

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAİRESEL KESİTLİ KOMPOZİT TÜP KİRİŞLERİN
EĞME VE BURKULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL
VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Seçil EKŞİ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kenan GENEL

Aralık 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DAİRESEL KESİTLİ KOMPOZİT TÜP KİRİŞLERİN
EĞME VE BURKULMA DAVRANIŞININ DENEYSEL
VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

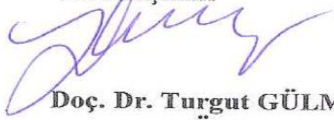
DOKTORA TEZİ

Seçil EKŞİ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 17 / 12 /2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Şafak YILMAZ
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
Üye



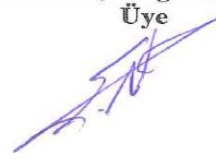
Prof. Dr. Ahmet OĞUR
Üye



Prof. Dr. Kenan GENEL
Üye



Yrd. Doç. Ergün NART
Üye



ÖNSÖZ

Bu çalışmada dairesel kesitli alüminyum tüp kirişin içten ve dıştan takviye edilmesi sonucunda geleneksel malzemelerden daha hafif, yük taşıma kabiliyeti ve enerji absorbe etme kabiliyeti daha yüksek ürünler elde edilmesi amaçlanmıştır.

Doktora süreci boyunca başta danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Kenan GENEL'e akademik çalışmalarında ve doktora tez sürecinde bana desteklerini esirgemediği için minnettarlığımı sunarım. Doktora tez izleme komitesinde bulunan hocalarım, Sayın Prof. Dr. Ahmet OĞUR'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Ergün NART'a, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Analiz safhalarında benden desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ali Osman AYHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam süresince bana verdiği sonsuz destekten dolayı hayat arkadaşım, sevgili eşim Mak. Müh. Osman EKŞİ'ye ve doktora çalışmalarım sırasında dünyaya gelen, en zor zamanlarımda bile yüzümü güldürebilen umut ışığım, canım oğlum Berker EKŞİ'ye en içten duygularıyla teşekkür ederim. Bana bu mesleği seçmemde büyük desteği olan ve benden manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili hocam Prof. Dr. Hüseyin CÖMERT'e minnetlerimi sunar ve çok teşekkür ederim. Son olarak bu günlere gelmemde büyük emeği olan ve her zaman yanımda olan anne, baba ve ağabeyime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 110M054)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür İncelemesi.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİT MALZEMELER ve MEKANİĞİ.....	6
2.1. Kompozit Malzemeler.....	6
2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	7
2.1.1.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.....	7
2.1.1.2. Yapısal kompozit malzemeler.....	8
2.1.1.3. Elyaf takviyeli kompozitler.....	10
2.1.2. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri.....	33
2.1.2.1. El yatırması yöntemi.....	33
2.1.2.2. Kapalı kalıplama teknikleri.....	38
2.1.3. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.....	46
2.1.4. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları.....	47
2.2. Kompozit Malzemelerin Mekaniği.....	49
2.2.1. Kompozit malzemelerin gerilme analizi.....	49
2.2.2. Kompozit malzemeler için hasar kriterleri.....	53

2.2.2.1. Maksimum gerilme teorisi.....	55
2.2.2.2. Maksimum şekil değiştirme teorisi.....	55
2.2.2.3. Tsai-Hill hasar teorisi.....	55
2.2.2.4. Hoffman hasar kriteri.....	56
2.2.2.5. Tsai-Wu hasar teorisi.....	57
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMANLAR METODU.....	58
3.1. Deformasyon Kinematığı.....	59
3.2. Elastik ve Plastik Analiz.....	60
3.2.1. Elastik analiz.....	60
3.2.2. Nonlineer analiz.....	60
BÖLÜM 4.	
TÜP KESİTLİ YAPILAR ve KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI.....	61
4.1. Tüp Kesitli Yapılar.....	61
4.1.1. Tüp kesitli yapıların eğme davranışı.....	62
4.1.2. Teorik inceleme: Tüp yapılarda yük taşıma kabiliyeti-hafiflik ilişkisi.....	63
4.2. Kompozit Kiriş Tasarımı.....	67
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONLU ELEMAN ANALİZLERİ	74
5.1. Deneysel Çalışmalar.....	76
5.1.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler.....	76
5.1.1.1. Alüminyum (6063-T5) boru.....	76
5.1.1.2. Elyaf malzemeler.....	76
5.1.1.3. Polimerik malzemeler.....	78
5.1.1.4. Yapıştırıcı ve epoksi reçineler.....	79
5.1.2. Deneysel numunelerinin hazırlanması.....	79
5.1.2.1. Alüminyum tüp kiriş ve polimerik malzemelere ait çekme deneyi numunelerinin hazırlanması.....	79
5.1.2.2. Elyaf malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyi	

numunelerinin hazırlanması.....	82
5.1.2.3. Eğme deneyi numunelerinin hazırlanması.....	88
5.1.2.4. Burkulma deney numunelerinin hazırlanması.....	93
5.1.3. Eğme deneyi düzeneği.....	93
5.1.4. Burkulma deneyi düzeneği.....	94
5.2. Sonlu Eleman Analizleri.....	95
5.2.1. Eleman tipi.....	95
5.2.2. Malzeme modelleri.....	97
5.2.3. Malzeme özellikleri, sınır şartlar ve yükleme koşulları.....	98
5.2.4. Sonlu eleman analiz modelleri.....	99
5.2.4.1. Alüminyum tüp kirişin üç nokta eğme modeli.....	100
5.2.4.2. Üç nokta eğmenin ve cidardaki lokal burkulma etkisinin incelendiği modeller.....	100
5.2.4.3. Tüp yapının eğme davranışına etki eden etmenlerin sonlu.... eleman analizleriyle incelenmesi.....	102
5.2.4.4. 31 mm çaplı tüp kirişe ait içten ve dıştan takviyeli numunelerin sonlu eleman analizler.....	102

BÖLÜM 6.

DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI.....	104
6.1. Deneysel Sonuçlar.....	104
6.1.1. Alüminyum tüp ve polimerik malzemelere ait çekme deneyi sonuçları.....	104
6.1.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyi sonuçları.....	109
6.1.3. Eğme deneyi sonuçları.....	116
6.1.3.1. Farklı mandrel çaplarıyla yapılan eğme deney sonuçları	116
6.1.3.2. Farklı çap ve cidar kalınlıklarındaki tüplerin eğme deney sonuçları.....	117
6.1.3.3. Tüp yapının üç nokta eğme deneyinde eğilme ve cidardaki lokal burkulmanın etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan deneylerin sonuçları.....	120
6.1.3.4. Takviyesiz tüp kirişe ait eğme deney sonuçları.....	121

6.1.3.5. Çapı 31 mm olan alüminyum tüpe içten ve dıştan yapılan takviye ile oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları.....	123
6.1.3.6. 30 mm çaplı alüminyum tüpün farklı elyaflar kullanılarak oluşturulan hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları.....	140
6.1.3.7. Burkulma deney sonuçları.....	155
6.2. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları.....	166
6.2.1. Takviyesiz tüp kirişin sonlu eleman analiz sonuçları.....	166
6.2.2. Üç nokta eğme deneyinde tüpteki eğilme ve lokal deformasyon etkisinin sonlu elemanlar analizleriyle araştırılması.....	175
6.2.3. Tüp yapının bükülme davranışına etki eden etmenlerin sonlu eleman analiz sonuçları.....	179
6.2.3.1. Cidar kalınlığının etkisi.....	178
6.2.3.2. Tüp çapının etkisi.....	179
6.2.3.3. Mandrel çapının etkisi.....	180
6.2.3.4. Malzeme özelliklerinin etkisi.....	181
6.2.4. 31 mm çaplı tüp kirişe ait içten takviyeli numunelerin sonlu eleman analiz sonuçları.....	186
6.2.5. 31 mm çaplı tüp kirişe ait dıştan ve içten takviyeli numunelerin sonlu eleman analiz sonuçları.....	195
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	202
7.1. Genel Sonuçlar.....	202
7.2. Öneriler.....	204
KAYNAKLAR.....	205
ÖZGEÇMİŞ.....	211

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AE	: Aramid elyaf takviyeli kompozit
CE	: Cam elyaf takviyeli kompozit
E	: Elastisite modülü
EAK	: Enerji absorbe etme kabiliyeti
G	: Kayma modülü
KE	: Karbon elyaf takviyeli kompozit
ÖYTK	: Özgül yük taşıma kabiliyeti
ÖEAK	: Özgül enerji absorbe etme kabiliyeti
YTK	: Yük taşıma kabiliyeti
σ	: Normal gerilme
τ	: Kayma gerilmesi
ε	: Birim şekil değişimi
ν	: Poison oranı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Bir tabakalı kompozitte arka arkaya yönlenmiş elyaf takviyeli tabakaların istiflenmesi.....	9
Şekil 2.2.	Bir sandviç panelin kesitine ait şematik gösterim.....	10
Şekil 2.3.	Cam elyaf çeşitleri a) Kırpılmış elyaf b) Fitol elyaf c) Dokuma elyaf d) Çok eksenli elyaf.....	21
Şekil 2.4.	Karbon elyaf çeşitleri a) Dokuma elyaf b) Fitol elyaf c) Kırpıntı elyaf.....	23
Şekil 2.5.	Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi, (a) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlenmiş, (b) süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlenmiş, (c) süreksiz ve rastgele yönlenmiş...	26
Şekil 2.6.	(a) Gevrek elyaf ve sünek matrise ait gerilme- birim şekil değişimi eğrilerinin şematik gösterimi. Her iki bileşen için de kırılma gerilmesi ve birim şekil değişimi değerleri belirtilmiştir. (b) yükün elyafın yönlendiği doğrultuda uygulandığı boylamasına durum için şematik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, (a) 'da verilen elyafa ve matrise ait eğriler de şekil üzerinde gösterilmiştir.....	27
Şekil 2.7.	El Yatırması prosesi aşamaları.....	34
Şekil 2.8.	Püskürtme yöntemi.....	36
Şekil 2.9.	Elyaf sarım prosesi düzeneği.....	37
Şekil 2.10.	Profil Çekme Yöntemi Düzeneği.....	39
Şekil 2.11.	RTM Yöntemi.....	41
Şekil 2.12.	SMC hazır kalıplama bileşeni ile baskı kalıplama.....	42
Şekil 2.13.	Enjeksiyon Kalıplama Basamakları.....	43
Şekil 2.14.	Santifrüj Kalıplama Düzeneği.....	44
Şekil 2.15.	Vakum torba kalıplama düzeneği.....	45
Şekil 2.16.	Basınç torba kalıplama.....	46

Şekil 2.17.	Eksen takımları.....	53
Şekil 4.1.	(a) otomobil ön şasi (kapalı, yarı açık kutu kiriş) (b) otomobil kapıiçi koruyucu çubuklar (silindirik veya profil) (c) traktör emniyet çemberi (kutu kiriş).....	61
Şekil 4.2.	Tipik bir tüp kirişin eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisinin şematik gösterimi.....	62
Şekil 4.3.	Çapı 30 mm olan tüp kirişin atalet momenti değerinin (D/t) oranı ile değişimi.....	64
Şekil 4.4.	Çelik ve alüminyum malzemede D=30 mm için (I/m) - (D/t) değişim grafiği.....	65
Şekil 4.5.	Alüminyum malzemede farklı çaplar için (I/m) - (D/t) değişim grafiği.....	66
Şekil 4.6.	Dış çapı 31 mm olan farklı cidar kalınlıklarına sahip alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin ve rijitliğin atalet momenti /ağırlık oranına göre değişimi.....	67
Şekil 4.7.	Dairesel kesitli malzemelerden oluşmuş bir kompozit çubuk	68
Şekil 4.8.	İçten takviyeli tüp kirişin şematik gösterimi.....	70
Şekil 4.9.	Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen.....	71
Şekil 4.10.	Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, P: Polyamid, PP: Polipropilen.....	71
Şekil 4.11.	Farklı eğme momenti değerlerinde (50, 75, 100 ve 150 N.m) T+K+PP(dolu) kombinasyonu için malzemeler üzerinde oluşan gerilmelerin eğme momentine göre değişimi.....	72
Şekil 4.12.	Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum kirişin rijitliğinin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen.....	73

Şekil 4.13	Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş $D=31\text{mm}$ $t=1\text{mm}$ olan alüminyum tüp kirişin rijitliğinin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, P: Polyamid, PP: Polipropilen.....	73
Şekil 5.1.	Alüminyum tüp kirişlerden alınan kuponlar üzerinden Webster sertlik ölçme el aleti.....	76
Şekil 5.2.	300 g/m^2 yoğunluğa sahip 0° (ve 90° sarıma bağlı) tek eksenli cam elyaf.....	77
Şekil 5.3.	350 g/m^2 0° (ve 90° sarıma bağlı) tek eksenli karbon elyaf.....	77
Şekil 5.4.	280 g/m^2 -twill cam elyaf kumaş.....	77
Şekil 5.5.	170 g/m^2 -twill aramid elyaf kumaş.....	78
Şekil 5.6.	200 g/m^2 -plain karbon elyaf kumaş.....	78
Şekil 5.7.	Çapı 19 mm ($t=1\text{ mm}$) olan alüminyum tüp kiriş için hazırlanan tapalar.....	79
Şekil 5.8.	Tüp kiriş çekme numunesine tapaların yerleştirilmesi.....	80
Şekil 5.9.	19 mm çaplı borunun çekme deneyi için hazırlanan çeneleri.....	80
Şekil 5.10.	Çenelerin boru çekme numunesine yerleştiriliş biçimi (tapasız).	80
Şekil 5.11.	Çekme deneylerinin yapıldığı Instron marka cihaz (boru numunenin çekme deneyine ait görüntü).....	81
Şekil 5.12.	Çapı 31 mm olan alüminyum borudan çıkartılan çekme numunesi.....	81
Şekil 5.13.	Çekme çenesi (a) ve numunenin yerleştiriliş şekli (b).....	82
Şekil 5.14.	Polimerik malzemelerden (kestamit, polyamit ve polipropilen) işlenmiş silindirik çekme numuneleri.....	82
Şekil 5.15.	Deney numunelerinin elle yatırma yöntemiyle düz zemin üzerinde hazırlanışı.....	83
Şekil 5.16.	Cam dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en: 25 mm , boy: 250 mm , kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en: 25 mm , boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en: 25 mm , boy: 250 mm , kalınlık: 2.5 mm).....	85

