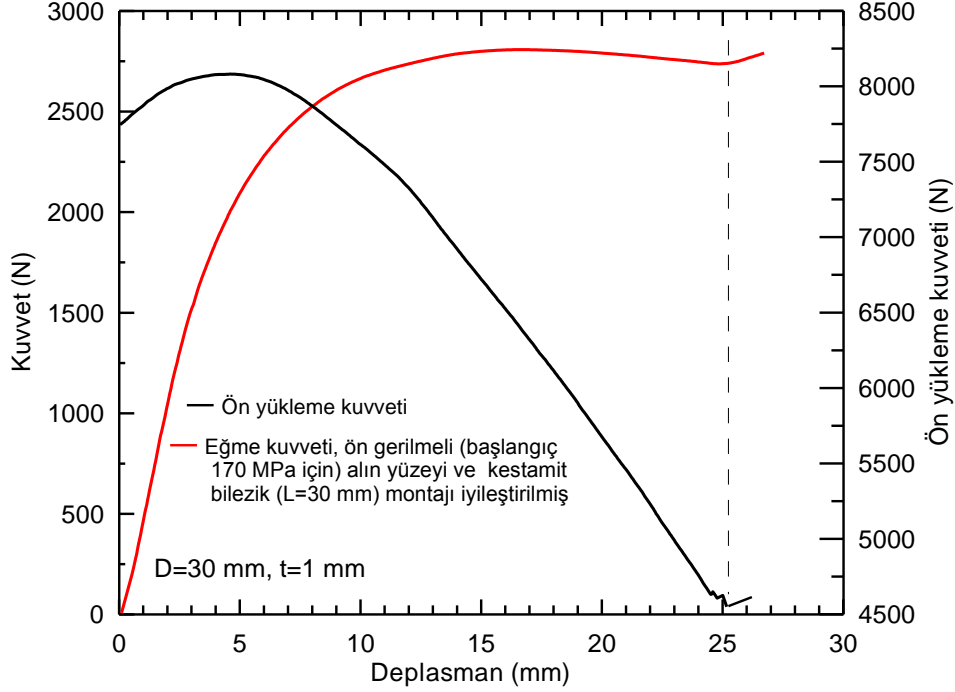


Şekil 207. Ön yükleme esnasında boruda oluşan deformasyon, (a) alın kısmında oluşan deformasyon, (b) cidarda oluşan deformasyon.

Yukarıda belirtilen hususlara ait önlemler alınarak deneyler tekrarlanmıştır. Cidarda akma sınırının altında kalınarak ve yüklemekten kaynaklanacak burkulmalara neden olmadan, yük hücrelerinde uygulanan kuvvet izlenerek kontrollü bir şekilde yüklemeler gerçekleştirilmiştir. Mümkün mertebe yüksek gerilmeler oluşturacak şekilde yük değeri arttırılmaya çalışılmıştır. Deneyin tekrarlanabilirliği açısından en uygun üst gerilme değeri, 7745 N'luk başlangıç ön yükleme kuvveti için, yaklaşık 170 MPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilmenin üstüne çıkılması durumunda, yükün tatbik edildiği alın kısmına yakın bölgede alınan önlemlere rağmen, cidarda burkulmayla başlayan ve yırtılmaya varan deformasyonlar gözlenmiştir.

Şekil 208'de verilen grafikte, ön gerilme oluşturmak için çelik kordon üzerinden boru alt yarı alınına uygulanan aksenal kuvvet ve deney esnasında boruya uygulanan eğme kuvveti, iki yük hücresiyle eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Başlangıçta 7745 N'luk ön yükleme

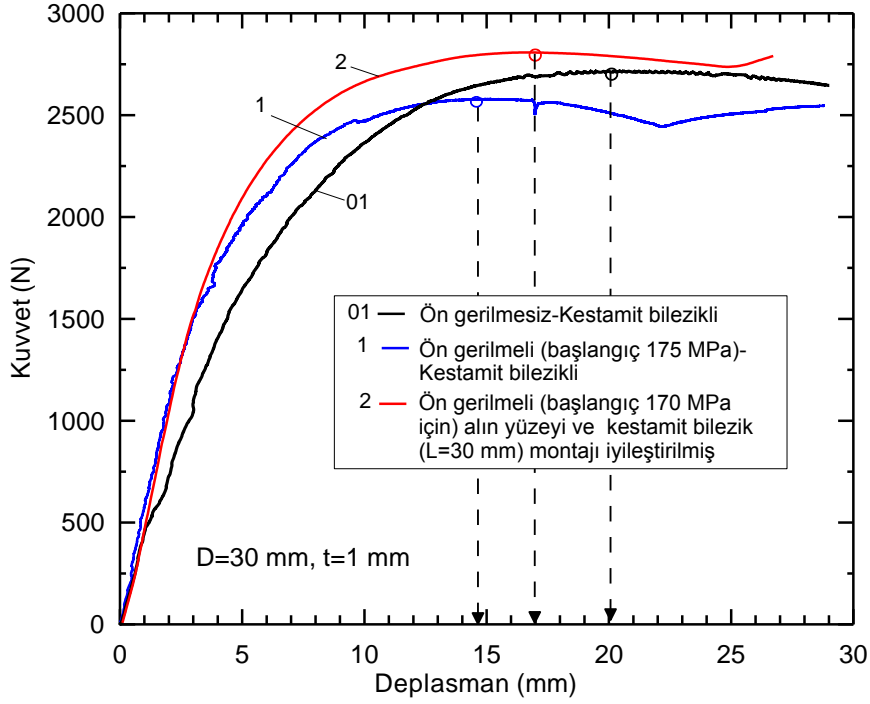
kuvvetinin etkisindeki çelik kordon sayesinde, boru alt cidarına 170 MPa'lık basınç değeri uygulanmaktadır. Artan deplasmanla, dış bükey formundaki boru, düzgün şekil alınmaya dek kordondaki gerginlik artmakta ve 4,6 mm deplasman değerinde 8080 N'a ulaşmaktadır. Bu yük değerinde kesitte oluşan gerilme 177,3 MPa olup, bu alüminyumun akma sınırını olan 205 MPa'ın altındadır.



Şekil 208. Alın yüzeyi ve K montajı iyileştirilmiş tüp yapıdaki ön yüklemeye kuvveti ve uygulanan eğme kuvvetinin deplasmanla değişimi.

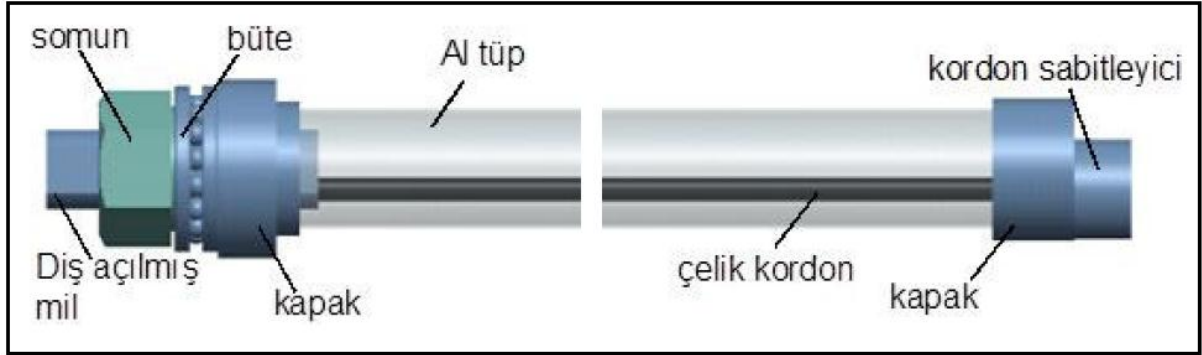
İlerleyen deplasmanla kordondaki ön yüklemeye değeri beklendiği gibi hızlı bir şekilde düşmekte, 25 mm deplasmanda ön yüklemeye ekipmanında kordonun hareket ettiği kanal içinde hareketi sınırlandırıldığından eğme kuvveti ortaya çıkmaya başlamıştır. Deneye müdahale edilerek kordon üzerindeki yük ölçümü durdurulmuştur.

Bu çalışmanın sonuçları Şekil 209'da toplu olarak verilmiştir. Görüleceği üzere, sıkı montajlanmış K bilezikli ve yüzey durumu iyileştirilmiş (2 nolu eğri), başlangıç ön gerilme değeri 170 MPa olan tüp yapının maksimum yük taşıma değeri, ön gerilmemiş duruma (2717 N) göre bir miktar artarak 2808 N'a yükselmiştir. Özellikle parçanın elastik davranışa karşı gösterdiği direncin (rijitliği) belirgin bir şekilde arttığı dikkat çekmektedir. Genel olarak, parçanın EAK de yükselmiştir. Bükülme deplasman değerleri incelendiğinde, önceki ön gerilmeli duruma (1 nolu eğri) göre iyileşme sağlanmış olmasına rağmen, halen ön gerilmemiş tüp yapıya göre bükülme deplasmanı daha küçüktür. Bükülme deplasmanın, ön gerilmemiş duruma göre (01 nolu eğri) bir miktar küçük olması beklenen bir durumdur. Diğer taraftan 1 nolu eğriye göre, elde edilen iyileşmenin nedeni ise, boru alın yüzey kalitesi iyileştirilerek gerilmenin kesite homojen olarak uygulanması sağlanmış, ayrıca sıkı geçme toleranslı K bilezik kullanılarak kesitteki ön gerilmeden efektif olarak yararlanılmış olmasıdır.



Şekil 209. Önceki ön gerilmeli deney sonuçlarıyla, alın yüzeyi ve K bilezik montajı iyileştirilmiş tüp yapıya ait eğme kuvveti-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.

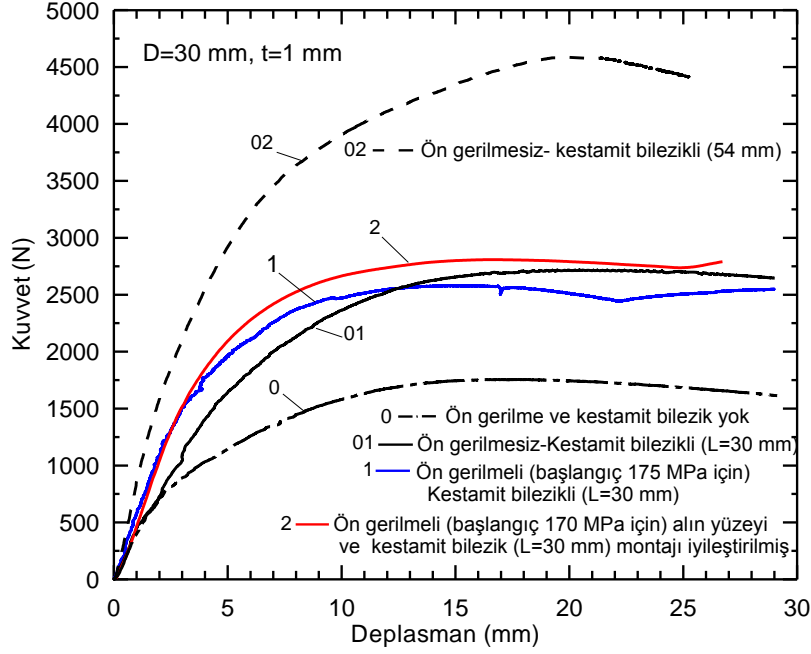
Pratikte kullanılacak ön gerilme uygulanmış portatif düzeneği bir borunun üretilebilmesi için, yukarıdaki düzeneğin en basit ve hafif bir uygulaması aşağıdaki Şekil 210'daki gibi tasarlanmıştır.



Şekil 210. Ön gerilme uygulaması için boruya montajlı portatif düzeneğin tasarımı.

Tasarımı yapılan bu portatif düzeneğin, kapakların alüminyumdan yapılmış olması hali için, minimum ağırlığı 610 g'dır. Elde edilen YTK dikkate alındığında, ÖYTK'nin $(2808/610=)$ 4,6 gibi oldukça küçük bir değer alacağı açıktır. Dolayısıyla hafif ve yük taşıma davranışı açısından elde edilen iyileşme son derece sınırlıdır.

Ön gerilme uygulanmış tüp kirişlerde 28 mm çaplı, 4 mm cidar kalınlığında ve 30 mm boyundaki K bileziğin boyu, mesnetler arası mesafenin sadece %25'ine karşılık gelecek şekilde 54 mm olarak değiştirilmesi ve ön gerilme uygulanmadan deneyin yapılması durumunda Şekil 211'de verilen 02 kodlu eğri elde edilmiştir. Şekilde verilen eğriler karşılaştırıldığında, 02 kodlu 54 mm boyunda K'li yapının birçok açıdan tercih edilebilir olduğu açıkça görülmektedir. Bu tüp yapıda 18 g gibi sadece küçük bir ilave ağırlıkla, 4585 N'luk yük taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Bu değer ön gerilmeli durumda elde edilen kapasitenin 1,63 katına eşittir.