Şekil 5.17.	Aramid dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm).....	85
Şekil 5.18.	Karbon dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm).....	86
Şekil 5.19.	Tek eksenli cam elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) boylamasına çekme numunesi (en:15 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), b) boylamasına basma numunesi (en: 10 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), d) enlemesine çekme numunesi (en:25 mm, boy: 175 mm, kalınlık: 2 mm), e) enlemesine basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm).....	86
Şekil 5.20.	Tek eksenli karbon elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) boylamasına çekme numunesi (en:15 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), b) boylamasına basma numunesi (en: 10 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), d) enlemesine çekme numunesi (en:25 mm, boy: 175 mm, kalınlık: 2 mm), e) enlemesine basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm).....	87
Şekil 5.21.	Cam elyaftan hazırlanan çekme numunesine çekme deneyinin uygulanışı.....	88
Şekil 5.22.	Tüp yapıda gerçekleştirilen deneyler a) mandrel destekli eğme, b) düzlem basma, c) mandrel desteksiz basit eğme.....	89
Şekil 5.23.	Tüp giriş yüzeyine elle yatırma yöntemiyle elyaf sarılması.....	90
Şekil 5.24.	Kürleme sonrası bir grup deney numunesinin görünümü.....	90
Şekil 5.25.	Çeşitli polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum tüpler.....	91
Şekil 5.26.	İçten (kestamit ve polipropilen) ve dıştan (cam ve karbon elyaf) takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum tüpler	92

Şekil 5.27.	Çapı 19 mm olan tüp kiriş ile oluşturulan içten ve dıştan takviyeli kompozit kirişler.....	92
Şekil 5.28.	Çapı 30 mm olan alüminyum tüpte dokuma şeklindeki karbon, aramid ve cam elyaf kullanılarak oluşturulan kompozit kiriş yapılara ait eğme deneyi numuneleri.....	93
Şekil 5.29.	Üç nokta eğme deneylerinde kullanılan cihaz.....	94
Şekil 5.30.	Burkulma deney düzeneği (tüp kirişin deneyine ait bir görüntü)	95
Şekil 5.31.	Solid 95 elemanı.....	96
Şekil 5.32.	Solid 46 elemanı.....	97
Şekil 5.33.	Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çeyrek simetri model (a) sınır şartları gösterilmiş model (b) elemanlara bölünmüş model	99
Şekil 5.34.	Alüminyum tüp kirişe ait sonlu eleman modeli.....	100
Şekil 5.35.	Tüp kiriş yapıdaki mandrel desteksiz basit eğme modeli (Eğme ve lokal burkulma oluşumu).....	101
Şekil 5.36.	Tüp kiriş yapıdaki düzlem basma modeli (Sadece lokal burkulma durumu).....	101
Şekil 5.37.	Tüp kiriş yapıdaki mandrel genişliğindeki düzlem üzerinde basma modeli (Sadece lokal burkulma durumu).....	101
Şekil 5.38.	Tüp kiriş yapıdaki mandrel destekli eğme modeli (Sadece eğme durumu).....	101
Şekil 5.39.	Çapı 31 mm olan tüp kirişe ait içten takviyeli kompozit kirişlerin modelleri a) T+K (t=4 mm) b) T+K (t=4 mm)+PP (t=3.5 mm) c) T+K (t=4 mm)+PP (t=6.5 mm) d) T+K (t=4 mm)+PP (dolu).....	102
Şekil 5.40.	Çapı 31 mm olan tüp kirişe ait içten takviyeli kompozit kirişlerin modelleri a) T+K (t=4 mm) b) T+K (t=4 mm)+PP (t=3.5 mm) c) T+K (t=4 mm)+PP (t=6.5 mm) d) T+K (t=4 mm)+PP (dolu).....	102
Şekil 6.1.	19 mm çaplı alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	104
Şekil 6.2.	Numunenin (19 mm çaplı tüp) çekme deneyi sonrası görüntüsü	105
Şekil 6.3.	31 mm çaplı alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	105

Şekil 6.4.	31 mm çaplı tüpten işlenen numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü.....	105
Şekil 6.5.	Çapı 30 mm olan alüminyum tüpe ait numunenin gerilme birim şekil değişimi eğrisi.....	106
Şekil 6.6.	Çapı 30 mm olan alüminyum tüpün çekme deneyi sonrası görüntüsü.....	106
Şekil 6.7.	Kestamid malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi...	107
Şekil 6.8	Polyamid malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi...	107
Şekil 6.9	Polipropilen malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi.....	108
Şekil 6.10	Polimerik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri.....	108
Şekil 6.11	Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	109
Şekil 6.12	Tek eksenli (boylamasına) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	109
Şekil 6.13.	Tek eksenli (enlemesine) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	110
Şekil 6.14.	Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	110
Şekil 6.15.	Tek eksenli (boylamasına) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	111
Şekil 6.16.	Tek eksenli (enlemesine) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	111
Şekil 6.17.	Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin (45° yönlenmiş) kayma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	112
Şekil 6.18.	Tek eksenli (45° yönlenmiş) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kayma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.....	112
Şekil 6.19.	Cam dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri.....	112

Şekil 6.20.	Karbon dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri.....	112
Şekil 6.21.	Aramid dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri.....	114
Şekil 6.22.	Tek eksenli (enlemesine ve boylamasına) cam elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a) boylamasına çekme deneyi, b) boylamasına basma deneyi, c) tek eksenli (45° yönlenmiş) kayma deneyi, d) enlemesine çekme deneyi, e) enlemesine basma deneyi.....	114
Şekil 6.23.	Tek eksenli (enlemesine ve boylamasına) karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a) boylamasına çekme deneyi, b) boylamasına basma deneyi, c) tek eksenli (45° yönlenmiş) kayma deneyi, d) enlemesine çekme deneyi, e) enlemesine basma deneyi.....	115
Şekil 6.24.	Çapı 31 mm cidar kalınlığı 1 mm olan tüpte farklı mandrel çapları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	116
Şekil 6.25.	En büyük kuvvet değerinin (F_{maks}) mandrel çapına bağlı olarak değişim eğrisi.....	117
Şekil 6.26.	Farklı çap ve cidar kalınlığındaki tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri.....	118
Şekil 6.27.	Bükülmenin gerçekleştiği kuvvetin (F_{maks}), D/t oranı ile değişimi.....	119
Şekil 6.28.	Tüp kiriş yapıda mandrel desteksiz eğme, düzlem basma ve mandrel destekli eğme deneylerinden elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri.....	120
Şekil 6.29.	Eğme deneyi sonrası tüp kirişin görünümü.....	121
Şekil 6.30.	$D=31$ mm ($D/t=31$) tüpün kuvvet-deplasman grafiği ve farklı deplasman değerlerinde (6, 9, 12 ve 16 mm) deneyi yapılan parçaların ortasından kesilerek elde edilen kesite ait fotoğraflar	122
Şekil 6.31.	Dıştan cam elyaf ile takviye edilmiş numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri.....	123

Şekil 6.32.	Tüp kirişe P ve PP ilave edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.....	126
Şekil 6.33.	Tüp kirişe kestamid ve polipropilen ilave edilmesiyle oluşan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.....	127
Şekil 6.34.	Eğme deneyi uygulanan bir grup kompozit numuneye ait fotoğraflar.....	128
Şekil 6.35.	İçten ve dıştan (<u>cam elyafın kullanıldığı</u>) takviye edilmiş numunelere kuvvet- deplasman grafikleri (T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamid, PP: Polipropilen).....	130
Şekil 6.36.	İçten ve dıştan (<u>karbon elyafın kullanıldığı</u>) takviye edilmiş numunelere kuvvet-deplasman grafikleri.....	131
Şekil 6.37.	Kompozit kirişlerin $F_{maks}/I_{eş}$ oranına bağlı F_{maks} oranının değişimi.....	134
Şekil 6.38.	Kompozit numunelerin farklı takviye kombinasyonları için eğme kuvvetinin rijitlikle değişimi.....	135
Şekil 6.39.	CT4 numunesi ve çelik tüp kirişin kuvvet-deplasman eğrileri...	136
Şekil 6.40.	İçten ve dıştan takviyeli kompozitlerin (takviyesiz alüminyum tüp kiriş ve çelik tüp kiriş ile birlikte) özgül enerji absorbe etme kabiliyetine bağlı özgül yük taşıma kabiliyetindeki değişimleri.....	136
Şekil 6.41.	CE+T ve CE+T+K kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri.....	137
Şekil 6.42.	CE+T+K+PP (t=3.5 mm) ve CE+T+K+PP (t=6.5 mm) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri.....	137
Şekil 6.43.	CE+T+K+PP (dolu) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri.....	138
Şekil 6.44.	KE+T ve CE+T+K kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri.....	138
Şekil 6.45.	KE+T+K+PP (t=3.5 mm) ve CE+T+K+PP (t=6.5 mm) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri.....	138

Şekil 6.46.	KE+T+K+PP (dolu)ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri deney sonrası görüntüleri.....	139
Şekil 6.47.	Farklı cam elyaf katman sayısına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri.....	139
Şekil 6.48.	Farklı aramid elyaf katman sayılarına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri.....	142
Şekil 6.49.	Farklı karbon elyaf katman sayılarına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri.....	144
Şekil 6.50.	Farklı dokuma elyaf türleri (cam, aramid ve karbon) kullanılarak takviye edilmiş 4 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf).....	147
Şekil 6.51.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 6 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf).....	149
Şekil 6.52.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 8 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf).....	151
Şekil 6.53.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 10 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf).....	153
Şekil 6.54.	30 mm çaplı alüminyum tüp ile oluşturulan bir grup hibrit kompozit numunenin eğme deneyi sonrasına görüntüleri.....	155
Şekil 6.55.	Deney sırasında (a) takviyesiz (b) elyaf takviyeli kompozit kirişin burkulması.....	156
Şekil 6.56.	Burkulma deneyine tabi tutulmuş numunelerin kuvvet deplasman grafikleri.....	157
Şekil 6.57.	Burkulma deneyine tabi tutulmuş bir grup deney parçası.....	160
Şekil 6.58.	(a) Takviyesiz tüp kirişin burkulma davranışı, (b) İçeriden kestamid takviyeli tüp kirişin burkulma davranışı.....	161

Şekil 6.59.	Farklı kombinasyonlardaki kompozit kirişlerin rijitliğinin burkulma kuvvetine göre değişimi (T: Tüp kiriş, K: Kestamit, CE: Cam elyaf takviyeli polimer, KE: Karbon elyaf takviyeli polimer).....	162
Şekil 6.60.	Çapı 19 mm olan alüminyum tüp kiriş ile oluşturulan kombinasyonların eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	163
Şekil 6.61.	Çapı 19 mm olan alüminyum tüp kiriş ile oluşturulan kombinasyonların eğme deneyi sonrası görüntüleri (a) T (b) T+K (c) CE+T (d) CE+T+K (e) KE (f) KE+TK.....	166
Şekil 6.62.	D=31 mm (D/t=31) tüpün kuvvet-deplasman grafiği.....	167
Şekil 6.63.	Şekil 6.59. Takviyesiz tüp kirişin 12 mm deplasman değerindeki von-mises gerilme dağılımın gösteren analize ait görüntüsü.....	167
Şekil 6.64.	Farklı deplasman değerlerinde tüp kirişin orta noktasındaki von-mises gerilme dağılımın gösteren deney ve analize ait sonuçlar.....	169
Şekil 6.65.	Sonlu elemanlar analizi ile 3 nokta eğme simülasyonu yapılan D=31mm, t=1mm olan alüminyum tüpün farklı deplasman değerlerindeki Von-mises gerilme dağılımı.....	171
Şekil 6.66.	Tüp kirişin ortasında alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı.....	172
Şekil 6.67.	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.....	172
Şekil 6.68.	Farklı deplasman değerleri için alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeyindeki von-mises gerilme dağılımları.....	174
Şekil 6.69.	Tüp kirişin alt cidarındaki akma alanlarını gösteren gerilme dağılımı (Not: gerilme ölçeğinin alt sınır değeri olan 187 MPa, tüp malzemesinin akma sınırıdır).....	175

Şekil 6.70.	Farklı yükleme koşulları için sonlu eleman analizi ve deneysel olarak elde edilen kuvvet deplasman grafikleri.....	175
Şekil 6.71.	Üç modelde (a: Mandrel desteksiz basit eğme, b: düzlem basma, c: mandrel genişliğindeki düzlemde basma modeli, d: mandrel destekli eğme) basit eğmede bükülmenin olduğu kuvvetin en büyük değerini aldığı deplasman (12 mm de) değeri için tüp yapının ortasında (mandrel temas bölgesi) kesitte oluşan von-mises gerilmelerinin dağılımı.....	176
Şekil 6.72.	Dört modelde maksimum kuvvetin görüldüğü deplasman (12 mm de) değerinde von-mises gerilme dağılımını gösteren tüp kesitin yandan görüntüleri.....	177
Şekil 6.73.	30 mm çaplı farklı cidar kalınlıklarındaki tüp yapının kuvvet deplasman grafikleri.....	179
Şekil 6.74.	Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri.....	179
Şekil 6.75.	Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp kirişlerin çapa bağlı bükülme deplasmanı eğrisi (BD: Bükülme deplasmanı, D: Çap).....	180
Şekil 6.76.	Çapı 30 mm olan tüp kirişin farklı mandrel çaplarıyla analiz sonucu elde edilmiş kuvvet deplasman eğrileri.....	181
Şekil 6.77.	Tüp kiriş malzemesinin akma ve çekme dayanım değerlerinin % 10 oranında azaltılmış ve artırılmış durumlarındaki kuvvet-deplasman eğrileri.....	182
Şekil 6.78.	Tüp kiriş malzemesinin akma dayanımı aynı çekme dayanımı %10 oranında durumundaki kuvvet-deplasman eğrisi.....	183
Şekil 6.79.	Mekanik özellikleri farklı malzemelerde üretilmiş tüp kirişlerin akma dayanımına bağlı F_{maks} değişimi.....	183
Şekil 6.80.	30 mm çaplı 1 mm cidar kalınlıklı tüp yapıya ait von mises birim şekil değişimi dağılımı.....	184
Şekil 6.81.	Tüp kiriş malzemesinin akma ve aynı çekme dayanımı aynı, elastik modülleri farklı olması durumunda kuvvet-deplasman eğrileri.....	185

Şekil 6.82.	T+K (t=4 mm) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	185
Şekil 6.83.	5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı.....	187
Şekil 6.84.	T+K (t=4mm)+ PP (t=3.5 mm) numunesine ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri...	188
Şekil 6.85.	T+K (t=4 mm)+ PP (t=3,5 mm) numunesinin 5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlardaki von-mises gerilme dağılımı.....	189
Şekil 6.86.	T+K (t=4 mm)+ PP (t=6.5 mm) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri...	190
Şekil 6.87.	5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı.....	191
Şekil 6.88.	T+K (t=4mm)+ PP (t=10.5 mm-dolu) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri.....	192
Şekil 6.89.	5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı.....	193
Şekil 6.90.	CE+T+K (t=4 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	194
Şekil 6.91.	CE+T+K (t=4mm) yapısında 13 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	195
Şekil 6.92.	CE+T+K+PP(t=3.5 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	196
Şekil 6.93.	CE+T+K (t=4mm)+ PP(t=3.5 mm) yapısında 12.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	196
Şekil 6.94.	CE+T+K+PP(dolu) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	197
Şekil 6.95.	CE+T+K (t=4mm)+ PP(dolu) yapısında 10.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	197
Şekil 6.96.	KE+T+K (t=4 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	198
Şekil 6.97.	KE+T+K (t=4 mm) yapısında 7.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	198

Şekil 6.98.	KE+T+K+PP (t=3.5 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	199
Şekil 6.99.	KE+T+K (t=4mm)+ PP (t=3.5 mm) yapısında 8 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	199
Şekil 6.100.	KE+T+K+PP (dolu) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi.....	200
Şekil 6.101.	KE+T+K (t=4mm)+ PP (dolu) yapısında 12.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi.....	200

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	14
Tablo 2.2.	Bazı termo plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	16
Tablo 2.3.	Sürekli ve yönlenmiş elyafıa takviye edilmiş bazı metal matrisli kompozitlerin özellikleri.....	17
Tablo 2.4.	Cam elyafıların mekanik özellikleri.....	20
Tablo 2.5.	Bazı elyaf takviye malzemelerinin özellikleri.....	24
Tablo 2.6.	Sürekli ve yönlenmiş cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli epoksi Matris kompozitin elyaf doğrultusunda ve elyafa dik doğrultudaki özellikleri.....	25
Tablo 5.1.	Deney numunesi standardı ve belirlenen özellikler.....	84
Tablo 6.1.	Üretilen elyaf takviyeli kompozitl malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri.....	115
Tablo 6.2.	Çapı 31 mm olan alüminyum tüp kirişin dıştan cam elyaf ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	125
Tablo 6.3.	İçten takviye edilmiş kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	129
Tablo 6.4.	Dıştan ve içten takviye edilmiş kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	133

Tablo 6.5.	Dıştan dokuma cam elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	141
Tablo 6.6.	Dıştan dokuma aramid elyaf ile takviye edilmiş kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	143
Tablo 6.7.	Dıştan dokuma karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	145
Tablo 6.8.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 4 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.....	148
Tablo 6.9.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 6 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.....	150
Tablo 6.10.	Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 8 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri.....	152
Tablo 6.11.	Dıştan dokuma cam, aramid ve karbon elyaf ile takviye edilmiş 10 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	154
Tablo 6.12.	Hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri.....	159
Tablo 6.13.	Farklı kombinasyonlar için elde edilen burkulma kuvveti ve $F_{maks}/ağırlık$ oranı değerleri.....	165

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alüminyum tüp kiriş, üç nokta eğme, polimer, elyaf, sonlu elemanlar metodu

Bu tez kapsamında içten ve dıştan takviyenin dairesel kesitli alüminyum alaşımı (6063-T5) tüp kirişin eğme davranışına olan etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Dıştan takviye elemanı olarak cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli epoksi, içten takviye elemanı olarak ise polyamit, kestamit ve polipropilen kullanılmıştır. Tasarlanan kompozit kirişlerin eğme performansını belirlemede üç nokta eğme deneylerinden yararlanılmıştır. Hasar mekanizmasının incelenmesi için sonlu eleman analizleri planlanmış ve bu analizlerde ANSYS programı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalardan, takviyesiz tüp yapının yük taşıma kapasitesinin tüpün çapına, cidar kalınlığı gibi geometrik faktörlerin yanında, tüp malzemesinin mekanik özelliklerine bağlı olduğu anlaşılmıştır. Analizlerden, kiriş görevi gören tüpün eğme zorlanması altında üst cidardaki lokal burkulma ile alt cidardaki akmanın yapının yük taşıma kapasitesini belirlediği görülmüştür. Tüp yapıya elyaf ve epoksi kullanılarak dıştan yapılacak bir takviyede en iyi performansı, 4.5 kat artış ile $[O_290_3]$ yönlenmesine sahip numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir. Lokal burkulmanın kısıtlandığı içten polimerik malzemeler kullanılarak yapılan takviye ile yük taşıma kabiliyetinde (YTK), takviye duruma göre 5.3 kat artış sağlanmıştır. Takviyenin hem içten, hem dıştan uygulanması durumunda YTK'deki artışı oranı 14 kata ulaşmıştır. Takviye seçeneklerinin değerlendirilmesinde, özgül yük taşıma ve özgül enerji absorbe etme kabiliyeti büyüklükleri de göz önüne alınmıştır. Uygulanan takviye yönteminin narinlik derecesi yüksek (burkulma riski taşıyan, uzun ve ince) kirişlerin YTK'ne olan katkısının incelendiği burkulma deneyleri ile, dıştan takviyede karbon elyaf, içten takviyede kestamitin kullanıldığı numunenin burkulma yükünün, takviyesiz duruma göre 3.2 kat arttığı belirlenmiştir. Takviyesiz ve içten takviyeli kompozit kirişlere ait sonlu eleman analiz sonuçlarının, deneysel verilerle büyük ölçüde uyum gösterdiği, dıştan elyaf takviyeli kirişlerde ise elyaf tabakasındaki hasarın tahmin edilmesinde Tsai-Wu hasar kriterinden belirli ölçüde yararlanılabileceği anlaşılmıştır.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES ON BENDING AND BUCKLING BEHAVIOR OF CIRCULAR COMPOSITE TUBULAR BEAMS

SUMMARY

Keywords: Aluminum circular tube, three point bending, polymer, fiber, finite element method

In this study, the influence of inner and outer reinforcements by fiber and polymer material on bending performance of a cylindrical aluminum tube (6063-T5) was investigated experimentally and numerically. Polymeric materials (PA6, PP) and glass/carbon fiber were considered to form the composite beam for inner and outer reinforcement, respectively. Three-point bending test was used to characterize bending performance of the composite beams. In order to investigate failure mechanism of the composite tube, finite element analyses (FEA) were conducted. ANSYS software was utilized in all simulation studies.

It was understood from the studies that, tube diameter and wall thickness as a geometric factors are effective on load carrying capacity of unreinforced tube besides the mechanical properties of tube materials. From the finite element analyses, load carrying capacity of tube is also associated with local buckling of the upper region of the tubular beam and yielding in section of bottom portion of tube. In outer reinforced composite beam, load carrying capacity (LCC) increased maximum 4.5 times. Inner reinforcement with polymeric material plays an important role for hindering of local buckling. In inner reinforced composite beam, load carrying capability (LCC) increased maximum 5.3 times. In outer and inner reinforced composite beam, LCC increased maximum 14 times. Specific load carrying capacity and specific energy absorbing capacity have taken into account to evaluate and compare the combinations. From the buckling experiments in which contributions of reinforcements on LCC of slender tube suffered from buckling risk were examined, inner and outer reinforcements with PA6 and carbon fiber respectively, increased LCC by a factor of 3.2. It was found from the results of FEA that analyses showed good agreement with experimental data for the unreinforced and inner reinforced specimens and Tsai-Wu failure criteria can be used to predict failure of fiber-epoxy layer at a certain level for the outer reinforced composite beams.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Literatür İncelemesi

Bilindiği gibi araçların ağırlıklarının azaltılması hem çevre kirliliği hem otomobillerin performansı açısından önemli bir konuyu oluşturmaktadır. Ağırlığın azaltılması, kısa vadede yüksek dayanımlı çelikler kullanılarak sağlanmış ancak en önemli kazanç, alüminyum ve magnezyum gibi düşük yoğunluklu malzemelerin kullanılmasıyla sağlanmıştır. Bu hafif metallerin özgül mukavemet değerleri (σ_{akma} / ρ :akma sınırı/özgül ağırlık) mühendislik malzemeleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Ancak magnezyum alaşımları uygulama alanları, düşük korozyon direnci ve düşük süneklik özellikleri nedeniyle sınırlıdır. Alüminyum alaşımları kullanım açısından çok daha önemli bir potansiyele sahip olup, özgül mukavemet değerleri 20-185 MPa/ ρ arasında değişmektedir [1-2].

Otomotiv yan koruma çubukları, tampon, traktörlerdeki emniyet çemberi gibi uygulamalar yüksek mukavemet ve tokluğu gerekli kılmaktadır. Bu tür parçalarda genellikle ince taneli yüksek akma sınırına sahip çelikler kullanılmaktadır. Bu bağlamda çelik kirişlerin yerine, uygun bir şekilde üretilmiş enerji absorbe etme kabiliyeti geliştirilmiş yüksek yük taşıma kapasitesine sahip kompozit çubukların kullanılması hafiflik ve emniyet açısından önemli avantajlar sağlayacağı açıktır.

Uygulamada hafif konstrüksiyonlar için, genellikle ekstrüze edilmiş, tüp kesitli yapılardan yararlanılmaktadır. Taşıyıcı ve emniyet amaçlı bu tür çubuk konstrüksiyonlarda, parçanın imal edildiği malzeme ve yükleme durumu dikkate alınarak boyutlandırmaya gidilmektedir. Dairesel ve kutu geometrisine sahip kirişler ağırlıktan sağladıkları tasarruf nedeniyle, özellikle kren ve iş makinası gibi parça büyüklüğünün kısıtlanmadığı araç/makinalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Ancak kiriş görevi görecek yapının yüksek dayanımın yanı sıra olabildiğince hafif olması istendiği konstrüksiyonlarda, örneğin araçlarda kapı içi koruma çubukları, kaporta kargir yapısı, taşıt direkleri vs. gibi uygulamalarda basit kiriş yaklaşımı yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, taşıtlarda çarpışma esnasında enerji absorbe etme kabiliyetinin de arandığı tampon gibi uygulamalarda yapının başka malzemelerce desteklenmesi zorunludur.

İnce cidarlı yapılar enerji absorbe etme verimliliğini artırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu yapıların aksel ve eğme yükleri altındaki deformasyon davranışı oldukça dikkat çekicidir. Eğilmeye zorlanan parçanın zorlanma süresince, eğilme açısı ile uygulanan moment arasındaki ilişkinin belirlenmesi ile, aksel basma yükü etkisi altındaki ezilme davranışı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. İnce cidarlı parçaların atalet momenti/ağırlık oranı yüksek olması nedeniyle, çalışmaların bu tür parçalar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [3-20].