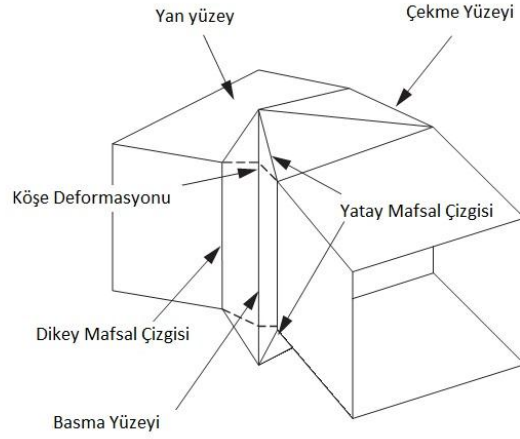
Şekil 211. Ön gerilmeli/siz ve K bilezikli/siz takviyeli tüp yapılarının kuvvet-deplasman eğrileri.

Elde edilen bilgilerin ışığı altında şu irdelemelere yapmak mümkündür: Tüp yapıda hasar öncelikle lokal burkulmayla başlamaktadır. Dolayısıyla, ön gerilmenin tüp kirişin YTK'ne katkı sağlayabilmesi içten yapılacak takviyeyi zorunlu kılmaktadır. Tüp yapının içten takviye edilmemesi durumunda, sadece elastik bölgede çok az miktarda rijitlik artışı sağlanmakta, ancak hem bükülme deplasmanı, hem de yük taşıma kapasitesi önemli oranda düşmektedir. Ön gerilmenin faydalı etkisinin gözlenebilmesi için, tüp alın yüzeylerinin paralel ve kalitesinin en azından hassas tornalanmış yüzey kalitesinde olması gereklidir. Çelik kordonun yükleme esnasında K bilezik cidarına temas etmemesi için, boru içine yerleştirilen bileziğin cidar kalınlığı belirli bir değerde sınırlı kalması mecburidir. Deneysel çalışma kapsamında, alınan önlemlere rağmen, yük taşıma kapasitesinde elde edilen artış miktarı oldukça azdır. Ön gerilmeli tüpün ÖYTK (=4,6) boş tüpe (=23) göre çok daha kötüleşmiştir.

5.2.10. Kare Kesitli Kompozit Kirişler

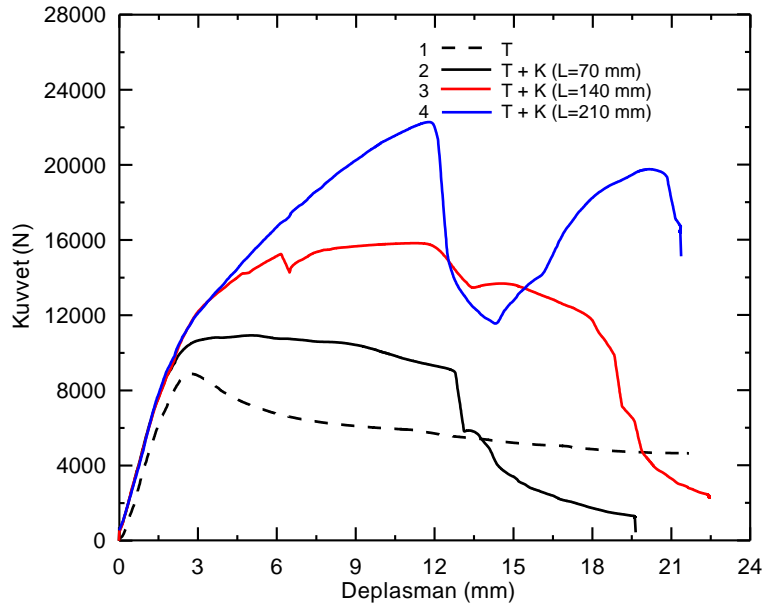
5.2.10.1. İçten Takviyeli Numuneler

Kare kesitli içi boş kirişlerde üç nokta eğme deneyi eğme esnasında kuvvet-deplasman eğrisini etkileyen en önemli oluşum mafsallı oluşumdur. Mafsallı oluşumu mandrelin temas ettiği plastik bölge içinde gerçekleşmektedir. Yükün en büyük değerini ulaşmadan önce cidarlarda başlayan akma ve burkulma daha sonra yükte belirgin bir şekilde düşüşe neden olmaktadır. Mafsallı oluşumunu başlangıcında kuvvet maksimum değere ulaşır daha sonra kirişin yan yüzeyleri dışa doğru, alt yüzeyi içe doğru burkulmaya başlar ve böylece mafsallı oluşumu tetiklenir. Üç nokta eğme deneyinde, buna ek olarak mandrel temas noktasında oluşan lokal deformasyon hasarlanma sürecini kolaylaştırmaktadır. Oluşan bu hasar mekanizmasında kalıcı deformasyon mafsallı çevresiyle sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle literatürde yapılan çalışmalarda içten takviye edilen kirişlerde kısmi olarak uygulanan takviyeler daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu noktada kısmi takviye malzemesi, mandrel temasından kaynaklanan lokal deformasyonu engeller veya kısmen geciktirir. Şekil 212'de saf eğme zorlanması için kare kesitli tüpteki mafsallı oluşumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 212. Kare kesitli tüpte mafsall oluşumu.

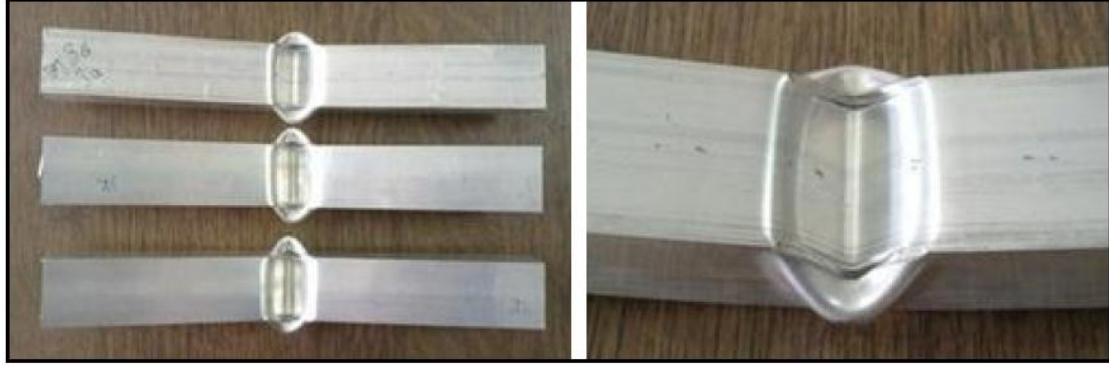
Kare kesitli takviyesiz ve içten K ile takviyeli tüp yapıların eğme davranışları Şekil 213'de verilmiştir. F_{max} değeri 8876 N olan takviyesiz kare kesitli kirişte, mandrelin numune üst yüzeyinde oluşturduğu lokal deformasyon miktarına bağlı olarak yan yüzeyler burkulma etkisiyle dışarı doğru yer değiştirmektedir. İlerleyen deplasman ile malzemenin sertliğine bağlı olarak üst köşelerde, çatlak oluşumu kendini göstermektedir. Daha sonra yırtılma belirgin bir şekilde tüp yapının hasarlanmasına neden olmaktadır. Yırtılmanın oluşmadığı numunelerde, mafsall oluşumu artan deplasmanla daha belirgin olarak meydana gelmektedir. Kare kesitli numunelerin mafsall oluşumu, yatay mafsall çizgi boyu daha kısa olduğundan, dairesel kesitli numunelere göre daha dar bir aralıkta gerçekleşmektedir.



Şekil 213. Takviyesiz ve içten K ile takviyeli kare kesitli kompozit kirişlerin eğme davranışları.

İçeriden takviye edilmiş kirişlerde, takviyesiz duruma göre farklı bir hasar mekanizması gözlemlenmiştir. Ayrıca, takviye malzemesinin boyutunun da eğme davranışı üzerinde etkisinin bulunduğu tespit edilmiştir. Örneğin, takviye malzemesinin boyu kısa tutulduğunda deney esnasında kiriş cidarları K takozun alt kenarları etrafında sarılmakta ve bu bölgede yoğunlaşan gerilmeye bağlı olarak alüminyum cidarda yırtılma gerçekleşmektedir. K takoz boyu arttıkça üzerindeki yük daha geniş bir alanda etkin olduğundan, takozun bitim noktasında sarılma nispeten daha düşük, dolayısıyla da yırtılma daha yüksek yüklerde

gerçekleşmiştir. K boyuna göre hasar gören bölgelerin yeri değişmiştir. En uzun K parçası için kiriş cidarında diğerlerinden farklı olarak yırtılma oluşmamış, ancak kiriş mesnetlerin bulunduğu noktada aşırı deformasyonun etkisiyle yığılma oluşmuştur. Buradan şu sonuca ulaşılmaktadır: Tüp yapının içerisine yerleştirilen polimerik malzeme lokal deformasyonu engellemiş ancak, tüp yapının kesiti mesnet reaksiyon kuvvetine karşılık veremediği için, deformasyona uğramıştır. Üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuş, takviyesiz ve K takoz ile içten takviyeli, kare kesitli kompozit kirişlerin resimleri Şekil 214 ve 215'de verilmiştir.



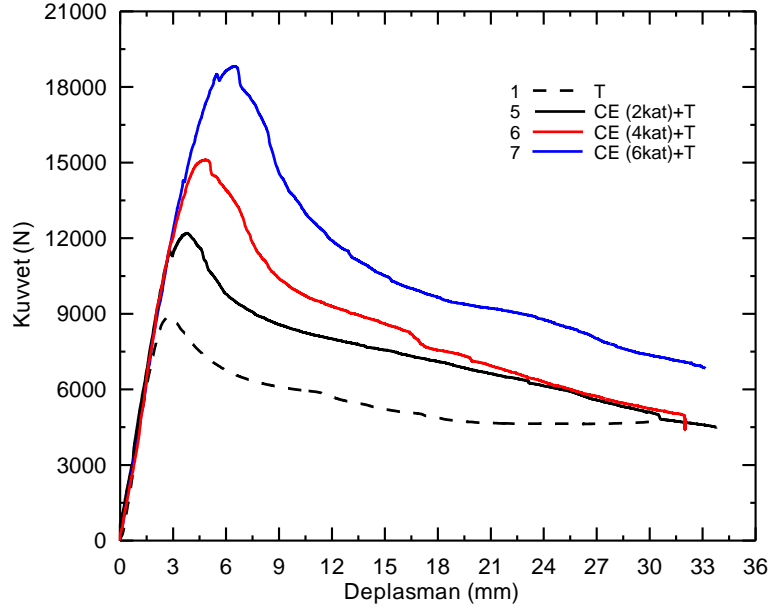
Şekil 214. Takviyesiz kare kesitli kirişin üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşü.



Şekil 215. İçten K takoz ile takviyeli kare kesitli kirişin üç nokta eğme deneyi sonrası görünüşü.

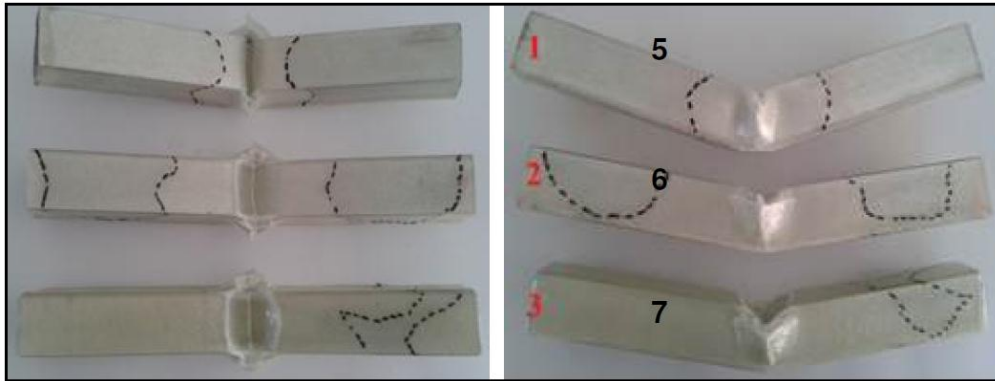
5.2.10.2. Dıştan Takviyeli Numuneler

Şekil 216'da görüldüğü gibi artan katman sayısı ile kirişin YTK belirgin bir şekilde iyileşmektedir. Kullanılan elyafın türü mukavemet değerleri ile orantılı olarak kirişin YTK'ni arttırmaktadır. Bu davranış, literatürde dıştan takviye edilmiş kirişler üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Grafiklerde maksimum yük değeri aşıldıktan sonra ana taşıyıcı olan alüminyum tüp kirişte yırtılma oluşmadığı için ani düşüşler görülmemektedir. Artan katman sayısı ile YTK ve EAK artmaktadır.