Kecman kare ve dikdörtgen kesitli kirişlerin eğme davranışını teorik ve deneysel olarak incelemiştir [3]. Elchakakkani ve ark. yaptığı çalışmada farklı D/t oranına sahip çelik kirişlerin moment-eğilme davranışını teorik olarak inceleyerek ince cidarlı yapıların kuvvet-deplasman davranışlarını tahmin etmek için analitik ifadeler üretmişlerdir [4]. Literatürde ince cidarlı dairesel kesitli tüplerin saf eğme altındaki sadece elastik davranışını konu alan teorik tabanlı bir çalışma da bulunmaktadır [5]. Mamalis ve ark. üç nokta eğmeye maruz ince cidarlı çelik tüplerin çarpışma davranışını Ls-dyna programıyla simüle ederek incelemiştir. Kuvvetin uygulama yeri ve yönü değiştirilerek yapılan analizlerde parçanın deformasyon davranışı irdelenmiştir [6]. Kim C.S ve ark. kare kesitli çelik tüplerin saf eğme zorlanması altındaki davranışını incelemiş ve maksimum moment ile moment-dönme açısı tahmini için öne sürülen teorik yaklaşımların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu rapor etmiştir [7]. İnce cidarlı dairesel kesitli tüplerin eğme zorlanması altındaki davranışı doğrusal olmayan malzeme davranışı modellenmesinde sonlu elemanlar tekniği ile simüle edilmiş ve modellenmenin tasarım safhasındaki çalışmalarda başarıyla kullanılabileceğini ileri sürülmüştür [8]. S. Poonaya ve ark. yaptıkları deneysel çalışmalar kapsamında altı farklı D/t (çap/cidar kalınlığı) oranı için çelik tüp kirişlerin eğme davranışlarını incelemişler ve analitik yaklaşımla, deneysel

verilerin kabul edilebilir bir aralıkta değiştiğini vurgulamışlardır. Ayrıca kurgulanan teorik modellerde, kirişte plastik Şekil değişimiyle başlayan hasar mekanizması Şartlarının 6nceden tahmin edilebileceğini ifade etmişlerdir [9]. A. O. Ayhan ve ark. yaptığı çalışmada iki ucundan ankastre edilmiş farklı uzunluklara sahip al6minyum t6p kirişin farklı çaptaki mandrel altındaki eğme davranışı sonlu eleman analizi kullanılarak incelemişler ve kiriş uzunluğunun, y6k taşıma kabiliyeti 6zerindeki etkisinin mandrel çapına g6re daha fazla olduğunu belirtmişler [12]. Bir diğer çalışmada ise karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozit t6p6n al6minyuma g6re ağırlıkta % 30 oranında kazanç sağladığı ve bu yapının y6ksek dayanım, y6ksek rijitlik ve b6y6k deformasyon kabiliyetine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sim6lasyon tekniği ile eğilme rijitliğinin deneysel verilere çok yakın bir Şekilde hesaplanabileceği de vurgulanmıştır [14,15]. Eğme davranışı incelenen kare kesitli al6minyum t6p6n iki ucuna yerleştirilen dolu kesitli elik çubuklar t6pteki lokal b6k6lmeyi 6nleyerek rijitliği ve maksimum b6k6lme kuvvetini arttırmıştır [16]. Taşıtlarda, inşaat sekt6r6nde kare kesitli kirişlerin yanında kanal kesitli yapılardan geniş uygulama alanına sahiptir. Y-C Liu ve ark. kanal kesitli kirişin eğme zorlanması altında moment-d6nme davranışını incelemişlerdir. Basitleştirilmiş model kullanarak kanal kesitli kirişin çarpışma davranışı tahmin etmişlerdir [17].

Literat6rde eksenel y6kleme altında parça davranışının incelendiği çalışmalar da mevcuttur [23-24]. Çarpışma sırasında enerji absorbe etme kabiliyeti y6ksek olan ince cidarlı elik t6pten 6retilmiş otob6s kafesinin yuvarlanma kazalarındaki deformasyon davranışı başarılı bir Şekilde modellenmiştir [23]. Başka bir çalışmada ise araçlarda çarpışmaya karşı kapı-içi pasif koruma çubukları 6zerine yoğunlaşılmış ve tasarım değişikliklerinin etkisi incelenmiştir. Statik ve dinamik deneyler sonlu eleman analizleriyle desteklemişlerdir [24].

Enerji absorbe etme kabiliyetinin maksimize edilmeye çalışıldığı araştırmalarda, metal k6p6k malzemenin yaygın bir Şekilde kullanıldığı g6r6lmektedir. Araçlarda arpışma durumu dikkate alınarak gerçekleştirilen bu t6r çalışmalarda kare ve dairesel kesitli t6p içerisine metal/plastik k6p6k veya metal petek ile doldurularak eğme ve eksenel zorlanma altındaki davranışları incelenmiştir [25-38]. Bu t6r çalışmalarda ana taşıyıcı

yapının kendisinden daha düşük dayanıma sahip ancak düzgün boşluk içeren ve bu yapısıyla da kiriş ağırlığını çok fazla arttırmayan malzemelerden yararlanılmaktadır.

Köpük malzeme ile takviye edilen metalik tüp yapıların aksel zorlanma altındaki davranışı da araştırmacılar için ilgi çekici bir konudur [33-38]. 6063-T7 ve 6060'ın farklı temper koşullarındaki kare kesitli parçalar, alüminyum esaslı köpük ve petek yapıyla takviye edilmiş ve boş kirişe göre akma sınırını önemli ölçüde arttırdığı, özgül enerji absorbe yeteneğinin, köpük ve petek yapılarda sırasıyla 1.8 ve 2 kat oranında iyileştiği ifade edilmiştir [33-34]. Heung-Soo Kim'in yaptığı çalışmada çelikten imal edilmiş kutu prizma içerisine alüminyum köpük takviyenin etkisini hem numune bazında, hem de gerçek otomobil karoser aksamı üzerinde incelemiştir, takviyesiz duruma göre çarpma etkisinde birim ağırlık başına absorbe edilen enerjinin 1,4 kat arttığını rapor etmiştir [35]. Farklı metallerden üretilen (alüminyum, pirinç ve titanyum) tüp kirişlerin ve dolgu malzemesi olarak alüminyum köpüğün dışında polimer köpüklerinde kullanıldığı çalışmalara da literatürde rastlamak mümkündür [36]. Tüp yapı içerisine takviye malzemesi olarak metal ve polimer köpük dışında talaş tozu ve beton da kullanılmıştır [37-38].

Metalik tüp kirişin sadece yüzeyi elyaf takviyeli polimer ile kaplanarak (içerisine takviye malzemesi konmadan), yük taşıma ve enerji absorbe kabiliyetinin arttırılmaya çalışıldığı çalışmalar mevcuttur [39-49]. Bu çalışmalarda deneylerin ve gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Kare kesitli alüminyum tüp kirişe dıştan cam elyaf takviyesiyle oluşturulan hibrit kompozitte tüp kirişin özgül yük taşıma kabiliyeti % 67 oranında, özgül enerji absorbe etme yeteneği ise % 29 oranında arttırılmıştır [39]. Bir diğer çalışmada sonlu elemanlar yardımıyla silindirik olarak üretilmiş bir kompozit yapının özellikleri değiştirilerek eğme zorlanmasındaki performansını arttırmak üzere optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Analiz sonuçlarından, elyaf yönlendirmesinin etkili faktör olduğu ileri sürülmüştür [41]. Dıştan tek yönlü karbon elyaf takviyeli plastik ile güçlendirilen alüminyum kutu kirişin eğme davranışı simule edilmiş ve deneysel ve teorik sonuçların birbiriyle uyum içinde olduğu anlaşılmıştır. Takviye neticesinde rijitlik ve maksimum eğme yükünde sırasıyla %75 ve %63 artış

sağlanmıştır [44]. Elyaf takviyeli tüp kirişlerin eğme davranışının incelendiği bir diğer çalışmada sonlu eleman analizlerinde elyafın hasarlanma durumu incelenmiştir [49].

Literatürde metalik tüp kirişlerin hem içeriden köpükle, hem de dışarıdan (elyaf kullanılarak) takviye edildiği hibrit kompozit kiriş çalışmaları da mevcuttur [50-51]. Dokuma cam elyaf ile dıştan takviyeli tüp kirişin içten farklı yoğunluklarda alüminyum köpük doldurularak quasi-statik basma deneylerinden, köpük takviyeli kompozit tüp kirişin yük taşıma kabiliyeti boş kompozit tüp kirişe göre % 57 artığı görülmüştür [50]. Benzer bir çalışmada ise dıştan farklı yönelme açılarında elyaf takviyesi ve içten köpük takviyesi yapılmıştır. En yüksek dayanım değeri 45° yönelme açısı için elde edilmiştir. Köpüğün kullanıldığı hibrit tüp kirişlerin aksenal çarpma altında yük taşıma kabiliyeti, boş alüminyum kirişe göre yaklaşık 3.5 kat, enerjisi ise 4 kat arttırılmıştır [51].

BÖLÜM 2. KOMPOZİT MALZEMELER ve MEKANİĞİ

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı maddenin makroskopik ölçüde bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzemedir. Kompozit malzemenin avantajı, bileşenlerinin en iyi özelliklerini bir araya getirerek bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır [52]:

- Dayanım
- Rijitlik
- Korozyon dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Görünüm
- Ağırlık [52]
- Yorulma dayanımı
- Sıcaklığa bağlı davranış
- Isıl yalıtım
- Isıl iletkenlik
- Akustik yalıtım

Bu sayılan özelliklerin hepsinin aynı anda gelişmesi beklenemez. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir kompozit malzemenin, bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb). Bazı özellikler için ise bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.) [53].

Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubbeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılacak en uygun malzemedir. İlk CTP tekne 1942'de yapılmış, ilk elyaf sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri karma malzemedan yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde %30'a varan oranlarda kullanılan karma malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (plastikler) içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine

dizilmiş boron lifleri veya 1000°C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisinde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli karma malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam elyaf-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere kullanılacak karma malzeme istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturulabilmektedir [53].

2.1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemeler üç ana bölümde sınıflandırılabilir:

- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
- Yapısal kompozit malzemeler
- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler [54]

2.1.1.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler iri parçacıklı ve saçınımla dayanımı artırılmış kompozitler olmak üzere iki alt sınıfa ayrılmaktadır.

İri parçacıklı kompozitler;

İri tanecik takviyeli kompozitler, bir matris içinde mikron ve üzerindeki boyutlarda tanelerin yer aldığı bir kompozit malzeme türüdür. Yükü matris ve elyaf birlikte taşırlar. Özellikleri izotropiktir [53]. Dolgu eklenmiş bazı polimer malzemeler iri parçacıklı kompozitlerdir. Dolgular, malzemenin özelliklerini değiştirmek veya iyileştirmek ve/veya polimer yerine hacmin bir kısmını daha ucuz malzeme ile doldurmak amacıyla kullanılan malzemelerdir. Bilinen bir başka iri parçacıklı kompozit ise matris olarak çimento, takviye olarak parçacık şeklindeki kum ve çakıldan oluşan betondur.

Parçacıklar çok farklı geometride olabilirler, ancak tüm doğrultularda yaklaşık aynı boyuttadır (eş aksenal). Etkili bir takviyenin oluşturulabilmesi için parçacıklar küçük boyutta olmalı ve matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmalıdır. Ayrıca her iki bileşenin hacim oranları da kompozitin davranışlarını etkiler, örneğin mekanik özellikler, artan takviye parçacık oranı ile artar [54].

Saçınımla dayanımı arttırılmış kompozitler;

Çok sert ve kararlı malzemelerin, çok küçük boyuttaki parçacıklarının metal ve metal alaşımları içinde küçük miktarlarda, homojen bir şekilde saçılması (dağıtılması) malzemenin sertlik ve dayanımı arttırılabilir. Burada saçınmış faz metalik veya metal dışı malzeme olabilir, en yaygın rastlanana ise oksit malzemelerdir. Bu dayanım artırma mekanizması da, çökeltme sertleşmesinde olduğu gibi, tanecikler ve matris içindeki dislokasyonlar arası etkileşimle ilgilidir. Saçınımla dayanım artışının etkisi, çökeltmeyle sertleştirme yöntemi kadar etkin olmasa da, saçınmış parçacıklar matris fazıyla reaksiyona girmedikleri için dayanımlarını yüksek sıcaklıkta uzun süre muhafaza ederler. Çökeltmeyle sertleştirilmiş alaşımlarda ise artan sertlik, ısının etkisiyle çökelmiş taneciklerin irileşmesi veya faz içinde çözünmesinden dolayı kaybolur. Bu kompozitlere örnek olarak torya-saçılmış (veya TD) nikel verilebilir. Bu malzeme nikel alaşımı içerisinde ince torya (ThO_2) tanecikleri ilave edilerek oluşturulmuştur [54].

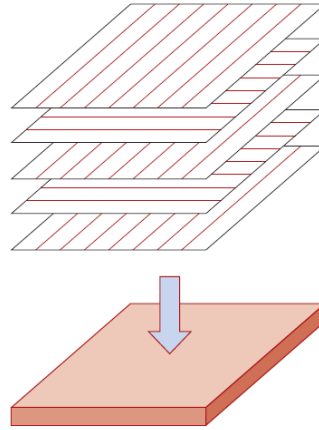
2.1.1.2. Yapısal kompozit malzemeler

Bir yapısal kompozit, özelliklerinin sadece bileşenlerine değil, aynı zamanda geometriye de bağlı olduğu, homojen ve kompozit malzemelerin birleşiminden oluşur. Yapısal kompozitler, tabakalı kompozit ve sandviç paneller olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir.

Tabakalı kompozitler;

Tabakalı kompozit ahşap ve yönlenmiş, sürekli elyafla takviyeli plastiklerde olduğu gibi, ince plakalar veya belirli yönde yüksek dayanıma sahip panellerden oluşur. Bu

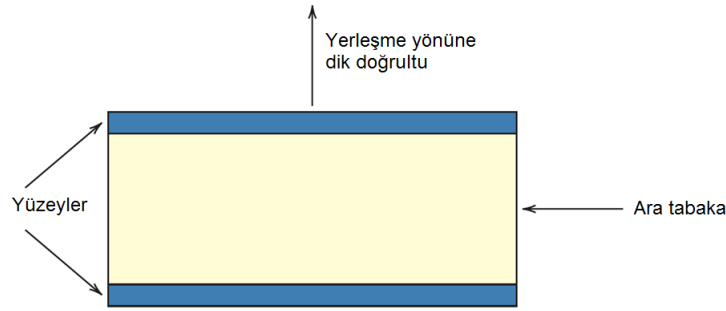
tabakalar üstü üste istiflendikten sonra her biri belirli bir yöndeki dayanımı artıracak şekilde, yönlenmede yerleştirilerek yapıştırılır (Şekil 2.1). Örneğin, kontrplakta birbirine yapışık ahşap tabakaların tane yönleri birbiriyle dik açı yapacak şekilde yerleştirilir. Tabakalar (laminasyon) pamuk, kağıt veya plastik matris içine gömülmüş dokunmuş cam elyaf gibi kumaşlardan da oluşabilir. Böylece tabakalı kompozit iki boyutlu düzlemde birçok yönde yüksek dayanıma sahip olabilir, ancak yine de bu dayanım tüm elyafın tek yönde bulunduğu duruma göre daha düşüktür.



Şekil 2.1. Bir tabakalı kompozitte arka arkaya yönelmiş elyaf takviyeli tabakaların istiflenmesi [54]

Sandviç paneller;

Özel bir tür olan sandviç paneller, hafif ancak yüksek rijitlik ve dayanıma sahip kiriş veya panellerin tasarımında kullanılan yapısal kompozitler sınıfında yer alırlar. Bir sandviç panel, Şekil 2.2’de görüleceği gibi, kalın bir dolgu ara tabaka ve buna yapışan iki dış tabaka veya yüzeyden oluşur. Dış tabaka, yapıya dayanım ve rijitlik sağlayacağından, çekme veya basma gerilmelerine dayanabilecek kadar kalın alüminyum alaşımları, elyaf takviyeli plastik, çelik veya kontrplak gibi daha rijit ve dayanıklı malzemeden yapılır. İç dolgu kısmı ise hafif ve daha çok düşük elastiklik modülüne sahip malzemelerden oluşur. Dolgu malzemeleri genellikle şu üç kategoriden birinden seçilir; rijit polimer köpükler (fenolikler, epoksi, poliüretan gibi), ahşap (balsa ağacı gibi) ve petek yapısıdır (aşağıda kısaca açıklanacaktır).



Şekil 2.2. Bir sandviç panelin kesitine ait şematik gösterim [54]

Sandviç paneller başta, çatı ve yer döşemesi, bina duvarları, havacılık ve uçak sektöründe kanat, gövde, kuyruk kaplaması) olmak üzere çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir.

2.1.1.3. Elyaf takviyeli kompozitler

Teknolojik olarak en önemli kompozitler, takviye fazının elyaf şeklinde bulunduğu kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerin tasarım amacı genellikle düşük ağırlıkla birlikte yüksek dayanım ve/veya yüksek elastiklik modülüdür. Bu özellikler özgül dayanım ve özgül elastiklik modülü terimleri ile tarif edilir, sırasıyla çekme dayanımının özgül ağırlığa oranı ve elastiklik modülünün özgül ağırlığa oranı olarak tanımlanır. Sıra dışı özgül dayanıma sahip elyaf takviyeli kompozitler düşük yoğunluklu elyaf ve matris malzemeleri ile üretilebilirler [54].

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler matris malzemesi içinde yüksek dayanım ve elastiklik modülüne sahip elyaflardan oluşur. Elyaf malzemesi yükü taşır, matris ise yükü iletir, takviye malzemesini bir arada tutar ve takviye malzemesini olumsuz ortam şartlarından korur.

Elyaf malzemesinin birçok çeşidi vardır. Cam, karbon, aramid, boron, silikon karbid, alüminyum oksit bunlardan bazılarıdır. Bütün fiberler matrisi içerisinde sürekli ve süreksiz uzunlukta olabilir. Matris malzemeleri ise polimer, metal ve seramik olabilir. Her bir matris kategorisinde, çeşitli kimyasal bileşimler ve mikro yapısal düzenlemeler mümkündür [57].

Matris malzemeleri;

Matris, elyaf takviyeli kompozit yapılarda üstlendikleri bazı önemli görevleri ;

- Takviye malzemesini bir arada tutmak
- Takviye malzemeleri arasında yükü transfer etmek
- Takviye malzemelerini olumsuz ortam şartlarından korumak şeklinde sıralanabilir.

Matris fazının yük taşıma kapasitesi azdır. Buna karşın kompozit malzemede düzlem kayma özellikleri kadar tabakalar arası kayma üzerinde matrisin büyük bir etkisi vardır. Burulma yüklemesi altında düzlem kayma dayanımı önemli iken, eğme yüklemesi altında yapılarda tabakalar arası kayma dayanımı önemli bir tasarım parametresidir. Matris, basma yükü altında elyafların burkulma olasılığına karşı yanlardan destek sağlamaktadır. Aynı zamanda elyaf matrisi arasındaki etkileşim hasara toleranslı yapıların tasarımında önemlidir. Son olarak kompozit malzemenin işlenebilirlik ve kusurları büyük ölçüde polimer matrisin viskozite, ergime noktası ve kütleme sıcaklığı gibi fiziksel ve termal özelliklere bağlıdır [57].

Elyaf takviyeli kompozitlerin *matris fazı* metal, polimer veya seramik olabilir. Sünekliğin önemli olduğu uygulamalarda, genellikle metal ve polimerler matris malzemesi olarak kullanılır. Seramik matrisli kompozitlerde ise ilave edilen takviyenin kırılma tokluğunu arttırması beklenir.

Elyaf takviyeli kompozitlerde, matris fazının bazı fonksiyonları yerine getirme görevi vardır. İlk olarak elyafı bir arada tutarak dışarıdan uygulanan gerilmeyi elyafa iletmek ve dağıtmaktır, burada gerilmenin sadece çok küçük bir kısmı matris tarafından taşınır. Ayrıca matris malzemesi sünek olmalıdır. Bunun yanında, elyafın elastiklik modülü matristen çok daha yüksek olmalıdır. Matrisin ikinci görevi ise, elyafın yüzeyini mekanik aşınma ve kimyasal reaksiyon gibi çevresel etkilerden korumaktır. Bu tür çevresel etkiler yüzeyde daha düşük çekme dayanımına neden olabilecek yüzey kusurlarına yol açabilir. Son olarak da matris, elyafı birbirinden ayırarak göreceli bir süneklik ve plastiklik sağlayarak oluşan çatlakların elyaftan elyafa geçişini engelleyerek, ani kırılmayı önler. Böylece matris çatlak ilerlemesini önleyen bir engel

görevi görmüş olur. Elyaf tek tek hasar görse bile, tüm kompozitin hasarı çok sayıda birbirine komşu elyafın kırılması kritik bir değere ulaşana kadar gerçekleşmez [54].

Elyafın matristen ayrılmaması için, matris-elyaf arasındaki ara bağ dayanımının, yüksek olması gerekir. Bu nedenle matris-elyaf ikilisi seçiminde, ara yüzey dayanımı önemli bir seçim kriterini oluşturur. Kompozitin dayanımı büyük ölçüde bu ara bağ mukavemetine bağlı olup, gerilmenin düşük dayanımlı matristen yüksek dayanımlı takviyeye iletilmesi için, ara bağ mukavemetinin yeterince yüksek olması gereklidir [54].

a) Plastik matris

Plastikler kompozit malzemelerde matris olarak yaygın bir şekilde kullanılırlar [53].

Polimerlerin ticari ve teknik bakımdan önemli olmasının sebepleri şöyle özetlenebilir;

- a. Plastiklerle genellikle ekstra işleme gerek kalmadan karmaşık parça geometrilerin kalıplanabilmesi,
- b. Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa sahip olması ve dayanım/yoğunluk oranının iyi olması
- c. Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
- d. Maliyet yönüyle metallerle yarış halinde olması
- e. Hacimsel bazda genellikle polimerleri üretmek için daha az enerjiye gerek duyulması (plastik malzemelerin çalışma sıcaklıkları metallerden daha düşüktür),
- f. Bazı plastiklerin ışığı yansıtması ve saydam olması bazı uygulamalarda camla bunları rekabet eder hale getirmesi,
- g. Polimerlerin yaygın bir şekilde kompozit malzemelerde kullanılmasıdır.

Polimerlerin bu avantajlarına rağmen aşağıda belirtilen dezavantajları vardır. Bunlarda şöyle özetlenebilir:

- a. Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- b. Düşük elastik modüle sahip olmaları
- c. Servis sıcaklığının düşük olması,

- d. Plastiklerin visko-elastik özellikler göstermesi ve dolayısı ile de sınırlı yükleme şartlarına sahip olasıdır [58]

Plastik matris olarak kullanılan genelde üç tip plastik mevcut olup bunlar şöyle sıralanabilir;

1. Termosetler
2. Termoplastikler
3. Elastomerler

Termosetler;

Termoset plastikler küçük monomer molekülerini uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı (katalizör) katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Sıvı reçine önce jelleşir, daha sonra tam sertleşir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Yüksek sıcaklıklarda ise kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşir. Polyester, epoksi, fenolik ve silikon gibi termoset polimerler elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılırlar [53].

Termosetlerin dayanımları termoplastiklere göre daha yüksektir. Ancak bunların dezavantajları ise, yüksek sıcaklıklarda nispeten düşük dirence sahip olması kısa ömür ve düşük mekanik özellikler göstermesi, düşük ısı genleşme ve elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır.

Kompozit endüstrisinde kullanılan termosetler :

- Doymamış Polyesterler,
- Epoksiler,
- Vinilester,
- Poliüretanlar,
- Fenolikler,

- Melamin ve Ürefoimaldehid,
- Poliimidler,
- Silikon
- Reçineler,
- Friedel-Crafts Reçineleri

olarak sıralanabilir.

Epoksi malzemelerin uygulama alanı, yüzey kaplamaları, endüstriyel döşemeler, cam elyaf takviyeli kompozitler ve yapıştırıcılar sayılabilir. Polyester malzemeler, borular, tanklar, gemi iskeleti, otomotiv gövdesi parçaları ve yapı panelleri gibi büyük parçaları üretmek için takviyeli plastik kompozitler de büyük oranda kullanılır. Fenolik termosetin ticari ismi bakalit olup tahta unu, selüloz elyaflar ve kalıplama malzemesi olarak kullanılan mineraller gibi dolgu maddeleri ile her zaman birleştirilir. Tahta yapıştırıcısı, baskı devre plakları, abrasiv volanları ve fren balatası için bağlama maddesidir [58].

Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [58].

Malzeme özelliği	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastik modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1.5-2.0
Isıl iletkenlik	0.19	0-19	0.15
Isıl genişleme katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

Termoplastikler;

Termoplastikler ise rijit bir ağ yapısına sahip değildirler. Burada önce çizgisel molekül zincirleri oluşur, sonra bunlar birbirlerine genellikle zayıf Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Bir termoplastik malzeme kritik bir ‘camsı duruma geçiş sıcaklığının’ üzerine ısıtılırsa yumuşar ve sıcaklık arttıkça plastiğin viskozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Buharlaşma ile bileşimleri değişmediği sürece bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Termoplastik matrisli bir kompozit malzeme üretimi daha güçtür, çünkü termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda termoplastiklerin viskozitesi hala yüksektir. Dolayısıyla matris-elyaf bağının gerçekleştirilmesi daha zordur. Bu malzemelerin kullanım sıcaklıkları da termoset malzemelerden daha düşüktür. Şekillendirme kabiliyetlerinin çok iyi olması nedeniyle elyaf takviyeli termoplastikler de giderek yaygınlaşmaktadır.

Kompozitlerde kullanılan termoplastikler [62]:

- Asetal
- Akrilik
- Akronitril-Butadiene-steyn (ABS)
- Politetra fluorethylene (PTFE)
- Poliamids (PA)
- Polipropilen (PP)
- Polietilen (PE)
- Polivinil klorür (PVC)

Bazı termo plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2.’de verilmiştir.

Malzeme özelliği	Polietilen	Politetratken	PA 6.6	Polipropilen
Yoğunluk (g/cm ³)	0.95	0.92	1.14	0.90
Elastik modül (MPa)	1000	22	700	1400
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	35
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	300	10-500
Isıl iletkenlik	0.48	0.33	0.25	0.12
Isıl genleşme katsayısı (1/°C)	60-110	100-220	70-120	80-100
Ergime sıcaklığı (°C)	-	-	260	175

Polyamid dayanıklı bir malzeme olup elastik modülü yüksek ve abrasiv aşınmaya karşı dirençlidir. Kendi kendini yağlama özelliğine sahiptir. 125 °C civarında mekanik özelliğini muhafaza eder. Önemli bir dezavantajı ise suyu emmesidir. Dişli, yatak vb. parçaların yapımında dayanım ve düşük sürtünmenin gerekli olduğu yerlerde metal yerine kullanılmaktadır.

Polietilen düşük nem emme kapasitesine sahiptir ve deformasyon direnci iyidir. Düşük maliyet, kimyasal kararlılık ve kolay işlem görmesi PE'yi cazip yapar. Düşük ve yüksek yoğunluklu olmak üzere 2 türü vardır. Şişeler, borular vb. parçaların yapımında kullanılır.

Polipropilen enjeksiyon kalıplarında önemli en hafif plastiktir. Yüksek ergime derecesine sahip olması belli uygulama alanında kullanılmasına müsaade eder [58].

b) Metal matris

Metaller organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlı matrislerdir. Buna ek olarak metal matris, karma malzemelerin tokluğunun ve kullanım sıcaklığının yükselmesini sağlar. Ancak matrisin metal olduğu karma malzemelerin imalatı güçtür ve bunlar her elyaf ile birlikte kullanılamazlar. Metal matris içerisinde en kolay kullanılabilen elyaf en nadir ve pahalı elyaf türü olan bor ve borsic (yüzeyi silisyum karbür kaplı bor) elyaftır [53].

Metal matris olarak genellikle alüminyum, titanyum, magnezyum, nikel, bakır ve çinko kullanılır fakat alüminyum ve alaşımları, titanyum ve magnezyum yaygın olarak kullanılmaktadır [58].

Tablo 2.3’de bazı yaygın metal matrisli, sürekli ve yönlendirilmiş elyaf takviyeli kompozitlerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Sürekli ve yönlendirilmiş elyafla takviye edilmiş bazı metal matrisli kompozitlerin özellikleri [54].

Elyaf	Matris	Elyaf İçeriği (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Elyaf Yönünde Çekme Modülü (GPa)	Elyaf Yönünde Çekme Dayanımı (MPa)
Karbon	6061 Al	41	2.44	320	620
Bor	6061 Al	48	-	207	1515
SiC	6061 Al	50	2.93	230	1480
Alümina	380.0 Al	24	-	120	340
Karbon	AZ31 Mg	38	1.83	300	510
Borsic	Ti	45	2.38	220	1270

Otomotiv üreticileri son zamanlarda metal matrisli kompozitleri ürünlerinde kullanmaya başlamışlardır. Örneğin, bazı motor parçaları, alüminyum oksit veya karbon elyaf ile dayanımı artırılmış alüminyum alaşımı matrise sahiptir. Bu metal matrisli kompozit parçalar hafif ve aşınma ve ısı çarpılmaya dirençlidir. Metal matrisli kompozitler ayrıca kardan mili (daha yüksek dönme hızı ve azaltılmış titreşim gürültüsü sağladığından), ekstrüzyonla imal edilmiş denge çubuğu ve dövülmüş süspansiyon ve aktarma organlarında da kullanılmaktadır.