Şekil 216. Dıştan CE takviyeli kare kesitli kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.

Farklı katman sayısına sahip CE takviyeli tüp kirişlerle yapılan deneylerde, hasar mekanizmasının değişmediği, ancak hasarın olduğu deplasman ve yük değerinin arttığı gözlenmiştir. Bu davranış, profil yan cidarları mandrel kuvvetinin etkisi altında dışarı doğru burkulmaya çalışırken yüzeydeki elyaf, cidar hareketini kısıtlamasıyla açıklanabilir. Doğal olarak artan katman sayısı ile cidarların daha büyük yük altında burkulduğunu söylemek mümkündür. Şekil 216'da 4 kat CE takviyeli kirişte, 24 mm deplasmandan sonra elyaflar etkisini kaybetmeye başlamıştır. Hasar gören elyaflar YTK'ni yitirdiği için kiriş önce 2 katmanlı kompozit kirişin taşıma yüküne, 32 mm deplasmandan sonra da elyaf-epoksi ve metal-epoksi ara yüzeyindeki aşırı hasar (ayrılma) sonucu sadece takviyesiz kirişin yük taşıma değerine düşmüştür. Yükün etkisiyle epoksida görülen ve gerilme beyazlığı olarak adlandırılan oluşum, ara yüzeyler arasındaki ayrılmadan kaynaklanan görünüm farklılığıdır (Şekil 217). Takviye edilen elyafın katman sayısına bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin artması beklenen bir davranıştır.

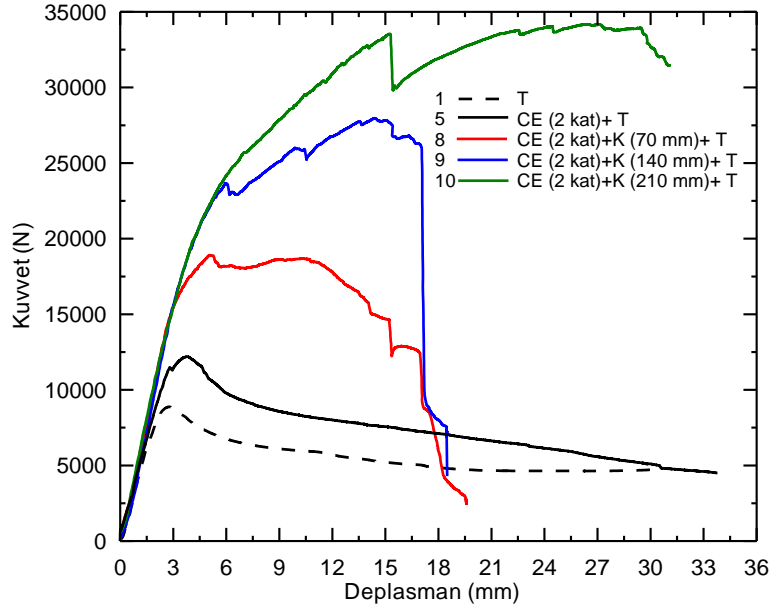


Şekil 217. CE takviyeli numunelerde oluşan hasar: 5: 2 kat CE, 6: 4 kat CE, 7: 6 kat CE.

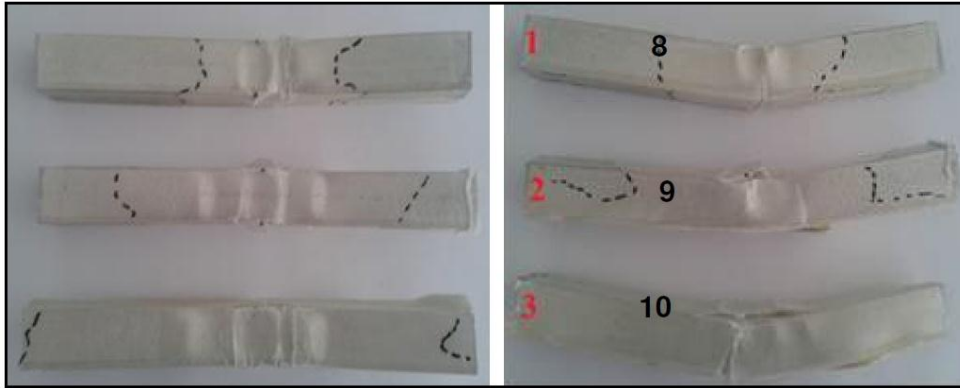
5.2.10.3. İçten ve Dıştan Takviyeli Numuneler

Dıştan 2 kat CE ve içten farklı boylarda K takoz ile takviye edilmiş numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 218'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, dıştan CE takviyesi yapılmış kirişlerin içerisine K takozlar yerleştirilmesinin kirişin rijitliğini belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, içten yapılan K takoz takviyesinden sonra kirişte meydana gelen hasar

mekanizması değişmiş, CE'ta oluşan hasarlı bölge alanı genişlemiştir (Şekil 219). Bu durum, CE takviyesinden faydalanma oranının arttığını göstermektedir.



Şekil 218. 2 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.



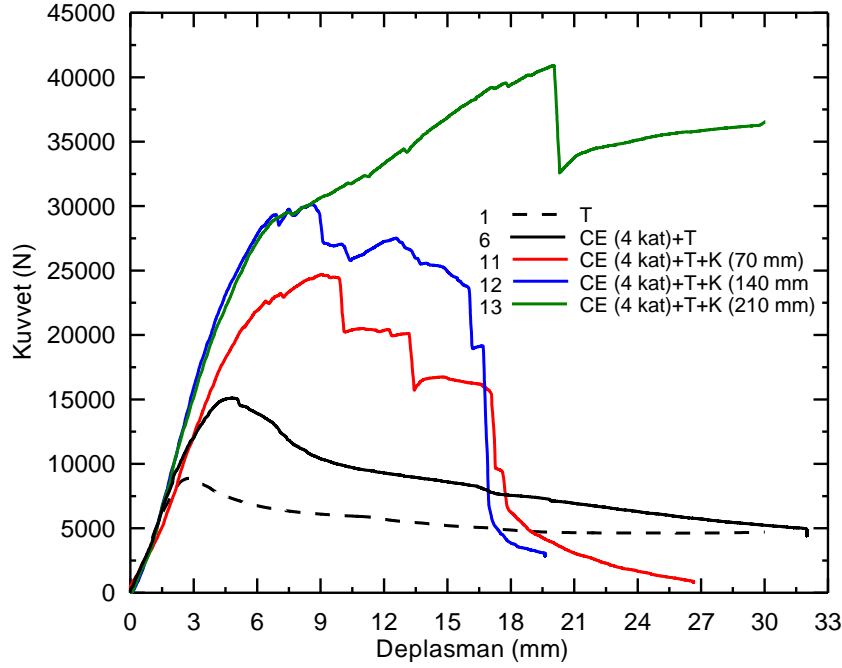
Şekil 219. 2 kat CE ve K takoz takviyeli kirişlerin yandan ve üstten görünüşleri.

Şekil 220'de 2 kat CE ve 210 mm K takoz takviyeli numuneye mesnet tepkisinin verdiği hasar görülmektedir. üç nokta eğme deneyinde kirişe verilen yükün 32 kN mertebelerine ulaşmasıyla mesnetlerdeki tepki kuvveti 16 kN değerlerine ulaşmıştır. Mesnet bölgelerinde içi boş olan kiriş bu yüke dayanamamıştır. Şekilde görüldüğü gibi, 16 kN değeri 2 kat CE takviyeli tüp kirişin ulaştığı maksimum yükün üzerindedir. Takviye edilen K takozun uzunluğu 210 mm olduğunda hasar mekanizması diğer takviyelere göre farklılık göstermektedir.

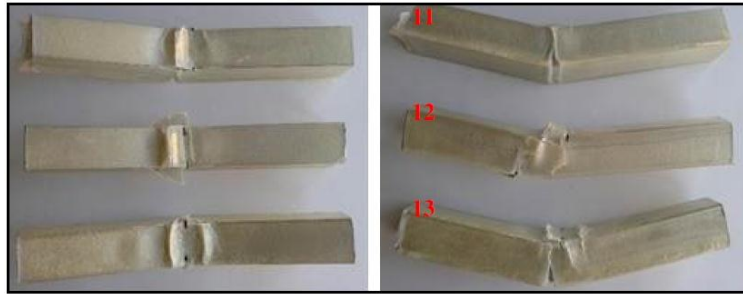


Şekil 220. 2 kat CE ve 210 mm K takoz takviyeli kirişte mesnet tarafından oluşturulan hasar.

Dıştan 4 kat CE ve içten farklı boylarda K takoz ile takviye edilmiş numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 221'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, dıştan 4 kat CE takviye edilmesiyle 70 mm takviye edilmiş numunede elyafdaki hasara bağlı olarak kuvvetin kademeli olarak azaldığı, ana taşıyıcı malzemenin yırtılmasıyla da aniden düştüğü görülmüştür. Kademeli olarak düşüşün nedeni elyafta oluşan kırılmaların lokal olarak gerçekleştiğidir. 4 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelerin deney sonrasına ait görüntüleri Şekil 222'de verilmiştir.

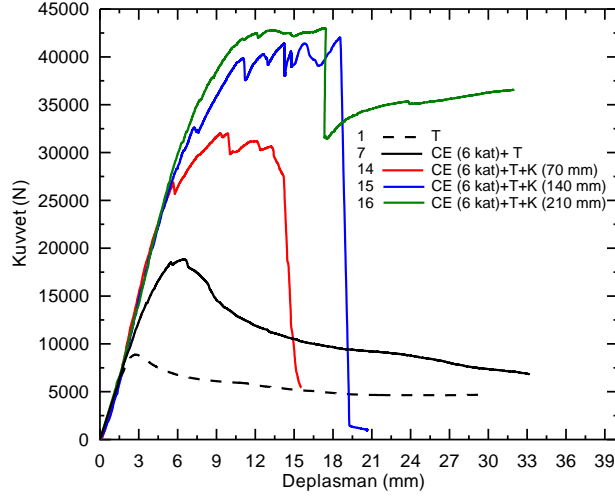


Şekil 221. 4 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 222. 4 kat CE ve K takoz takviyeli kirişlerin yandan ve üstten görünüşleri.

Dıştan 6 kat CE ve içten farklı boylarda K takoz ile takviye edilmiş numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 223'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, dışarıdan 6 kat CE ve içten 70 mm uzunluğundaki K takoz kullanılarak takviye edilen numunelerde, 2 ve 4 kat takviye edilmiş numunelere benzer hasarın ortaya çıktığı görülmektedir. Yük taşıma kapasitesinin boş numunelere göre 3,6 kat arttığı belirlenmiştir (Tablo 2). 6 kat CE ve 140 mm K'li numunede yırtılma davranışı bir miktar geciktirilmiştir. 4 kat CE takviyesi ile 3,4 kat artış sağlanabilirken, bu değer 6 kat CE takviyesiyle 4,73 kate çıkmıştır. 210 mm takviyeli kirişte yırtılma görülmemiştir. Şekilde görülen eğrideki ani düşüş CE takviyesinin orta bölgeden yırtılmasıyla meydana gelmiştir. Ancak, bu CE takviyesinin tamamen devreden çıktığı anlamına gelmemektedir. CE takviyesi mesnet bölgesinde yığılmayı önleyici bir etmen olarak görevine devam etmektedir. 6 kat CE ve K takoz takviyeli kirişlerin deney sonrasına ait görüntüleri Şekil 224'de verilmiştir. Deneylere ait sayısal veriler Tablo 19'da verilmiştir.



Şekil 223. 6 kat CE ve kısmi K takoz takviyeli numunelere ait kuvvet-deplasman eğrileri.



Şekil 224. 6 kat CE ve K takoz takviyeli kirişin yandan ve üstten görünüşleri.

Tablo 19. Dıştan ve içten takviye edilmiş kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi sonuçları.

No	Kombinasyon*	F_{max} (N)	Enerji** (J)	Ağırlık (g)	F_{max} oranı	Enerji oranı	$F_{max}/ağırlık$ (N/g)	Enerji/ağırlık (J/g)
1	T	8876	92,6	200	1,00	1,00	44,4	0,43
2	T+K(70)	10925	132	300	1,23	1,43	36,4	0,44
3	T+K(140)	15833	193	408	1,78	2,08	38,8	0,47
4	T+K(210)	22279	221	517	2,51	2,39	43,0	0,43
5	CE(2 kat)+T	12425	129	269	1,40	1,39	46,2	0,48
6	CE(4 kat)+T	15110	155	316	1,70	1,67	47,8	0,49
7	CE(6 kat)+T	18820	193	367	2,11	2,08	51,28	0,53
8	CE(2kat)+T+K(70)	18911	236	358	2,13	2,55	52,8	0,66
9	CE(2kat)+T+K(140)	27952	315	460	3,15	3,40	60,8	0,68
10	CE(2kat)+T+K(210)	34175	349	570	3,85	3,77	59,9	0,61
11	CE(4kat)+T+K(70)	24697	260	420	2,78	2,81	58,8	0,62
12	CE(4kat)+T+K(140)	30106	336	516	3,39	3,63	58,3	0,65
13	CE(4kat)+T+K(210)	40903	375	627	4,61	4,05	65,2	0,60
14	CE(6kat)+T+K(70)	32004	236	470	3,61	2,55	68,0	0,50
15	CE(6kat)+T+K(140)	42034	315	589	4,74	3,40	71,4	0,53
16	CE(6kat)+T+K(210)	42992	349	690	4,84	3,77	62,3	0,51

*Parantez içindeki rakamlar K takozun boyunu göstermektedir.