Havacılık sektörü de metal matrisli kompozitleri kullanmaktadır. Gelişmiş alüminyum alaşımı metal matrisli kompozitlere ait yapısal uygulama örnekleri arasında, bor elyafın kullanıldığı uzay mekiği uyduları ve sürekli grafit elyafın kullanıldığı Hubble Uzay Teleskobu yer almaktadır.

Bazı süper alaşımların (Ni- ve Co- bazlı), yüksek sıcaklıktaki sürünme ve kopma özellikleri, tungsten gibi refrakter metal elyafının takviye olarak kullanılmasıyla

artırılabilir. Bu sayede yüksek sıcaklıkta mükemmel oksidasyon direnci ve darbe dayanımı da elde edilebilir. Bu kompozitlerin kullanımıyla birlikte daha yüksek çalışma sıcaklığı ve daha iyi verime sahip türbin motorları tasarlanabilmiştir [54].

c) Seramik matris

Seramiklerin matris olarak kullanılması halinde kompozit malzemeler 1300°C'ye kadar kullanılabilme şansına sahip olur. Bu tür karma malzemelerin en gelişmişlerine örnek olarak SiC veya Al₂O₃ elyaf ile takviye edilmiş, SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir. Karbon elyafında kullanılabildiği bu tür matrislerde (cam, seramik, mullit, MgO, Al₂O₃, SiC) liflerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matristen çok farklı olmayan elyafın buradaki görevi daha çok malzemenin tokluğunu artırmaktır.

Karbon matris içine gömülü karbon elyafından oluşmuş kompozitlerin 4000°C ye kadar dayanma şansı vardır. Burada matris bir organik matrisin poligonizasyonu veya buhar çökeltme ile elde edilir. Bu kompozitler yüksek sıcaklıklarda olağanüstü ısıl ve mekanik özelliklere sahiptirler [53].

Elyaf malzemeleri;

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyafın birinci dereceden görevi yükü taşıyarak dayanım ve rijitliği artırmaktır. Bir malzemenin elyaf olarak adlandırılabilmesi için ASTM'ye göre

- Uzunluk/enine ortalama boyut en az 10/1
- En büyük kesit $\leq 0.05\text{mm}^2$
- En büyük genişlik ≤ 0.25 mm koşulları verilmektedir.

Elyaf lar genellikle üç gruba ayrılırlar:

- Doğal elyaf lar (yün, pamuk, asbest)
- Rejenere elyaf (Doğada bulunan uzun markı molekül l erden yaralanılarak elde edil irler, rayon)
- Yapay elyaf (naylon, kevlar) [53]

Elyaf malzemeden aranan temel özellikler;

- a. Yüksek elastik modül
- b. Yüksek dayanım
- c. Kimyasal uyumluluk
- d. Üretim kolaylığı
- e. Isıl direnç gibi kriterlere göre incelenip seçilmektedir [58].

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan elyaf takviye malzemeleri aşağıda sıralanmıştır;

- Cam elyaf
- Karbon elyaf
- Aramid elyaf

a) Cam elyaf

Cam elyaf polimerik matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan takviye elemanıdır. Cam elyaf yüksek çekme dayanımı, yüksek korozyon dayanımı ve çok iyi yalıtım özelliğine sahiptir. Dezavantajı ise, düşük elastiklik modülü, diğer ticari elyaflara göre yüksek özgül ağırlığı, düşük aşınma direnci, düşük yorulma dayanımı ve yüksek sertliktir.

Camın yaygın bir elyaf takviye olmasının nedenlerinden bazıları şunlardır:

1. Erimiş halden yüksek dayanımlı elyaf haline kolayca çekilebilir.
2. Kolaylıkla temin edilebildiğinden, cam takviyeli plastikler çeşitli kompozit üretim yöntemleriyle ekonomik olarak üretilebilirler.
3. Elyaf şeklinde yüksek dayanıma sahip olduğu için, matris içine gömülerek çok yüksek özgül dayanıma sahip kompozit elde edilebilir.
4. Çeşitli plastiklerle birlikte, kimyasal kararlılık kazanarak birçok korozif ortamda kullanılacak bir kompozit haline gelir [54].

E ve S tipi cam elyaf takviyeli plastik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer bir çeşidi olan C tipi ise yüksek korozyon dayanımı gerektiren kimyasal

uygulamalarda kullanılır. E tipi cam elyaf düşük maliyetinden dolayı FRP endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Yüksek dayanım özelliğine sahip olan S tipi cam elyaf ise genelde uçak uygulamalarında kullanılır. Kimyasal özelliği farklı olan S tipi cam elyafın üretim maliyeti yüksek olduğundan E tipine göre daha pahalıdır [57].

Takviye olarak kullanılan cam elyafların mekanik özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Cam elyafların mekanik özellikleri

Özellikler	Cam tipi		
	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genişleme katsayısı	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı	749.0	841.0	970.0

Cam elyaf sürekli ve süreksiz olarak üretilir. Elyaf kalınlığı genelde 3 ile 20 μm arasındadır. 1300°C sıcaklıktaki sıvı cam, bir platin kovanın tabanındaki çok sayıdaki delikten aşağıya demet halinde çekilir. Bir soğutma işleminden sonra, koruyucu (sizing) yüzey kaplaması uygulanır. Lifler daha sonra fitil olarak adlandırılan demetler halinde toplanır. Bu üretim sırasında hız 3 km/dak ya kadar ulaşabilir. Bobinlere sarılan elyaf kondisyonlanır ve kurutulur. Bu sırada sizing içindeki solvent ve su giderilir.

Camın viskozitesi, sıcaklığı ve çekme hızı değiştirilerek farklı çaplarda elyaf elde edilebilir. Piyasada sunuluşu,

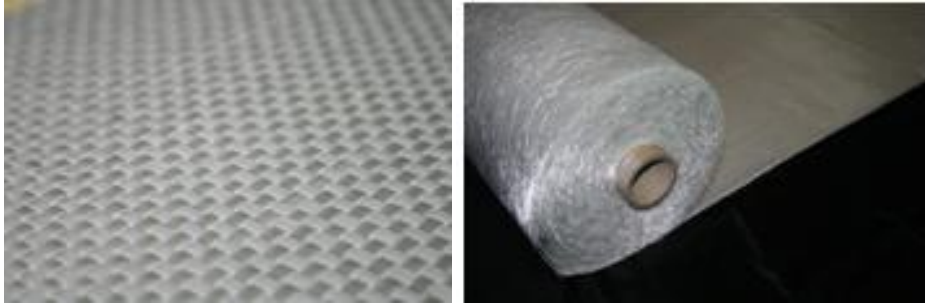
- Fitil (bükümsüz)
- Fitil (yarı bükülmüş)
- Bükülmüş iplik
- Keçe
- Dokuma şeklindedir [58].

Piyasada sunulan cam elyaflara ait görüntüler Şekil 2.3.'te verilmiştir.



a) Kırpılmış elyaf

b) Fitol elyaf



c) Dokuma elyaf

d) Çok eksenli elyaf

Şekil 2.3. Cam elyaf çeşitleri a) Kırpılmış elyaf b) Fitol elyaf c) Dokuma elyaf d) Çok eksenli elyaf [55]

Birçok cam elyaf uygulaması yaygın olarak bilinmektedir, bunlara örnek olarak: otomobil ve gemi gövdesi, plastik borular, saklama kapları ve endüstriyel yer döşemeleri sayılabilir. Ulaşım endüstrisi, araç ağırlığını azaltmak ve yakıt ekonomisi sağlamak amacıyla giderek daha da artan miktarda cam elyaf takviyeli plastikler kullanır hale gelmiştir. Daha önce otomotiv sanayinde kullanılmış veya kullanılması düşünülen birçok yeni uygulama konusunda çalışmalar halen devam etmektedir [54].

b) Karbon elyaf

1985 ten sonra geliştirilen ve öncelikle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanı bulan karbon elyaf, kompozit malzeme teknolojisinde büyük öneme sahiptir. Yüksek elastik modülüne sahip karbon elyafın yoğunluğu düşük, yüksek sıcaklık dayanımı iyidir.

Karbon, birçok ileri polimer matrisli kompozitte (cam elyaf hariç) en çok kullanılan yüksek performanslı elyaf malzemesidir. Bunun nedenleri:

1. Karbon elyaf, en yüksek özgül modül ve özgül dayanıma sahip elyaf takviye malzemesidir.
2. Sahip olduğu yüksek çekme modülü ve dayanımını, yüksek sıcaklıklarda muhafaza edebilir, ancak yüksek sıcaklıkta oksidasyon problemi söz konusu olabilir.
3. Karbon elyaf oda sıcaklığında nem, çözücü, asit ve baz gibi pek çok kimyasala karşı dayanıklıdır.
4. Karbon elyaf pek çok özel mühendislik problemini çözmek amacıyla, değişik fiziksel ve mekanik özelliklerde üretilebilir.

Elyaf ve kompozit üretim adımları nispeten daha ucuz ve verimli olacak şekilde geliştirilebilir.

Karbon ve grafit elyaflar , organik maddelerden üretildikleri için organik fiber olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak poli-akro-nitril (PAN), selüloz (rayon) ve zift (pitch) olarak kullanılır. Dolayısı ile üretildikleri maddelere göre isim alırlar. Günümüzde rayon, sadece düşük modüllü elyaflar için kullanılır. Precursor polimer ya ıslak ip şeklinde liflendirme ya da ergimiş liflendirilmiş halde ekstrüzyon işlemi ile elyaf şekline dönüşür. PAN esaslı karbon elyaflar, %93-95 arasında karbon içerirken üretim işleminin farklı oluşu nedeniyle grafitlerde %99 un üzerindedir. Karbon elyafın gerçek özellikleri, üretim metoduna bağlıdır. Endüstriyel olarak karbon elyaf üretim metotları, termal oksidasyon ve organik precursor kullanılarak grafitleme işlemleridir. Elyaf üretim adımları ve elde edilen elyafın özellikleri kullanılan kimyasala göre değişir.

Karbon elyafın petrolün damıtılmasında elde edilen katrandan doğrudan üretimi mümkündür. Çapları 6-10 μm olan çok ince liflerin üretiminde kullanılmaları güç olduğundan 1000-1600 lif içeren demetler üretilir. Satışa sunulan biçimler ise fitil ve dokumadır. Uygulamada daha çok matris malzemesi içine gömülerek hazırlanmış yarı mamulleri (prepreg) kullanılır. Karbon elyafın bir sınıflandırma şekli çekme elastiklik modülüne göre: buna göre, standart, orta, yüksek ve ultra yüksek modül olmak üzere dört farklı sınıf mevcuttur. Elyaf çapları da ortalama 4 ile 10 μm aralığında olup, sürekli ve kırılmış şekilde bulunabilir. Ayrıca karbon elyafın, polimer matrise tutunmasını arttırmak amacıyla, yüzeyi koruyucu bir epoksi kaplama ile kaplanır.

Karbon elyaf takviyeli kompozitler günümüzde yaygın olarak spor ve hobi (olta, golf sopası gibi) amaçlı ekipmanlarda, elyaf sarma yöntemiyle roket gövdelerinde, basınçlı kaplarda, askeri ve ticari amaçlı sabit kanatlı ve helikopter gibi hava taşıtlarında (kanat, gövde, stabilizatör ve kuyruk dümeni gibi) yapısal eleman olarak kullanılır [2,3,10].



Şekil 2.4. Karbon elyaf çeşitleri a) Dokuma elyaf b) Fitol elyaf c) Kırpıntı elyaf [56]

c) Aramid elyaf

Aramid elyaf 1970'lerin başında kullanılmaya başlanan yüksek dayanım ve yüksek elastiklik modülüne sahip malzemelerdir. Özellikle sıra dışı dayanım-yoğunluk oranı nedeniyle (metallerden çok daha iyidir) aranan bir malzemedir. Birçok aramid malzeme vardır, en yaygın olan ikisinin ticari ismi Kevlar ve Nomeks'tir. Kevların farklı mekanik özelliklere sahip Kevlar 29, 49 ve 149 gibi türleri de bulunmaktadır. Mekanik olarak bu elyaf, çekme yönünde diğer polimer elyafa göre daha yüksek çekme dayanımını ve modülüne sahip olup, basma zorlanması altında dayanımı daha düşüktür. Ayrıca bu malzeme kendine has tokluk, darbe dayanımı, sürünme ve yorulma direncine sahiptir. Aramidler termoplastik olmasına rağmen, yine de yanmaya dirençli ve oldukça yüksek sıcaklıklara kadar kararlıdır. Mekanik özelliklerini korudukları sıcaklık aralığı yaklaşık -200 °C ve 200 °C'dir. Kimyasal olarak güçlü asit ve bazlara karşı duyarlıdır, ancak diğer kimyasal ve çözücülere karşı oldukça kararlıdır. Aramid elyafa işlem yapmak kolaydır ve üretimleri değişik biçimlerde gerçekleştirilebilir (iplik, fitil, dokuma). Aramid elyaf en çok epoksi ve polyester gibi polimer matris malzemeleri ile birlikte kullanılır. Elyaf oldukça esnek ve diğerlerine göre sünek olduğundan, çoğu tekstil işlemlerine tabi tutulabilir. Aramid elyafın kullanıldığı tipik kompozit uygulamaları; balistik ürünler (kurşun geçirmez yelek ve zırh gibi), spor aletleri, lastikler, halatlar, güdümlü mermi gövdeleri ve basınçlı kaplardır. Ayrıca otomobil fren ve debriyaj kaplaması ile salmastra gibi sızdırmazlık elemanlarında

asbest yerine kullanılmaktadır. Tablo 2.5'te elyaf formunda kullanılan bazı malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Bazı elyaf takviye malzemelerinin özellikleri [54]

Malzeme	Özgül Ağırlık [g/cm ³]	Çekme Dayanımı [GPa]	Özgül Dayanım [GPa]	Elastiklik Modülü [GPa]	Özgül Modül [GPa]
		<i>Viskerler</i>			
Grafit	2.2	20	9.1	700	318
Silisyum Nitrid	3.2	5-7	1.56-2.2	350-380	109-118
Alüminyum Oksit	4.0	10-20	2.5-5.0	700-1500	175-375
Silisyum Karbür	3.2	20	6.25	480	150
		<i>Elyaf</i>			
Alüminyum Oksit	3.95	1.38	0.35	379	96
Aramid (Kevlar 49)	1.44	3.6-4.1	2.5-2.85	131	91
Karbon ^a	1.78-2.15	1.5-4.8	0.70-2.70	228-724	106-407
E-camı	2.58	3.45	1.34	72.5	28.1
Bor	2.57	3.6	1.40	400	156
Silisyum Karbür	3.0	3.9	1.30	400	133
UHMWPE (Spectra)	0.97	2.6	2.68	117	121
		<i>Metal Teller</i>			
Yüksek dayanımlı Çelik	7.9	2.39	0.30	210	26.6
Molibden	10.2	2.2	0.22	324	31.8
Tungsten	19.3	2.89	0.15	407	21.1
^a Bu elyaf, kristal grafit bölgeleri yanında kristal olmayan ve hatalı kristal bölgeleri de içeren bir yapıda olduğundan, burada <i>grafit</i> yerine <i>karbon</i> olarak isimlendirilir.					

Sürekli ve yönlendirilmiş cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli epoksiye ait özellikler Tablo 2.6'da verilmiştir. Burada üç malzemenin elyaf yönünde ve dik yöndeki özellikleri de karşılaştırılabilir haldedir.

Tablo 2.6. Sürekli ve yönlendirilmiş cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli epoksi Matris kompozitin elyaf doğrultusunda ve elyafa dik doğrultudaki özellikleri. Tüm Durumlarda Elyaf Hacim Oranı 0,60'tır.

Özellik	Cam	Karbon	Aramid
---------	-----	--------	--------

	(E-camı)	(Yüksek Dayanım)	(Kevlar 49)
Özgül ağırlık [g/cm ³]	2,1	1,6	1,4
Çekme Modülü [GPa]			
Elyaf Yönünde [GPa]	45	145	76
Elyafa Dik Yönde [GPa]	12	10	5,5
Çekme Dayanımı [MPa]			
Elyaf Yönünde [MPa]	1020	1240	1380
Elyafa Dik Yönde [MPa]	40	41	30
Kopma uzaması [%]			
Elyaf Yönünde [%]	2,3	0,9	1,8
Elyafa Dik Yönde [%]	0,4	0,4	0,5

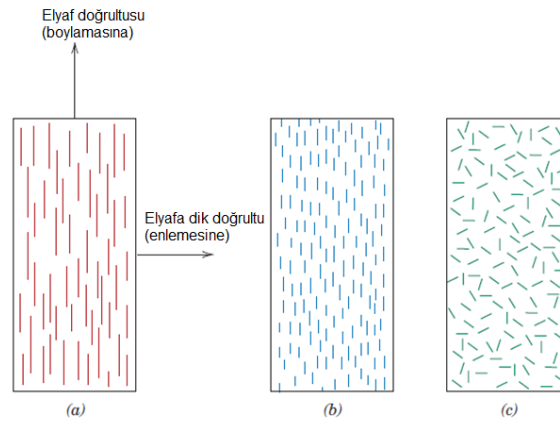
Elyaf uzunluğunun etkisi;

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri sadece elyafın özelliklerine değil, aynı zamanda matris fazının, uygulanan yükün ne kadarını elyafa iletebildiğine de bağlıdır. Bu yük aktarımı, matris ve elyaf fazları arasındaki ara yüzey bağ kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilidir [54].

Kompozit malzemenin dayanım ve rijitliğinin belirgin bir şekilde artması için, elyaf boyunun kritik bir değerden uzun olması gereklidir. Bu kritik elyaf boyu l_{kri} , elyaf çapı d , çekme dayanımı σ_c^* ve elyaf-matris ara bağ dayanımına (veya matrisin kayma akma dayanımı, hangisi küçükse) τ_c , bağlıdır

$$l_{kri} = \frac{\sigma_c^* d}{2 \tau_c} \quad (2.1)$$

Birçok cam ve karbon elyaf-matris kombinasyonları için, bu kritik uzunluk elyaf çapının 20 ile 150 katı civarında olup, 1 mm mertebelerindedir.



Şekil 2.5. Elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi, (a) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, (b) süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, (c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş

$l \gg l_{kri}$ (normalde $l > 15l_{kri}$) olan elyaf *sürekli* olarak, bundan daha kısa olanlar ise *süreksiz* veya *kısa elyaf* olarak adlandırılır. l_{kri} 'den çok kısa süreksiz elyaf için, elyaf etrafındaki matris deforme olarak neredeyse hiç gerilme iletemez ve elyafın dayanıma katkısı çok az olur. Bu durum, tam olarak daha önce değinilen parçacık takviyeli kompozitin davranışıyla aynıdır. Kompozitin dayanımında fark edilir bir artışın sağlanabilmesi için elyafın sürekli olması şarttır [54].

Elyaf yönlendirilmesi ve yoğunluğunun etkisi;

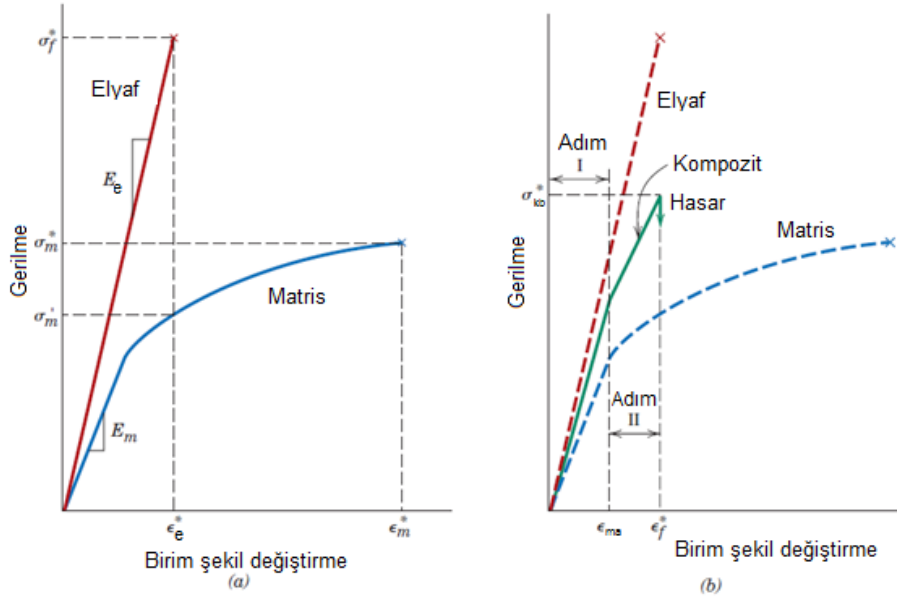
Elyaf yönlendirilmesi ve yerleşimi, yoğunluğu ve dağılımı gibi tüm değişkenler elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımı ve diğer özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Yönlendirme konusunda (1) elyafın paralel olarak sadece çekme yönünde yönlendirilmesi, (2) tamamen rastgele yönlendirilmesi olmak üzere iki sınır durum söz konusu olabilir.

Sürekli ve yönlendirilmiş elyaf takviyeli kompozitler

1. Takviye doğrultusunda yükleme durumunda çekme gerilmesi-birim şekil değişimi davranışı

Takviye doğrultusunda yükleme durumunda çekme gerilmesi-birim şekil değişimi veren eğri Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu tür kompozitlerin davranışı, matris ve elyafın gerilme-birim şekil değişimi davranışı, fazların hacimsel oranları, gerilme veya yükün

uygulandığı yön gibi bazı faktörlere bağlıdır. Buna ilave olarak, yönlendirilmiş kompozitler anizotropik davranış gösterdiğinden, ölçülen özellikler bu yönleneceğe de bağlıdır [54].



Şekil 2.6. (a) Gevrek elyaf ve sünek matrise ait gerilme- birim şekil değişimi eğrilerinin şematik gösterimi. Her iki bileşen için de kırılma gerilmesi ve birim şekil değişimi değerleri belirtilmiştir. (b) yükün elyafın yönlendiği doğrultuda uygulandığı boylamasına durum için şematik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi, (a) 'da verilen elyafa ve matrise ait eğriler de şekil üzerinde gösterilmiştir [54]

Başlangıçtaki Adım 1 bölgesinde, elyaf ve matrisin her ikisi de elastik olarak şekil değiştirir, genellikle eğrinin bu kısmı doğrusaldır. Bu tür kompozitlerde tipik olarak, elyaf elastik olarak uzamaya devam ederken matris malzemesi akar ve plastik olarak (ϵ_{ma}^* değerinde, Şekil 2.6b) deforme olur. Bu durum elyafın çekme dayanımının, matrisin akma dayanımından çok fazla olduğu durum için geçerlidir. Bu durum şekilde de görüldüğü gibi, Adım II'de de devam eder, malzeme davranışı neredeyse doğrusaldır ancak eğrinin eğimi Adım I'e göre daha azdır. Ayrıca, Adım I'den Adım II'ye geçerken, elyaf tarafından taşınan yük oranı da artar [54].

Kompozitin hasarı, elyaf kırılmasıyla başlar, bu olay Şekil 2.6b de ϵ_e^* olarak gösterilen birim şekil değişimi değeri civarında gerçekleşir. Kompozitlerin hasarı ani ve beklenmeyen bir şekilde gerçekleşmez, bunun iki nedeni vardır. Öncelikle gevrek malzemelerin kırılma dayanımı değerlerinde her zaman için bir saçılım

bulduğundan, tüm elyaf aynı anda kırılmaz. Ayrıca, elyaf kırılrsa bile, matris $\epsilon_m^* > \epsilon_e^*$ değerine kadar bütünlüğünü korur (Şekil 2.6a).

Böylece kırılarak boyu kısalan elyaf, bütünlüğünü koruyan matris içinde gömülmüş haldedir. Bu durumda matris plastik şekil değiştirirken azalan yükü taşımaya devam eder.

2. Takviye doğrultusunda yükleme durumu için elastik davranış;

Burada, sürekli elyaf takviyeli kompozitte, elyaf doğrultusundaki yükleme için elastik davranış incelenecektir. İlk olarak elyaf-matris ara bağının, deformasyonun matris ve elyafta aynı anda gerçekleşmesini sağlayacak kadar kuvvetli olduğu kabul edilmiştir. Bu şartlar altında, kompozit tarafından taşınan yük F_k , matris F_m ve elyaf F_e tarafından taşınan yüklerin toplamına eşittir [54].

$$F_k = F_m + F_e \quad (2.2)$$

Denklem 6.1'deki gerilme tanımından, $F = \sigma A$; ve F_k , F_m ve F_e 'ye karşılık gelen gerilmeler (σ_k , σ_m ve σ_e) ve kesit alanları (A_k , A_m ve A_e) olur. Bunlar 2.3 denkleminde yerine yazılırsa,

$$\sigma_k A_k = \sigma_m A_m + \sigma_e A_e \quad (2.3)$$

ve buradan, tüm denklemleri kompozitin kesit alanı A_k , değerine bölünürse, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\sigma_k = \sigma_m \frac{A_m}{A_k} + \sigma_e \frac{A_e}{A_k} \quad (2.4)$$

burada A_m/A_k ve A_e/A_k sırasıyla matris ve elyaf fazlarının alan oranlarıdır. Eğer kompozit, matris ve elyaf boyları aynı ise, A_m/A_k oranı matrisin hacim oranına, V_m ve benzer şekilde, elyafın hacim oranı da $V_e = A_e/A_k$ 'ye eşittir. Böylece Denklem 2.4 aşağıdaki hali alır,

$$\sigma_k = \sigma_m V_m + \sigma_e V_e \quad (2.5)$$

Daha önce tanımlanan eş birim şekil değiştirme kabulüne göre,

$$\epsilon_k = \epsilon_m = \epsilon_e \quad (2.6)$$

ve Denklem 2.5'deki her bir terim ilgili birim şekil değişimine bölünürse,

$$\frac{\sigma_k}{\epsilon_k} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} V_e \quad (2.7)$$

İlave olarak, eğer kompozit, matris ve elyaf elastik ise, bu durumda $\sigma_k/\epsilon_k = E_k$, $\sigma_m/\epsilon_m = E_m$ ve $\sigma_e/\epsilon_e = E_e$ olur. Buradaki E 'ler ilgili fazın elastiklik modülüdür. Bu ilişki Denklem 2.7'de yerine yazılırsa, yükün elyaf yönünde yönlendiği (boylamasına yönlenme), sürekli elyaf takviyeli kompozitin elastiklik modülü, E_{kb} ,

$$E_{kb} = E_m V_m + E_e V_e \quad (2.8a)$$

veya

$$E_{kb} = E_m (1 - V_e) + E_e V_e \quad (2.8b)$$

Kompozit yapı sadece matris ve elyaftan oluştuğu için, yani $V_m + V_e = 1$ olduğundan, yukarıdaki denklem yazılabilir.

Böylece, E_{kb} matris ve elyafın ağırlıklı ortalama elastiklik modüllerinin hacimsel oranlarına eşit olmaktadır. Yoğunluk gibi diğer özellikler de burada olduğu gibi hacim oranına bağlıdır.