**Enerjiler 15 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır.

5.3. Darbe Deneyleri

5.3.1. Dairesel Kesitli Kompozit Numunelerle Yapılan Deneyler

5.3.1.1. Ø19 numunelerle yapılan deneyler

Darbe deney numunelerinin boyutları ve mesnetler arası mesafesi üç nokta eğme deney numuneleriyle aynıdır. Yalnızca çapı 19 mm olan boruların darbe deneyi numuneleri deney cihazının konstrüktif kısıtları nedeniyle kiriş boyu bir miktar uzun tutularak numuneler hazırlanmış ve deneyler yapılmıştır. Mesnetler arası mesafe normalde 133 mm olması gerekirken sözü edilen nedenden dolayı 168 mm olarak ayarlanmıştır. Çapı 19 mm olan içten ve dıştan (CE) takviyeli numunelerin darbe deneyi sonuçları Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20. Çapı 19 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon		Sarkaç son açı (derece)	Sarkaç son yükseklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Açıklama
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	-	T	120.5	1334,6	50,3	-
2	-	T+K(dolu)	113.5	1241,8	257,3	-
3	CE	T	109	1179,2	397,1	-
4	CE	T+K(dolu)	118.5	1308,7	108,0	Tamamen ayrıldı
5	KE	T	119	1315,3	93,5	Kısmi ayrıldı
6	KE	T+K(dolu)	118	1302,2	122,6	Tamamen ayrıldı

Tablo incelendiğinde, içten ve dıştan takviyeli numunelerde en yüksek iyileşme 3 nolu kombinasyonda görülmüştür. Harcanan enerji bu kombinasyon için 7,9 kat artmıştır. Diğer numunelerde, hasar tamamen veya kısmi ayrılma şeklinde görüldüğünden daha düşük enerji değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Çapı 19 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri Şekil 225'de verilmiştir.



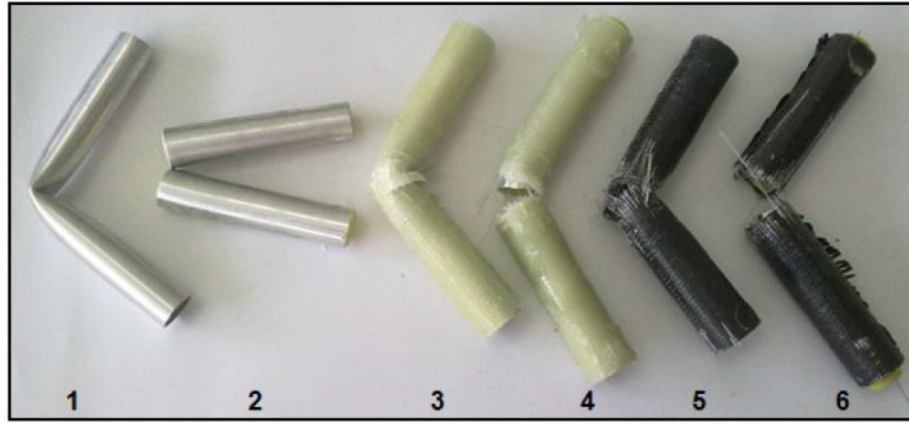
Şekil 225. Çapı 19 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.

5.3.1.2. Ø24 numunelerle yapılan deneyler

Çapı 24 mm olan içten ve dıştan (CE) takviyeli numunelerin darbe deneyi sonuçları Tablo 21'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, içten ve dıştan takviyeli numunelerde en yüksek iyileşme 6 nolu kombinasyonda görülmüştür. Harcanan enerji bu kombinasyon için 4,6 kat artmıştır. Diğer numunelerde, hasar tamamen veya kısmi ayrılma şeklinde görüldüğünden daha düşük enerji değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Çapı 24 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri Şekil 226'da verilmiştir.

Tablo 21. Çapı 24 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon		Sarkaç son açısı (derece)	Sarkaç son yükseklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Açıklama
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	-	T	119,5	1321,7	79	-
2	-	T+K(dolu)	120	1328,2	64,6	Tamamen ayrıldı
3	CE	T	113	1235	272,6	Kısmi ayrıldı
4	CE	T+K(dolu)	111	1207,3	334,4	Tamamen ayrıldı
5	KE	T	111,5	23,4	297,5	Tamamen ayrıldı
6	KE	T+K(dolu)	110	1193,3	365,6	Tamamen ayrıldı



Şekil 226. Çapı 24 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.

5.3.1.3. Ø30 numunelerle yapılan deneyler

Çapı 30 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneylerinden elde edilen veriler Tablo 22'de verilmiştir. İçten yapılan takviye sonucu elde edilen en yüksek iyileşme 5,3 kat ile 5 nolu kombinasyonda görülmüştür. 6, 7 ve 8 nolu kombinasyonlarda tüm kesitte ayrılma gözlemlendiğinden enerji değerleri daha düşük bulunmuştur. Bu grubun darbe deneyi sonrasına ait görünüşleri Şekil 227'de verilmiştir.

Tablo 22. Çapı 30 mm olan borunun içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon	Son açı (derece)	Son yük-seklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Hasarlanan Takviye Bileşeni
-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	T	118,5	1281	108,01	-
2	T+PB	111	1178	334,4	-
3	T+PB(3)+K(2)	108	1135	428,8	T, PB
4	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	107	1120	460,7	T, PB, K
5	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	103,5	1069	573,7	Tüm kesitte ayrılma
6	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	107	1120	460,7	T, PB, K
7	T+PB(3)+K(8)	108	1135	428,8	Tüm kesitte ayrılma
8	T+PB(3)+K(11-dolu)	113	1206	272,6	Tüm kesitte ayrılma
9	KE+T	108,3	1139	419,3	KE
10	KE+T+PB	103,5	1069	573,7	KE, T
11	KE+T+PB(3)+K(2)	100	1018	688,7	KE, T
12	KE+T+PB(3)+K(2)+PP(3)	100,5	1025	672,2	KE, T, PB
13	KE+T+PB(3)+K(2)+PP(6)	102,9	1061	593,3	KE, T, PB, K
14	KE+T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	104,7	1087	534,7	Tüm kesitte ayrılma
15	KE+T+PB(3)+K(8)	107	1120	460,7	Tüm kesitte ayrılma
16	KE+T+PB(3)+K(11-dolu)	106,8	1118	467,0	Tüm kesitte ayrılma



Şekil 227. Çapı 30 mm olan içten takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.

İçten ve dıştan yapılan takviye neticesinde enerji 6,75 kat artış ile 11 nolu kombinasyonda görülmüştür. Diğer kombinasyonlarda kısmi veya tüm kesitte ayrılmalar olduğundan enerji değerleri daha düşüktür. KE'lı numunelerin darbe deneyi sonrasına ait görünüşleri Şekil 228'de verilmiştir.



Şekil 228. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan (KE) takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri.

Çapı 30 mm olan içten polimerik malzemelerle ve dıştan CE ile takviye edilen numunelerin darbe deneyi sonuçları Tablo 23'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, dıştan CE takviyeli numunelerde en yüksek iyileşme 8 nolu kombinasyonda görülmüştür. Harcanan enerji bu kombinasyon için 7,3 kat artmıştır. Diğer numuneler, nispeten daha rijit olanlar, tamamen ayrılma şeklinde kırılma göstererek daha düşük enerji değerlerinde hasarlandığı belirlenmiştir. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri Şekil 229'da verilmiştir.

Tablo 23. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon		Son açı (derece)	Son yük-seklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Açıklama
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	CE	T	118,5	1281	108,01	-
2	CE	T+PB	107	1150,7	460,7	-
4	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	104,5	1114,6	541,2	-
5	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	101,5	1070,6	639,2	-
6	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	103	1092,7	590	Tamamen ayrıldı
3	CE	T+PB(3)+K(2)	101	1063,3	655,7	-
7	CE	T+PB(3)+K(8)	103	1092,68	590	Tamamen ayrıldı
8	CE	T+PB(3)+K(11-dolu)	97	1003,74	788,4	Tamamen ayrıldı



Şekil 229. Çapı 30 mm olan içten ve dıştan (CE) takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünüşleri

5.3.1.4. Ø31 Numuneler

Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonuçları Tablo 24'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, dıştan CE takviyeli numunelerde en yüksek iyileşme 6 nolu kombinasyonda görülmüştür. Harcanan enerji bu kombinasyon için 7,6 kat artmıştır. Dıştan KE'la takviyeli numunelerde ise en iyi sonuç 8 nolu kombinasyonda sağlanmıştır. Buna göre, harcanan enerji 7,1 kat artmıştır. Diğer numuneler, nispeten daha rijit olanlar, tamamen ayrılma şeklinde kırılma göstererek daha düşük enerji değerlerinde hasarlandığı belirlenmiştir. Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri Şekil 230'da verilmiştir.

Tablo 24. Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon	Son açı (derece)	Son yükseklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Hasarlanan Takviye Bileşeni
-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	T	118	1274	115,2	-
2	CE+T	108,5	1142	412,9	-
3	CE+T+K(4)	99,5	1010	705,2	CE
4	CE+T+K(4)+PP(3,5)	97	973	788,4	CE, T, K
5	CE+T+K(4)+PP(6,5)	104	1077	557,4	CE, T, K
6	CE+T+K(4)+PP(dolu)	94,5	935	872,2	CE
7	KE+T	107	1120	460,7	CE
8	KE+T+K(4)	96	958	821,9	CE
9	KE+T+K(4)+PP(3,5)	111	1178	334,4	Tüm kesitte ayrılma
10	KE+T+K(4)+PP(6,5)	103	1062	590,0	Tüm kesitte ayrılma
11	KE+T+K(4)+PP(dolu)	106	1106	492,7	Tüm kesitte ayrılma



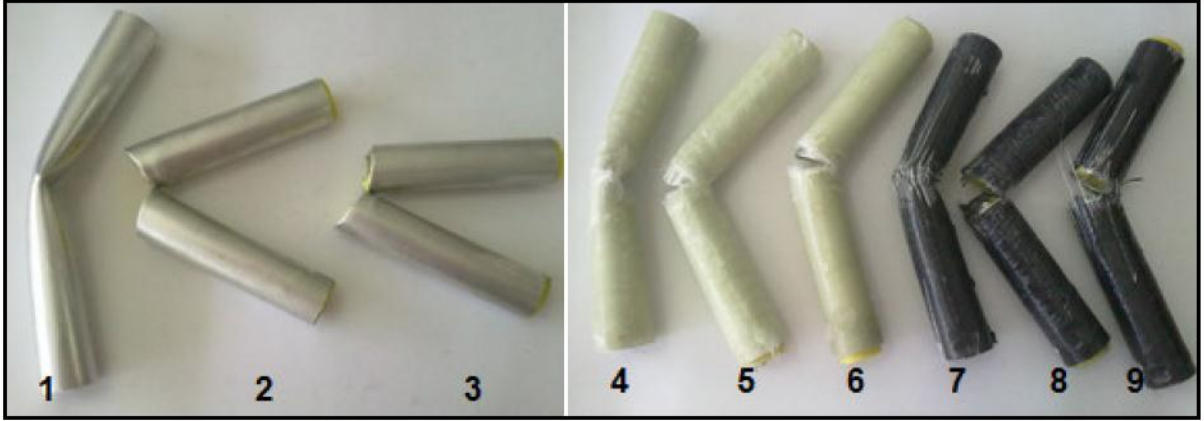
Şekil 230. Çapı 31 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünümleri: (a) CE'li numuneler, (b) KE'li numuneler.

5.3.1.5. Ø40 Numuneler

Çapı 40 mm olan içten ve dıştan (CE) takviyeli numunelerin darbe deneyi sonuçları Tablo 25'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde, içten ve dıştan takviyeli numunelerde en yüksek iyileşme 9 nolu kombinasyonda görülmüştür. Harcanan enerji bu kombinasyon için 6 kat artmıştır. Çapı 40 mm olan içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünümleri Şekil 231'de verilmiştir.

Tablo 25. Çapı 40 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon		Sarkaç son açı (derece)	Sarkaç son yükseklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Açıklama
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	-	T	118,5	1308,7	108,0	-
2	-	T+K	117	1289,0	152,1	Tamamen ayrıldı
3	-	T+K(8)+PP(5)	116	1275,7	181,8	Tamamen ayrıldı
4	CE	T	110	1193,3	365,6	Kısmi hasar
5	CE	T+K	105	1121,8	525,0	Tamamen ayrıldı
6	CE	T+K(8)+PP(5)	103	1092,7	590,0	Tamamen ayrıldı
7	KE	T	106	1136,3	492,7	Kısmi hasar
8	KE	T+K	102	1078,0	622,8	Tamamen ayrıldı
9	KE	T+K(8)+PP(5)	101	1063,3	655,7	Tamamen ayrıldı



Şekil 231. Çapı 40 mm olan içten ve dıştan takviyeli kombinasyonların darbe deneyi sonrası görünümleri.

5.3.1.6. PVC köpüklü numunelerle yapılan deneyler

Çapı 31 mm olan ve Elyaf+T+K+PVC köpük şeklinde takviye edilen kompozit kirişin darbe deney sonuçları Tablo 26'de verilmiştir. PVC köpük takviyeli kompozit kirişlerde en yüksek enerji değerini T+K+PVC(L=108 mm) kompoziti vermiştir. Darbe deneylerinden sonraki hasara ait görüntüler Şekil 232'de verilmiştir.

Tablo 26. İçten K ve PVC köpük takviyeli kirişlerin darbe deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.

No	Kombinasyon		Son açı (derece)	Son yük-seklik (mm)	Harcanan Enerji (J)	Açıklama
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-	-
1	-	T+K+ PVC(L=108 mm)	111,5	1214,2	318,8	-
2	-	T+K+ PVC (L=162 mm)	112	1221,2	303,4	-
3	CE	T+PVC (dolu)	113,5	1241,8	257,3	-



Şekil 232. İçten K ve PVC köpük takviyeli kirişlerin darbe deney sonucu hasara ait görüntüler

5.3.2. Kare Kesitli Kompozit Numuneler

40x40x1,5 mm kare kesitli alüminyum kirişler ile oluşturulan numunelerin darbe deneyleri sonucu elde edilen değerlendirme parametreleri Tablo 27'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde, içten kısmı K takviyeli numunelerde en iyi iyileşme 4 nolu kombinasyon da elde edilmiştir. Dıştan 2 kat CE takviyeli numunelerde ise en yüksek iyileşme 8 nolu kombinasyonda görülmüştür. 4 kat CE takviyeli numunelerde ise en yüksek iyileşme 12 nolu kombinasyonda, 6 kat CE takviyeli numunelerde ise en yüksek iyileşme 16 nolu kombinasyonda görülmüştür. 16 nolu kombinasyondaki iyileşme 2.8 kat olup elde edilen en yüksek değerdir. Kare kesitli içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri Şekil 233'de verilmiştir.

Tablo 27. 40x40x1,5 mm kare kesitli numunelerin darbe deneyi sonuçları.

No	Dıştan elyaf takviyesi	Kombinasyon*	Sarkaç son açısı (derece)	Sarkaç son yükseklik (mm)	Harcanan Enerji (J)
-	-	Serbest Salınım	122	1326	-
1	-	T	113	1235,0	272,6
2	-	T+K(70)	112	1221,2	303,4
3	-	T+K(140)	114	1248,7	242,1
4	-	T+K(210)	106	1136,3	492,7
5	CE (2 kat) dokuma	T	112	1221,2	303,4
6	CE (2 kat) dokuma	T+K(70)	110	1193,3	365,6
7	CE (2 kat) dokuma	T+K(140)	107	1150,7	460,7
8	CE (2 kat) dokuma	T+K(210)	105	1121,8	525,0
9	CE (4 kat) dokuma	T	109	1179,2	397,1
10	CE (4 kat) dokuma	T+K(70)	103	1092,7	590,0
11	CE (4 kat) dokuma	T+K(140)	102	1078,0	622,8
12	CE (4 kat) dokuma	T+K(210)	101	1063,3	655,7
13	CE (6 kat) dokuma	T	104	1107,3	557,4
14	CE (6 kat) dokuma	T+K(70)	101	1063,3	655,7
15	CE (6 kat) dokuma	T+K(140)	100	1048,5	688,7
16	CE (6 kat) dokuma	T+K(210)	98	1018,7	755,1

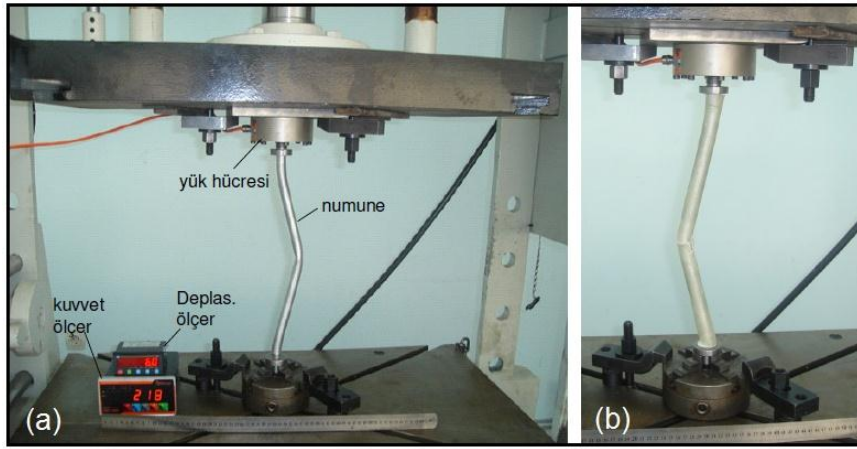
*CE: Dokuma cam elyaf, Parantez içindeki rakamlar K boyunu göstermektedir.



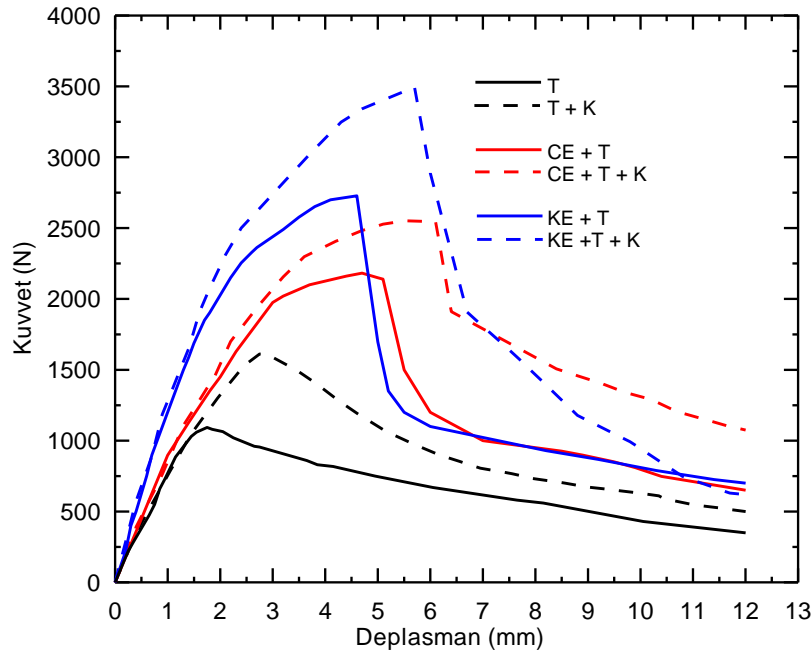
Şekil 233. Kare kesitli içten ve dıştan takviyeli numunelerin darbe deneyi sonucu hasara ait görünüşleri.

5.4. Burkulma Deneyleri

D/t:19/1 mm ve 400 mm boyunda alüminyum tüp kirişlere içten K, dıştan CE ve KE ile takviye yapılarak elde edilen numunelerle burkulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dıştan takviyede kumaş kalınlığı her iki elyaf için aynı olup, katman sayısı dört olarak sabit tutulmuştur. Deney sistematığı açısından her bir takviyenin etkisini ayrıca değerlendirebilmek için numuneler ayrı ayrı hazırlanmış ve son kademedeki her iki (hem iç hem dış) takviye için deneyler tekrarlanmıştır. Deney başlangıçta numune şeklindeki fark edilebilir bir değişiklik gözlenmezken, artan kuvvetin etkisiyle belirli bir deplasmanda parçanın orta bölgesinde bükülme kendini göstermiştir (Şekil 234). Temel mukavemet bilgilerince, iki uçundan ankastre bağlantı için numunelerde bükülmenin beklendiği aralık tahmin edilebilir mertebededir. Beş farklı kombinasyona uygulanan burkulma deneylerine ait sonuçlar toplu olarak Şekil 235'de verilmiştir.



Şekil 234. Burkulma deneyi, (a) Takviyesiz kirişte oluşan bükülme, (b) Elyaf takviyeli kirişte oluşan bükülme.



Şekil 235. Burkulma deneyine tabi tutulmuş numunelerin kuvvet-deplasman grafikleri.

Takviyesiz tüp yapının burkulma yükü 1093 N iken, CE sarılmasıyla bu değer 2182 N'a, içten K takviye edilmesi durumunda ise 2552 N kadar yükselmiştir. Takviyenin sadece içten yapılmasıyla kuvvet değerine 1610 N olarak elde edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, özgül burkulma kuvveti değerleri ($F_{max}/ağırlık$) Tablo 28'de verilmiştir.

Dıştan elyaf türü olarak karbon kullanılması durumunda 2730 N olan burkulma yükünün, içten K ile yapılacak bir takviye neticesinde 3490 N değeri ile en yüksek değerini ulaşmıştır. Yapılan takviyenin etkinliği nispetinde burkulmanın deplasmanı bütün numuneler için genel olarak artmıştır. Deplasman değeri takviyesiz yapı için yaklaşık 1,8 mm iken, en yüksek burkulma kuvvetini sağlayan yapıda (KE+T+K) 5,7 mm'yi aşmıştır. Grafikte CE ve KE sarılmış iki grup kendi içerisinde karşılaştırıldığında, KE'lı parçalarda burkulma kuvvetinin daha yüksek olmakla birlikte, eğride düşüşün daha kısa aralıkta ve hızlı bir şekilde olduğu, buna karşın CE'lı yapıda bunun nispeten daha geniş bir deplasman aralığında gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bunun muhtemel nedeninin karbon-epoksinin tabakasının nispeten daha gevrek özellikte olmasıdır. Tablo 27'de görüldüğü gibi en yüksek burkulma yükü 6 nolu kombinasyona aittir. Hafif ve aynı zamanda burkulma yükü yüksek olması istenen tercih edilebilecek en iyi kombinasyon ise yine KE'lı 5 nolu kombinasyon olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 236'da bir grup deney parçasının deney sonrası hasar durumu verilmiştir.

Tablo 28. Farklı kombinasyonlar için elde edilen burkulma kuvveti ve $F_{max}/ağırlık$ oranı değerleri

No	Kombinasyon	F_{max} (kN)	Ağırlık (kg)	$F_{max}/ağırlık$ (kN/kg)
1	T	1,09	0,064	17,08
2	T+K (dolu)	1,61	0,15	10,97
3	CE+T	2,18	0,12	18,03
4	CE+T+K (dolu)	2,55	0,21	12,04
5	KE+T	2,73	0,11	24,58
6	KE+T+K (dolu)	3,49	0,20	17,83

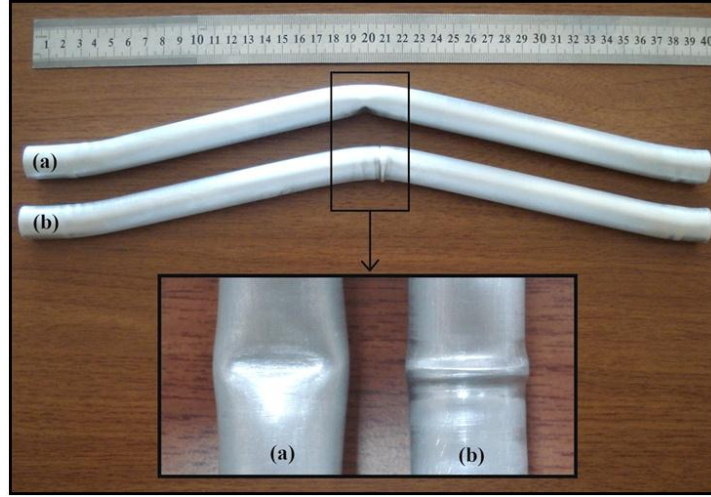


Şekil 236. Burkulma deneyine tabi tutulmuş bir grup deney parçası.

Dıştan elyaf takviye edilen parçalarda bükülme noktası elyafın parça boyunca karşılaşılan en zayıf yerden, yine beklenen aralık içerisinde kalacak şekilde bir miktar yer değiştirebilmektedir. Bükülme yönü için bir öngörüle bulunmak mümkün değildir.

Takviyesiz parçanın burkulma davranışında aşağıda verilen detay resimlerden görüleceği üzere burkulmanın yönünün aksi tarafında, burkulma bölgesinde cidarın içeriye katranlanmasıyla bükülmenin başladığı ve ilerlediği anlaşılmaktadır (Şekil 237). İçeriden takviye edilmiş parçalarda cidarın iç kısma doğru yer değiştirmesinin engellenmiş olması ve

ayrıca içerideki polimerik malzemenin varlığı ile burkulma yükü artmıştır. Bu parçalarda cidarı tam tersine, dışarı katlandığı görülmektedir (Şekil 237'de üstteki parça). Hesaplamalarda burkulmanın yükünü doğrudan etkileyen en önemli büyüklük kesitin eğilme rijitliği olduğu dikkate alınırsa yapılan takviye ile burkulma yükünün artması deney sonuçlarının kendi içinde tutarlılığını işaret etmektedir. Numune bağlantısı için tasarlanıp üretilen bağlantı aparatları Şekil 238'de görülmektedir.



Şekil 237. Burkulma davranışı, (a) Takviyesiz yapı, (b) İçeriden takviyeli yapı.



Şekil 238. Bağlantı aparatları: (a) Boş numuneler için, (b) Dolu numuneler için.

5.5. Kompozit Kirişlerin Üç Nokta Eğme Şartları İçin Doğal Frekans Değerleri

Üç nokta eğme testlerinde kullanılan numunelerin ağırlıkları ve deneylerdeki rijitlik verileri (kuvvet/deplasman) kullanılarak doğal frekanslar hesaplanmıştır. Polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş $\varnothing 31$ kompozit kirişlerin doğal frekans değerleri Tablo 29'da; içten ve dıştan takviye edilmiş $\varnothing 31$ kompozit kirişlerin doğal frekans değerleri Tablo 30'da; diğer takviye unsurlarıyla beraber PB de içeren $\varnothing 30$ kompozit kirişlerin doğal frekans değerleri Tablo 31'de; 19, 24 ve 40 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için

belirlenen doğal frekans değerleri Tablo 32'de; ve kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri ise Tablo 33'de listelenmiştir.

Dıştan takviyeli yapı için hesaplanan frekans değerleri incelendiğinde 400 Hz ile 513 Hz arasında değiştiği, iki katmanlı ve [0/90] derece dokunmuş yapının 332,9 Hz ile en küçük değerini aldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu grup kompozit yapının dışında titreşim frekanslarında önemli bir değişikliğin söz konusu olmadığı anlaşılmıştır. PB ve diğer polimerik malzemelerin kullanıldığı kompozit yapıda ise benzer şekilde frekans değerlerinin çok fazla değişmediği ancak T+PB(2)+P(2)+PP(10,5-dolu) kompozit için (286 Hz) dikkat çekmektedir. Takviyesiz yapının 410 Hz olduğu göz önüne alındığında söz konusu kombinasyon için bir risk oluşturabileceği söz konusudur. Sadece polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş kompozit yapılara ait frekans değerlerinde önemli bir değişikliğin bulunmadığı, (367 ile 543 Hz) arasında değiştiği ve en küçük frekansın T+P(4)+PP(10,5-dolu) yapı için elde edildiği görülmektedir.

Tablo 29. Polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş, 31 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Kombinasyon*	Ağırlık (g)	Rijitlik (N/mm)	Frekans (Hz)
1	Tüp	69	458	410,0
2	T+K(4)	163	1070	407,6
3	T+P(4)	161	1078	411,7
4	T+K(4)+PP(3,5)	206	1458	423,3
5	T+P(4)+PP(3,5)	205	1113	370,7
6	T+K(4)+PP(6,5)	232	1844	448,5
7	T+P(4)+PP(6,5)	230	1295	377,5
8	T+K(4)+PP(10,5-dolu)	240	2096	470,2
9	T+P(4)+PP(10,5-dolu)	244	1312	368,9

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, P: Polyamit, PP: Polipropilen. Parantez içindeki rakamlar mm cinsinden katman et kalınlığını göstermektedir.

Tablo 30. Polimerik malzemelerle içten ve dıştan takviye edilmiş, 31 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Kombinasyon*		Ağırlık (g)	Rijitlik (N/mm)	Frekans (Hz)
1	-	T	69	458,0	410,0
2	CE	T	210	1578,0	436,3
3	CE	T+K(4)	270	1844,0	415,9
4	CE	T+K(4)+PP(3,5)	320	1521,6	347,0
5	CE	T+K(4)+PP(6,5)	350	1276,0	303,9
6	CE	T+K(4)+PP(10,5-dolu)	360	1340,6	355,4
7	KE	T	170	2269,0	581,4
8	KE	T+K(4)	280	2032,0	428,8
9	KE	T+K(4)+PP(3,5)	340	1472,8	331,2
10	KE	T+K(4)+PP(6,5)	360	3224,0	476,3
11	KE	T+K(4)+PP(10,5-dolu)	370	1328,0	301,5

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen, CE: CE :[0₂/90₃], KE: Karbon elyaf :[0₂/90₃]. Parantez içindeki rakamlar mm cinsinden katman et kalınlığını göstermektedir.

Tablo 31. PB takviyeli 30 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekans değerleri.

No	Kombinasyon*		Ağırlık (gr)	Rijitlik (N/mm)	Frekans (Hz)
1	-	T	61	443	428,8
2	-	T+PB(3)	170	980	382,0
3	-	T+PB(3)+P(2)	202	962	347,2
4	-	T+PB(3)+P(2)+PP(3)	233	1022	333,2
5	-	T+PB(3)+P(2)+PP(6)	255	834	287,7
6	-	T+PB(3)+P(2)+PP(9-dolu)	262	1157	334,3
7	-	T+PB(3)+P(8)	274	1176	329,6
8	-	T+PB(3)+P(11-dolu)	280	756	261,4
9	-	T+PB(3)+K(2)	201	564	266,5
10	-	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	235	1040	334,7
11	-	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	256	978	311,0
12	-	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	262	1124	329,5
13	-	T+PB(3)+K(8)	275	1138	323,6
14	-	T+PB(3)+K(11-dolu)	282	592	230,5
15	CE	T	172	758	334,0
16	CE	T+PB(3)	281	1480	365,1
17	CE	T+PB(3)+K(2)	313	1302	324,5
18	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	348	1172	292,0
19	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	360	1064	273,5
20	CE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	364	842	242,0
21	CE	T+PB(3)+K(8)	382	1050	263,8
22	CE	T+PB(3)+K(11-dolu)	387	1818	344,8
23	KE	T	182	1322	428,8
24	KE	T+PB(3)	273	1642	390,2
25	KE	T+PB(3)+K(2)	321	1198	307,4
26	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(3)	352	1462	324,2
27	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(6)	355	900	253,3
28	KE	T+PB(3)+K(2)+PP(9-dolu)	365	1256	295,1
29	KE	T+PB(3)+K(8)	392	1060	261,6
30	KE	T+PB(3)+K(11-dolu)	398	1156	271,1

*T: Alüminyum tüp kiriş, PB: Pultrüzyon boru, P: Polyamid, K: Kestamit, PP: Polipropilen, CE: Cam elyaf [0₂/90₃], KE: Karbon elyaf [0₂/90₃]. Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir.

Tablo 32. 19, 24 ve 40 mm çaplı kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekanslar.

No	Çap (mm)	Kombinasyon*	Ağırlık (g)	Rijitlik (N/mm)	Frekans (Hz)
1	19	T	28	352	413,9
2		T+K	74	640	327,5
3		CE+T	52	520	307,7
4		CE+T+K	100	690	273,2
5		KE+T	48	654	340,2
6		KE+T+K	96	626	254,3
7	24	T	52	304	384,7
8		T+K	151	574	310,2
9		CE+T	139	567	321,3
10		CE+T+K	234	470	225,5
11		KE+T	143	618	330,7
12		KE+T+K	245	886	302,6
13	40	T	106	274	255,8
14		T+K	378	646	208,0
15		T+K+PP	450	832	216,3
16		CE+T	266	360	185,1
17		CE+T+K	507	610	174,5
18		CE+T+K+PP	585	420	134,8
19		KE+T	275	398	191,4
20		KE+T+K	528	534	160,0
21		KE+T+K+PP	605	520	147,5

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, P: Polyamit, PP: Polipropilen, CE: Cam elyaf [0₂/90₃], KE: Karbon elyaf [0₂/90₃]. Parantez içi rakamlar mm cinsinden katman kalınlığını göstermektedir.

Tablo 33. Kare kesitli kompozit kirişlerin üç nokta eğme deney şartları için belirlenen doğal frekanslar.

No	Kombinasyon*		Ağırlık (g)	Rijitlik (N/mm)	Frekans (Hz)
1	-	T	200	4910	788,3
2	-	T+K(70)	300	5220	663,7
3	-	T+K(140)	408	5038	559,1
4	-	T+K(210)	517	5128	501,1
5	CE(2)	T	269	4532	653,0
6	CE(4)	T	316	3692	543,8
7	CE(6)	T	367	4414	551,8
8	CE(2)	T+K(70)	358	5364	615,8
9	CE(2)	T+K(140)	460	5206	535,2
10	CE(2)	T+K(210)	570	5794	507,2
11	CE(4)	T+K(70)	420	2800	410,8
12	CE(4)	T+K(140)	516	4298	459,2
13	CE(4)	T+K(210)	627	3746	388,9
14	CE(6)	T+K(70)	470	4980	517,9
15	CE(6)	T+K(140)	589	3980	413,6
16	CE(6)	T+K(210)	690	4310	397,6

*T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, CE: Cam elyaf. Parantez içi rakamlar elyaf malzemeler için katman sayısını, kestamit için mm cinsinden boyu göstermektedir.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu proje kapsamında ince cidarlı tüp kirişin içten ve dıştan takviye edilerek YTK ve EAK geliştirilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Üç Nokta Eğme deneyleri

Farklı polimerik malzemelerin ve pultrüzyon borunun kullanıldığı içten takviye işlemiyle, takviyesiz duruma göre F_{maks} değerindeki artış oranı 8,3 kattır. Elde edilen en yüksek ÖYTK değeri bu grupta 51,9 N/gr'dır. Enerji absorbe davranışı açısından en iyi değeri içten tamamen takviye edilen parçalarda 6,3 katı aşan bir iyileşme görülmüş ve ÖEAK değeri 1J/gr mertebelerindedir (takviyesiz yapıda ÖEAK: 0,74 J/gr).

İçten yapılan takviyede kullanılan malzemelerin polimer esaslı olması yani, önemli bir eğilme rijitliğine sahip olmamasına rağmen, genel olarak kompozit yapının eğme yükünü önemli oranda iyileştirmesi, eğme zorlanması altında mandrelin temas ettiği kesitte, üst cidarda başlayan lokal deformasyonun (burkulma) engellemesidir.

Tüp yapının içten polimerik malzemenin dışında kanatlı geometriye sahip bir diğer alüminyum yapı ve bunun merkez kısmından polimer malzemelerle desteklenmesi durumunda, yük taşıma kapasitesinde elde edilen kazanç çok sınırlı kalmıştır. Ayrıca bu kombinasyonu oluşturmak için uygun profil geometrisi ve çapının tedarik edilmesindeki zorluklar da dikkate alındığında, bu yöntemin uygun olmadığı anlaşılmıştır.

YTK açısından uygun elyaf yönlenmesi ve katman sayısının belirlenmesine yönelik çalışmalardan, katman sayısının artmasıyla F_{maks} değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Parça çapı dikkate alınarak, katman sayısı abartılmadan alınabilecek en uygun katman sayısı 5 olarak seçilmiş ve en uygun elyaf yönlenmesinin $[0_2/90_3]$, olduğu tespit edilmiştir. Elyaf-epoksi yapısında $[0]$ yönünde, yani parça eksenine paralel olarak konumlanmış elyafın eğme yükünü daha fazla taşıması, mekanik bilgilerine paralel olarak gözlenmiş olmakla birlikte, $[90]$ yönündeki elyafın zorlanma altında yapısal bütünlüğü sağlaması ve koruması açısından kompozitin dış yüzeyinde yer almasının uygun olduğu anlaşılmıştır.

İçten ve dıştan yapılan takviyede, CE'in elyafın kullanılması durumunda; F_{maks} değerindeki artış oranı 12,9 kattır. Buna göre ÖYTK değeri bu grupta 58,6 N/gr'a ulaşmıştır. Absorbe edilen enerji açısından artış oranı 8,47 olmasına karşın ÖEAK 0,97 J/gr olarak sınırlı kalmıştır.

İçten ve dıştan yapılan takviyede, KE'in kullanılması durumunda; F_{maks} değerindeki artış oranı 15,6 kata ulaşmıştır. ÖYTK değeri bu grupta kabaca 70 N/gr değerine yükselmiştir. Bu kombinasyonda absorbe edilen enerjideki artış oranı 9,7 olup, ÖEAK 1,1 J/gr olarak hesaplanmıştır. Maksimum enerji absorbe etme davranışı için içten yapılan takviyede polimerik malzeme olarak sadece K'in kullanıldığı numune değil, beraberinde PP'nin de kullanıldığı, ancak oransal olarak K'in sınırlı düzeyde tutulduğu kombinasyon en iyi değeri (11 kat artış, ÖEAK:1,34 J/gr) vermiştir. Bu, iç takviyenin aşırı rijit olmaması dolayısıyla, metal gövdenin yırtılmaya olan eğiliminin azalmasıyla açıklanabilir.

İçeriden takviyede K ve PVC köpüğün kullanıldığı kombinasyonda, genel olarak bükülme deplasman değerinin arttığı ancak elde edilen artışın sınırlı kaldığı gözlenmiştir.

Kare kesitli tüp yapının içten ve dıştan takviyeler edilmesi sonucu F_{maks} değeri 4,8 kat artış göstermiştir. Enerji absorbe etme kabiliyeti açısından elde edilen en yüksek iyileşme ise 4 kattır. Bu geometride özgül yük taşıma kapasitesi açısından, en yüksek iyileşme değeri 1,6 kat olarak belirlenmiştir. Yapılan deney ve simülasyon çalışmalarından, kare kesitli tüp yapının zorlanma altında, köşelerin cidar yırtılmasına teşvik etmesi nedeniyle, yük taşıma kabiliyeti sınırlı kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Dolayısıyla takviyenin, yapının kritik

bölgesinde, üst cidardaki lokal deformasyonu engellemesinin yanında, köşelerin yırtılmaya olan eğilimini geciktirmesi ana iyileşme nedenlerini oluşturmaktadır. Bu konuda yük taşıtılacak yapılar için köşeleri belirli oranda yuvarlatılmış kare kesitli parçaların tercih edilmesi çok daha uygun olacaktır.

Ön gerilme

Uygulanan ön gerilmenin tüp kirişin yük taşıma kabiliyetine katkısı önemsiz olup, bükülme deplasmanını düşürmüştür. İçten kısmi takviye uygulanma şartıyla uygulanan ön gerilme, yapının elastik bölgede rijitliğini arttırmış, yük taşıma kapasitesinde (F_{maks}) bir miktar iyileşme sağlamıştır. ÖYTK açısından bir iyileşme sağlanmamış, tersine % 75 oranında düşüş görülmüştür. Yapılan çok sayıda deneyler ve elde edilen sonuçlardan, ön gerilmenin uygulanması için kullanılan ek ağırlığa eşdeğer polimerik bir parçanın kısmi olarak tüp yapıya içten yerleştirilmesi durumunda sağlanan iyileşme, ön gerilmeli duruma göre son derece tercih edilebilir olduğu anlaşılmıştır. Bu itibarla ön gerilme uygulamasının, içten K bilezik kullanılma şartıyla elastik bölgede rijitliği arttırdığını, ancak bu yöntemin masraflı olmasının yanı sıra uygulama pratiğindeki zorluk dikkate alındığında çok fazla tercih edilebilir olmadığı anlaşılmıştır.

Burkulma

Narinlik derecesi yüksek uzun ve ince kiriş uygulamaları için, 19 m çaplı parçalar üzerinde yapılan çalışmalardan, dıştan KE, içten K malzemenin kullanıldığı kompozit kiriş için burkulma yükünün 1,09 KN değerinden, 3,2 kat artarak 3,49 kN'a yükseldiği belirlenmiştir. Özgül burkulma kuvveti 24,6 kN/kg ile dışarıda KE'in kullanıldığı durumda elde edilmiştir. Genel burkulma durumunda hasarın, kritik kesitteki lokal deformasyonun içeriye doğru yönelmesiyle başladığı tespit edilmiştir. İçerden yapılan takviye, lokal burkulma cidarını radyal yönde (dışarıya) yönlendirmesi, dıştan yapılan elyaf takviyesi ile de bu hareketin geciktirilmiş olması önemli katkı sağlamıştır. Sağlanan iyileşme temelinde, eğme zorlanması altındaki kirişlerde olduğu gibi, hasar mekanizmasının engellenmesi veya geciktirilmesi yatmaktadır.

Doğal frekansın tespiti

Üç nokta eğme şartları yani, iki ucu serbest kiriş yapısı için hesaplanan frekans değerlerinden; titreşim frekansı değerinin sadece elyaf ile takviye edilmesi durumunda arttığı görülmüş, içerden yapılan takviyedeki ilave malzemelerin yapıda oluşturduğu ilave ağırlık ile rijitlikte sağladığı değişime bağlı olarak frekans değerinin azalabildiği görülmüştür. Bu bağlamda ağırlığın minimum seviyede değiştirilerek, rijitliğin belirgin bir şekilde arttırıldığı KE'li kompozitlerin, CE'lılara göre rezonansa girme riski açısından tercih edilebilir olduğu görülmüştür.

Darbe deneyleri

İçten ve dıştan takviye edilmiş numunelerde, darbe enerjini absorbe etme açısından en iyi sonucu CE'in kullanıldığı numuneler göstermiştir. Buna göre, takviyesiz yapıya göre harcanan darbe enerjisi değeri 7,6 kat (115,2 J'dan 872,2) artmıştır. Darbe deneylerinde içten ve dıştan (CE) takviye edilmiş yapıda darbe anındaki deformasyon enerjisi 115,2 J'dan 872,2J'a arttırmıştır. Kullanılan kompozit yapı kombinasyonu ve elde edilen sonuç statik sonuçlarıyla büyük ölçüde paralellik sağlamaktadır. CE yerine karbonun kullanıldığı parçalarda, içten yapının tamamen takviye edilmesi yerine bir miktar boşluğun bırakılması, çarpma sırasında numune kesitinin tamamen kırılmasının önüne geçerek darbe enerjisinin

belirgin bir şekilde yükselmesini sağlamıştır. Bu davranışın KE'lı epoksi yapının,camlı duruma göre nispeten daha az sünek davranış göstermesiyle açıklanmıştır. Boşluklu yani, içten takviyenin tam dolu olarak yapılmadığı kompozitlerde çapmanın etkisiyle çatlak oluşumu daha az gerçekleşmekte, kesitte tamamen ayrılma oluşmamaktadır. Böylece daha yüksek enerjiler altında, kırılma yerine deformasyon oluşumu sağlanmış olmaktadır.

Sonlu eleman simülasyonu

Üç nokta eğme zorlanması için yapılan analizlerden genel olarak yük-deplasman eğrileri başarıyla (ihmal edilebilir sapma ile) elde edildiği görülmüştür. Burkulma deplasmanının yani yükün en büyük değerini aldığı notanın detaylı incelemelerinden; tüp yapının üstünde mandrelin temas alanında oluşan lokal deformasyonla kirişin genel eğilme deformasyonun başladığı ve ilerleyen deplasmanla tüp yapının alt cidarında akmanın yaygınlaşmasıyla yani cidarın önemli ölçüde akmasıyla eğrinin en büyük değerden düşme eğilimine girdiği anlaşılmıştır. Bu konu sonlu eleman analizi ağırlıklı ilk makalede (Thin-Walled Structure dergisinde) yayınlanmıştır. Farklı akma ve çekme dayanımı eğrisine sahip malzeme verileriyle yapılan simülasyonlardan, artan dayanımla yukarıda yapılan irdelemeyi destekler nitelikte eğme yükünün arttığı belirlenmiştir. Aynı akma dayanımda, ancak çekme dayanımları farklı malzeme verileriyle yapılan analizlerde de bükülme yükünün arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bükülme deplasmanının tüp yapının çapıyla ilişkili olduğu, ancak D/t oranıyla aralarında bir ilişkinin bulunmadığı anlaşılmıştır.

Parçanın alt yarı bölgesinden aksenal yönde uygulanan basma gerilmesinin, parçanın bu bölgesinde etkin çekme gerilmesinin değerini azalttığı, ancak üst cidardaki lokal deformasyondan dolayı parçanın formunu koruyamaması nedeniyle, katkı yapması beklenen ön yüklemenin bükülme deformasyonunu hızlandırdığı analizlerle de desteklenmiştir.

Kare kesitli tüp yapı için analizlerden, deneylerdeki çatlak oluşumunun, köşelerdeki deformasyon yoğunlaşmasından kaynaklandığı yapılan detaylı çalışmalarla belirlenmiştir.

İçeriden ve dıştan takviyeli kompozitlerin simülasyon sonuçlarından elde edilen yük-deplasman eğrilerinden, analizin elastik bölgede büyük ölçüde başarılı olduğu, elasto-plastik bölgede ise kabul edilebilir sapmalarla başarılı olduğu görülmüştür. Özellikle dışarıdaki elyaf takviyeli epoksi bölgesi için uygulanan hasar kriterinin (Tsai-Wu), deney eğrisi ile simülasyon eğrilerinin yorumlanmasına önemli katkı sağladığı görülmüştür.

Darbe simülasyon sonuçlarından; tüp yapının orta noktasındaki deformasyonu engelleyici yönde, kırılma oluşturmaksızın yapılacak olan takviyelerin numunelerin absorbe edeceği enerji değerini arttıracığı anlaşılmıştır. Deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, analiz yardımıyla kompozit numunelerin enerji değerlerinin başarıyla tespit edilebildiği, ancak tamamen ayrılmayla oluşan kırılmalara ait darbe enerjisi verilerinde sapmanın göz ardı edilemeyecek kadar büyük olduğu da görülmüştür.

Doğal frekansın tespiti

İki uçtan sabitlenmiş yapıların simülasyon sonuçlarından, frekans değerinin cidar kalınlığı ve parça boyutuyla doğrudan ilişkili olduğu görülmüş; uzun parçalarda cidar kalınlığının etkisini yitirdiği ancak parça boyunun her durum için önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Yapılan takviyenin genel olarak kompozitin doğal frekans değerini düşürdüğü dolayısıyla rezonans açısından bunun riskli olduğu, ancak üretilecek kompozitin özellikle titreşime açık bir uygulamada kullanılması durumunda KE'la takviye edilmesi gerekliliği açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Projenin hedefi ve gelinen nokta

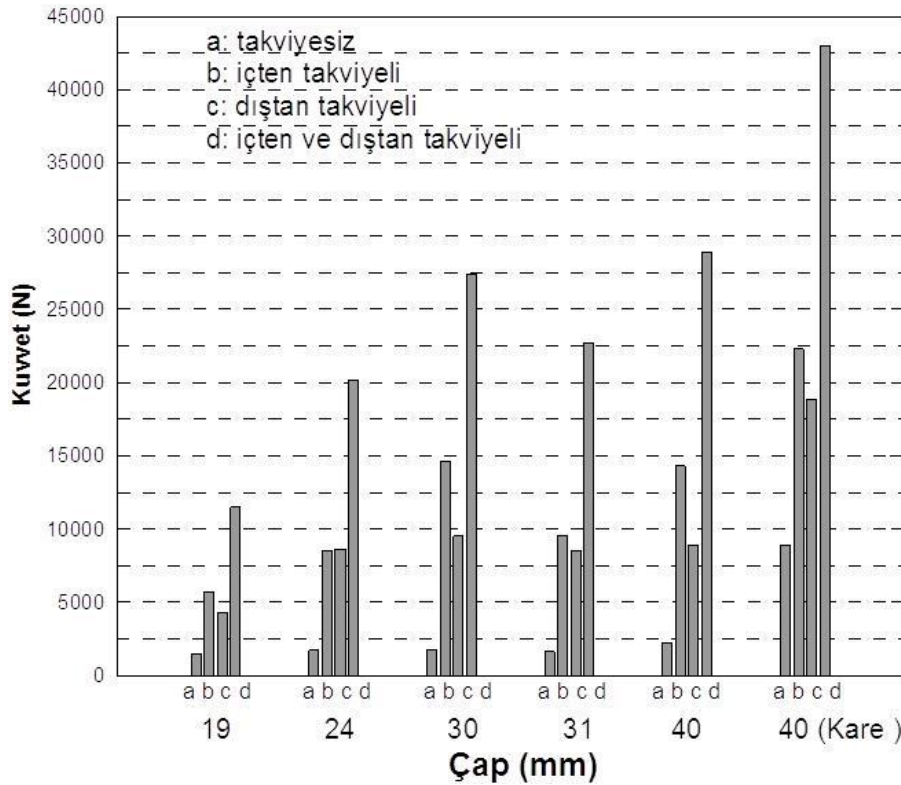
Üretim detayları deneysel kısımda verilen dıştan takviyeli kompozit parçalar, el yatırma yöntemiyle, tek yönlü elyaf ve dokuma elyafın epoksi reçine ile ıslatılmasıyla üretilmiştir. İçten yapılan takviyede ise hazırlanan polimerik esaslı malzemeler tüp yapı içerisine yapıştırılmıştır.

Üzerinde en yoğun çalışmanın gerçekleştirildiği 30 ve 31 mm çaplı tüp yapıda, takviyesiz duruma göre en büyük kuvvet değeri (F_{maks} oranı) sırasıyla yaklaşık olarak 16'dır. Enerji absorbe etme açısından ise elde edilen en büyük enerji oranları 10-11 mertebelerindedir.

Buna göre, hafif ve yüksek yük taşıma kapasiteli bir kompozit yapıya ait bileşenler: dıştan 5 katmanlı $[0_2/90_3]$ yönlenmesine sahip karbon elyafın kullanıldığı, içten 3 mm kalınlığında pultrüzyon boru ve 8 mm kalınlığında kestamitin kullanıldığı kombinasyon $[PB(3)+K(8)]$ tavsiye edilebilir.

Diğer taraftan, hafif ve yüksek enerji absorbe etme kapasiteli bir kompozit yapıya ait bileşenler: dıştan 5 katmanlı $[0_2/90_3]$, yönlenmesine sahip karbon elyafın kullanıldığı, içten 3 mm kalınlığında pultrüzyon boru, 2 mm kalınlığında kestamit ve 6 veya 9 mm kalınlığında polipropilenin kullanıldığı kombinasyon $[PB(3)+K(2)+PP(6 \text{ veya } 9 \text{ mm})]$ tavsiye etmek mümkündür.

19,24,30,31 ve 40 mm olmak üzere beş çap için içten ve dıştan yapılan takviyenin yük taşıma kabiliyeti açısından proje baş vuru dosyasında belirtilen hedefler aşılmıştır. Kare kesitli yapının geometrisinden (köşe etkisi) kaynaklanan özel durum nedeniyle F_{maks} değerindeki artış oranı sınırlı kalmıştır. Şekil 239'da, yukarıda sözü edilen çaplar için üretilmiş olan kompozitlere ait en yüksek eğme kuvvetinin kombinasyona göre değişimi verilmiştir.



Şekil 239. Proje kapsamında üzerinde çalışılan tüp yapıların çapları ve yapılan takviyeye bağlı olarak elde edilen eğme kuvvetleri. Grafikteki veriler, 19 mm çaplı karbon ve 40 mm kare kesitli parçalarda cam dokuma elyaf, diğerlerinde ise $[0_2/90_3]$ yönlenmesine sahip tek yönlü karbon elyaf için elde edilmiştir.

REFERANSLAR

- AKTAY L., TOKSOY A.K., GÜDEN M., Quasi-Static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis, *Materials and Design*, 27, 556–565, (2006).
- ARNOLD B., ALTENHOF W., Experimental Observations on the Crush Characteristics of 6061 T4 and T6 Structural Square Tubes with and without Circular Discontinuities, *International Journal of Crashworthiness*, 9:1, 73-87, (2004).
- BAMBACH M.R., JAMA H.H., ELCHALAKANI M., Axial Capacity and Design of Thin-Walled Steel SHS Strengthened with CFRP, *Thin-Walled Structures*, 47, 1112-1121, (2009).
- BAMBACH M.R., Axial Capacity and Crushing of Thin-Walled Metal, Fibre–Epoxy and Composite Metal–Fibre Tubes, *Thin-Walled Structures*, 48: 440-452, (2010).
- BLOM A.W., STICKLER P.B., GÜRDAL Z, Optimization of a Composite Cylinder Under Bending by Tailoring Stiffness Properties in Circumferential Direction, *Composites Part B: Engineering*, 41:2, 157-165, (2010).
- CHAKRABORTTY A., KHENNANE A., KAYALI O., MOROZOV E., Performance of Outside Filament-Wound Hybrid FRP-Concrete Beams, *Composites Part B: Engineering*, 42:4, 907-915, (2011).
- CHEN W., WIERZBICKI T., SANTOSA S., Bending Collapse of Thin-Walled Beams with Ultralight Filler: Numerical Simulation and Weight Optimization, *Acta Mechanica*, 153, 183-206, (2002).
- CHO Y.B., BAE C.H., SUH M.W., SIN H.C., Maximisation of Crash Energy Absorption by Crash Trigger for Vehicle Front Frame Using the Homogenisation Method, *Int. J. Vehicle Design*, 46:1, 23-50, (2008).
- ELCHALAKANI M, ZHAO X.L., GRZEBIETA R.H., Plastic Mechanism Analysis of Circular Tubes Under Pure Bending, *International Journal of Mechanical Sciences*, 44, 1117–1143, (2002).
- GÜDEN M., TOKSOY A.K., KAVI H., Experimental Investigation of Interaction Effects in Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes, *J Mater Sci.*, 41, 6417-6424, (2006).
- GÜDEN M., KAVIA H., Quasi-Static Axial Compression Behavior of Constraint Hexagonal and Square-Packed Empty and Aluminum Foam-Filled Aluminum Multi-Tubes, *Thin-Walled Structures*, 44, 739-750, (2006).
- HALL I.W., GUDEN M., CLAAR T.D., Transverse and Longitudinal Crushing of Aluminum-Foam Filled Tubes, *Scripta Materialia*, 46, 513-518, (2002).
- HANSEN A.G., HOPPERSTAD O.S., LANGSETH M., Bending of Square Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler, *Acta Mechanica*, 142, 13-31, (2000).
- HANSEN, A.G., HOPPERSTAD, O.S. LANGSETH, M., Design of Aluminium Foam-Filled Crash Boxes of Square and Circular Cross-Sections, *International Journal of Crashworthiness*, 6:2, 177-188, (2001).
- HATZIGEORGIU G.D., BESKOS D.E., Minimum Cost Design of Fibre-Reinforced Concrete-Filled Steel Tubular Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 167-182, (2005).
- HILDITCH T., ATWELL D., EASTON M., BARNETT M., Performance of Wrought Aluminium and Magnesium Alloy Tubes in Three-Point Bending, *Materials and Design*, 30, 2316–2322, (2009).

KHURRAM W.M., AHMER W.M., BASSOM A.P., AIGNER A.A., Longitudinally Inhomogeneous Deformation Patterns in Isotropic Tubes Under Pure Bending, *Proc. R. Soc. A*, 462, 817-838, (2006).

Kim H., Analysis of Crash Response of Aluminium Foam-Filled Front Side Rail of a Passenger Car, *International Journal of Crashworthiness*, 6:2,189-208, (2001).

KOTYNIA R., Bond Between FRP and Concrete in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted and Externally Bonded Reinforcement, *Construction and Building Materials*, In Press, 32: 41-54, (2011).

LIU Y-C., DAY M.L., Bending Collapse of Thin-Walled Beams with Channel Cross-Section, *International Journal of Crashworthiness*, 11:3, 251-262, (2006).

LIU Y., DAY M.L., Bending Collapse of Thin-Walled Circular Tubes and Computational Application, *Thin-Walled Structures*, 46, 442-450, (2008).

MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., IOANNIDIS M.B., KOSTAZOS P.K., Bending of Cylindrical Steel Tubes: Numerical Modelling, *International Journal of Crashworthiness*,11:1, 37-47, (2006).

MAMALIS A.G., SPENTZAS K.N., MANOLAKOS D.E., IOANNIDIS M.B., PAPAPOSTOLOU D.P., Experimental Investigation of the Collapse Modes and the Main Crushing Characteristics of Composite Sandwich Panels Subjected to Flexural Loading, *International Journal of Crashworthiness*, 13:4, 349-362, (2008).

Michael A., Hugh S., David C., *Materials Engineering, Science, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, (2007).

POONAYA S., TEEBOONMA U., THINVONGPITUK C., Plastic Collapse Analysis of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending, *Thin-Walled Structures*, 47, 637-645, (2009).

SALEHGHAFFARI S., RAIS-ROHANI M., NAJAFI A., Analysis and Optimization of Externally Stiffened Crush Tubes, *Thin-Walled Structures*, 49:3, 397-408, (2011).

SANTOSA S., WIERZBICKI T., Effect of an Ultralight Metal Filler on the Bending Collapse Behavior of Thin-Walled Prismatic Columns, *International Journal Of Mechanical Sciences*, 41, 995-1019, (1999).

SANTOSA S., BANHART J., WIERZBICKI T., Experimental and Numerical Analyses of Bending of Foam-Filled Sections, *Acta Mechanica*, 148, 199-213 (2001).

SEITZBERGER M., RAMMERSTORFER F.G., GRADINGER R., DEGISCHER H.P, BLAIMSCHEIN M., WALCH C., Experimental Studies on the Quasi-Static Axial Crushing of Steel Columns Filled with Aluminium Foam, *International Journal of Solids and Structures*, 37, 4125-4147, (2000).

SHADMEHRI F., DERISI B., HOA S.V., On Bending Stiffness of Composite Tubes, *Composite Structures*, 93: 2173-2179, (2011).

SHAHBEYK S., VAFAI A., ESTEKANCHI H.E., A Parametric Study of the Bending Crash Performance of Empty and Metal Foam-Filled Box-Beams, *International Journal of Crashworthiness*, 9:6, 643-652, (2004).

SINGACE A.A., Collapse Behaviour Of Plastic Tubes Filled with Wood Sawdust, *Thin-Walled Structures*, 37, 163-187, (2000)

WEIGANG C., Experimental and Numerical Study on Bending Collapse of Aluminum Foam Filled Profiles, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 7919-7944, (2001).

ZAKI M.K., Investigation of FRP Strengthened Circular Columns Under Biaxial Bending, *Engineering Structures*, 33:5, 1666-1679, (2011).

ZEINODDINI M., HARDING J.E., PARKE G.A.R., Axially Pre-Loaded Steel Tubes Subjected to Lateral Impacts: A Numerical Simulation, *International Journal of Impact Engineering*, 35,1267-1279, (2008).

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 110M054
Proje Başlığı: Metalik Tüp Kesitli Yüksek Mukavemetli Hafif Kompozit Kiriş Tasarımı, Analizi ve Üretimi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof.Dr. Kenan GENEL, Yrd.Doç.Dr. Akın Oğuz KAPTI, Yrd.Doç.Dr. İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Esentepe Kampüsü, 54187, Serdivan, Adapazarı.
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: -
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/11/2010-01/11/2012
Öz (en çok 70 kelime) Bu projede, ince cidarlı alüminyum tüpün ilave takviye malzemeleriyle içeriden ve dışarıdan desteklenmesi, tüpün atalet momentinin artırılması, hasar başlangıç mekanizmasının geciktirilmesi, ve bu çalışmaların sonucunda, yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyeti iyileştirilmiş yeni taşıyıcı kompozit kiriş tasarımları yapılmıştır. Proje çalışmalarında yurt içinden temin edilebilen malzemeler kullanılarak, ülkemizin kendi öz kaynaklarıyla üretilebilecek, beklentilere cevap verebilecek, her sektör tarafından rahatlıkla kullanılacak, yüksek dayanıma sahip, hafif ve ucuz bir kompozit kiriş geliştirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Kompozit tüp kiriş; elyaf takviye; eğme dayanımı; enerji absorbe etme kabiliyeti, darbeli zorlanma.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/>
Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
Projeden Yapılan Yayınlar: Yayınlar: SCI kapsamında taranan dergilerde ikisi kabul görmüş (biri yayınlanmış diğeri basım aşamasında), birisi incelemede olmak üzere toplam üç adet makale hazırlanmıştır. 1. O. Ayhan, K.Genel, S.Eksi, Simulation of nonlinear bending behavior and geometric sensitivitiy for tubular beams with fixed supports, Thin-WalledStructures 51: 1–9 (2012) 2. Secil Eksi, Akin O. Kapti, Kenan Genel, Buckling behavior of fiber reinforced plastic-metal hybrid-composite beam, Materials and Design (Kabul edildi-JMAD-D-12-02176R4). 3. K.Yılmazçoban, A.O.KaptiK.Genel, Finite element analysis of the tubular composite beams for the impact resistance, Thin-WalledStructures (incelemede)

Patentler:

Proje kapsamında iki patent başvurusu Ekim 2011, Nisan 2012 tarihlerinde yapılmıştır.

1. Proje kapsamında imal edilen 2970J'luk çarpma enerjisine sahip bir darbe test cihazı.
2. Proje kapsamında üretilen bir kompozit yapı kombinasyonu.

Tezler:

Proje kapsamında, birisi doktora diğeri yüksek lisans olmak üzere iki tez çalışması gerçekleştirilmiştir.

1. Dairesel kesitli kompozit kirişlerin eğme davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi.
2. Kare kesitli alüminyum alaşımı kirişlerde yük taşıma kabiliyeti ve ilave takviye malzemelerin etkisi.

Ekte Bulunan "ARDEB Başarı Öyküsü Formu", "Kazanımlar" Bölümünde Belirtilen Kriterlere Göre Proje Çıktılarınızın Başarı Öyküsü Niteliği Taşdığını Düşünüyorsanız "ARDEB Başarı Öyküsü Formu"nu doldurunuz.