Boylamasına yüklemeye, elyaf tarafından taşınan yükün matris tarafından taşınan yüke oranı şu şekilde gösterilebilir

$$\frac{F_e}{F_m} = \frac{E_e V_e}{E_m V_m} \quad (2.9)$$

3. Takviye doğrultusuna dik yükleme durumu için elastik davranış;

Sürekli ve yönlenmiş elyaf takviyeli bir kompozitte, yüklemenin elyafa dik yönde olması durumunda, uygulanan yük ile elyaf yönlenmesi arasında, Şekil 2.3a da gösterildiği gibi, 90°'lik bir açı oluşur. Bu durumda kompozitin etkisi altındaki gerilme σ , her iki bileşende de (matris ve elyaf) aynıdır [54];

$$\sigma_k = \sigma_m = \sigma_e = \sigma \quad (2.10)$$

Bu duruma *eş gerilme hali* adı verilir. Tüm kompozitteki birim şekil değişimi veya deformasyon ϵ_k , ise:

$$\epsilon_k = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (2.11)$$

Ancak $\epsilon = \sigma/E$ 'e göre denklem düzenlenirse;

$$\frac{\sigma}{E_{kd}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_e} V_e \quad (2.12)$$

Burada E_{kd} elyaf doğrultusuna dik yöndeki elastiklik modülüdür. Şimdi her tarafı σ ile bölersek:

$$\frac{1}{E_{kd}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_e}{E_e} \quad (2.13)$$

Denklem şu hale gelir:

$$E_{kd} = \frac{E_m E_e}{V_m E_e + V_e E_m} = \frac{E_m E_e}{(1 - V_e) E_e + V_e E_m} \quad (2.14)$$

4. Takviye doğrultusundaki çekme dayanımı;

Bu kısımda sürekli ve yönlenmiş kompozitlerin, elyaf doğrultusunda (boylamasına) yüklenmesi durumu için dayanım özellikleri incelenecektir. Bu şartlar altında, dayanım değeri olarak gerilme-birim şekil değişimi eğrisindeki en yüksek nokta alınır,

Şekil 2.6b'de görüldüğü gibi, genellikle bu nokta elyaf kırılmasına karşılık gelir ve kompozitin hasar başlangıcı olarak kabul edilir.

Bu tür kompozit malzemelerin hasarı diğerlerine göre daha karmaşıktır ve birkaç farklı hasar şeklinin gözlenmesi mümkündür. Bir kompozitte meydana gelecek hasarın şekli, elyaf ve matris özelliklerine, elyaf-matris ara yüzey bağının doğası ve dayanımına bağlıdır.

İlk olarak, yaygın olarak karşılaşılan $\epsilon_m^* > \epsilon_e^*$ durumu inceleyeceğiz. Bu durumda elyaf matristen önce hasara uğrar. Elyafın kırılmasıyla, elyaf tarafından taşınan yükün büyük bir kısmı matrise aktarılır. Bu durumda, bu tür kompozit için gerilme ifadesi Denklem 2.5 şeklinde değiştirilir. Kompozitin elyaf doğrultusundaki dayanımı σ_{kb}^* , şu hali alır:

$$\sigma_{kb}^* = \sigma_m' (1 - V_e) + \sigma_e^* V_e \quad (2.15)$$

Burada σ_m' elyafın hasara uğradığı anda matriste meydana gelen gerilme değeri, ve σ_e^* ise daha önce de tanımlandığı üzere, elyafın çekme dayanımıdır [54].

5. Elyaf doğrultusuna dik yöndeki (Enlemesine) çekme dayanımı;

Sürekli ve tek yönde yönelmiş elyaf takviye edilen kompozitlerin dayanımı büyük oranda yöne bağlıdır. Bu nedenle, bu tür kompozitler dayanım yüksek olduğu elyaf doğrultusunda zorlanır. Ancak çalışma sırasında, elyaf doğrultusuna dik yönde de yük etkiyebilir. Bu durumda, kompozitlerin elyafa dik doğrultudaki dayanımları son derece düşük olduğu ve hatta kimi zaman matris dayanımının bile altına düştüğünden, beklenmedik erken hasarlar meydana gelebilir. Yani elyaf takviyesi, kompozitin dayanımını arttırmak yerine, tersine azaltıcı yönde etki yaptığı bir durum gelişir.

Elyaf doğrultusundaki dayanım, elyaf boyu tarafından kontrol edilirken, enine dayanımı pek çok faktörden etkilenir. Bu faktörler için; elyaf ve matrisin özellikleri, elyaf-matris ara yüzey dayanımı ve yapıdaki mevcut boşluk sayılabilir. Elyaf doğrultusuna dik yöndeki dayanımı arttırmak için alınacak tedbirler, genellikle matris özelliklerini iyileştirici yönde olmaktadır [54].

Süreksiz ve yönlenmiş elyaf kompozitler

Süreksiz ve yönlenmiş elyafli kompozitlerin dayanımında sağlanabilecek artış oranı sürekli elyaf takviyeli yapılara göre düşük olsa da, bu kompozitler ticari pazarda gittikçe daha önemli hale gelmektedir. En yaygın olarak kullanılanı kırpıntı cam elyafıdır, ancak bunun dışında kırpıntı şeklindeki karbon ve aramid elyafıta kullanılabilir. Kısa elyafın dayanımı ve elastiklik modülü değerleri sırasıyla uzun olanların %90 ve %50'sine yaklaşır.

Yönlenmiş süreksiz kompozitlerde elyaf homojen dağılmış ve $l > l_{kri}$ 'dir, boylamasına dayanım σ_{kb}^* ilişkisi ise şu şekilde ifade edilir

$$\sigma_{kb}^* = \sigma_e^* V_e \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_m' (1 - V_e) \quad (2.16)$$

σ_e^* ve σ_m' sırasıyla elyafın kırılma dayanımını ve kompozit hasara uğradığı anda matriste meydana gelen gerilmeyi gösterir .

Eğer elyaf boyu $l < l_{kri}$ ise, bu durumda boylamasına dayanım σ_{kb}^* şu denklemlerle ifade edilir:

$$\sigma_{kb}^* = V_e \left(\frac{\tau_c l_c}{d}\right) + \sigma_m' (1 - V_e) \quad (2.17)$$

Burada d elyaf çapı, τ_c ise elyaf-matris arayüzey dayanımı veya matrisin kaymadaki akma dayanımından küçük olanını gösterir [54].

Süreksiz ve rastgele yönlenmiş elyaf kompozitler;

Elyafın rastgele yönlendiği uygulamalarda, kısa ve süreksiz elyaf kullanılır.

Elastiklik modülü belirlenirken Denklem 2.8a'ya benzer "karışım kuralı" denklemi kullanılır:

$$E_{kb} = KE_e V_e + E_m V_m \quad (2.18)$$

Bu denklemde, K , elyaf etkinlik parametresidir ve kompozit malzemenin V_f ve E_f/E_m oranlarına bağlıdır. Bu değer 1'den küçük olup, genellikle de 0,1 ile 0,6 arasında değişir. Yukarıdaki denkleme göre, rastgele yönlenmiş elyaf takviyesi için, elastiklik modülü değeri elyaf hacim oranı ile orantılı olarak artar [54].

Diğer elyaf takviye malzemeleri;

Polimer matrislerle kullanılan en yaygın elyaf cam, aramid ve karbondur. Bor, silisyum karbür ve alüminyum oksit gibi diğer elyaf türleri daha az kullanılmaktadır. Bor elyaf takviyeli polimer kompozitler askeri uçaklara ait parçalarda, helikopter rotor kanatlarında ve bazı spor ekipmanlarında kullanılmaktadır. Silisyum karbür ve alüminyum oksit ise tenis raketi, devre kartları, askeri zırhlarda ve roket uç konilerinde kullanım alanı bulur [54].

2.1.2. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri

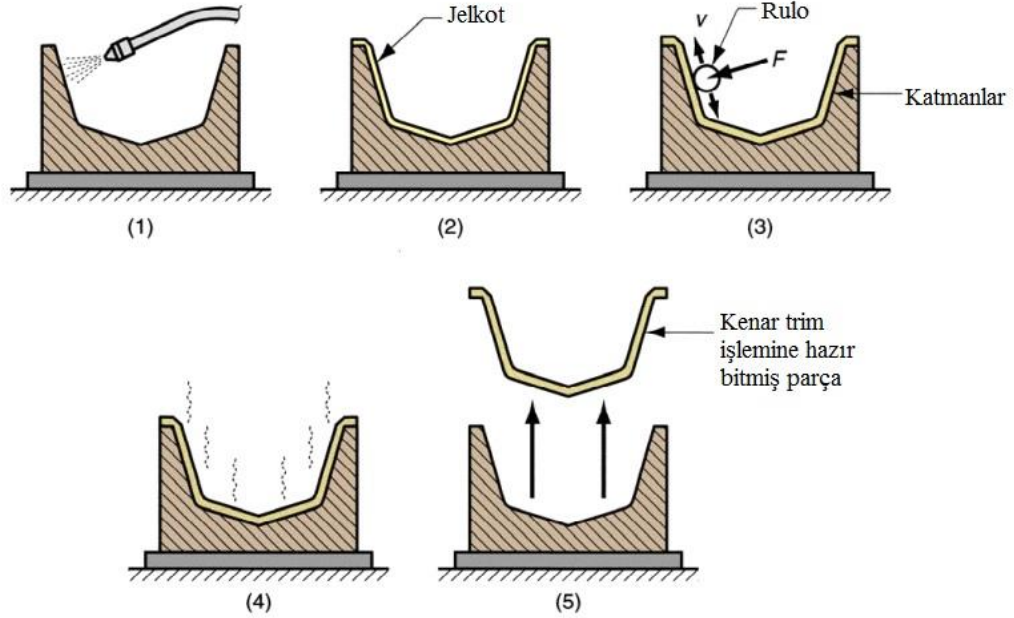
Kompozit imalat yöntemlerini iki ana gruba ayırmak mümkündür.

1. Açık kalıplama yöntemleri (temas yüzeyli kalıplama): Açık kalıplama yönteminde üretim süresince jelkot ve laminalar hava ile temas halindedir.
2. Kapalı kalıplama yöntemleri: Kapalı kalıplama yönteminde ise üretim çift taraflı kalıplarla ya da vakum torbasıyla olur. Bu iki kategoriye dahil olan birçok üretim yöntemi vardır [59].

2.1.2.1. El yatırması yöntemi

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi'nin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih

edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur [60].



Şekil 2.7. El Yatırması prosesi aşamaları [63]

Kalıp üretiminde balmumu, kil, tahta, metal, kağıt ve plastik değişik malzemeler; kalıptan ayrılmayı sağlamak için polivinil alkol, silikon ve madeni yağlar gibi maddeler kullanılır. El yatırma yönteminde araç ve gereç için yapılan yatırım düşüktür ve genellikle az sayıda parça üretimi (model, prototip vs.) için kullanılır. Bu yöntemle elde edilebilecek en yüksek hacim oranı (V_e) % 30 dur.

Daha yüksek elyaf hacim oranları ise, prepreg (öngömülmüş elyaf) kullanılarak elde edilebilir. Bunlar yarı sertleşmiş reçine içine düzenlenerek gömülmüş liflerdir. İstenilen geometrilerde üst üste yerleştirildikten sonra ısı ve mekanik etkilerle reçinenin tam sertleşmesi sağlanır. Bant ya da dokuma şeklindedirler. Bor elyaf, sadece tek yönlü prepreg olarak üretilir. Dokumaların yatırılması daha kolay olmasına rağmen dayanımları düşüktür.

Prepreglerin başlıca avantajları şunlardır:

- Reçine, elyafa en uygun şekilde seçilmiştir.

- b. Parça üretilen atölyede değişik reçine ve sertleştiricilerin stoklanmasına gerek yoktur.
- c. Karmaşık biçimlerin elde edilmesi kolaydır.
- d. Otomatik makinelerle yerleştirme yapılabilir.
- e. Mamul özelliklerindeki sapmalar çok azdır [53].

El yatırması yöntemiyle üretilen parçaların sadece kalıpla temas eden yüzeylerinin düzgün oluşu, emek yoğun bir proses oluşu ve üretim kalitesinin işçi kabiliyetine bağlı olması, açık kalıplama yöntemi olduğundan dolayı stiren yayılımının olması prosesin dezavantajları arasındadır.

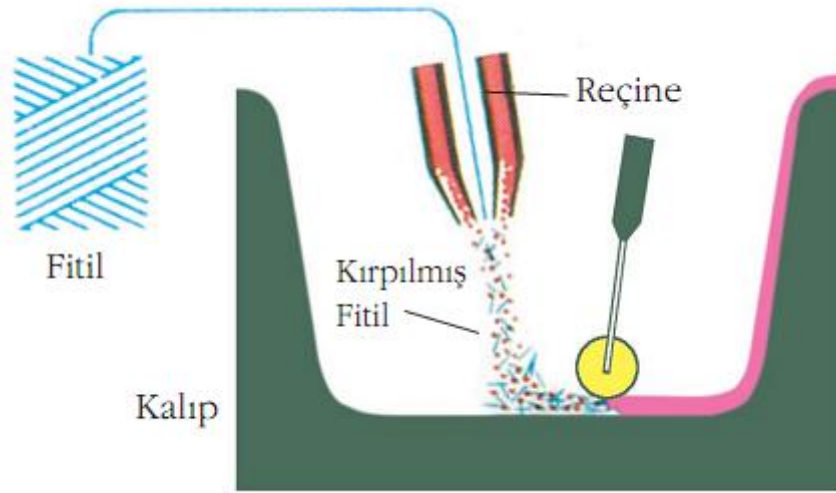
Avantajları:

- Düşük üretim maliyeti
- Üretilen parçaların boylarında kısıtlama olmaması
- Tasarım esnekliği
- Diğer yöntemlerle kıyaslandığında en düşük yatırım maliyetine sahip olması
- Çok çeşitli dekoratif renk seçeneğinin oluşu
- Yerinde kalıplama olanağı
- Prototip üretimine ve büyötmeye uygun olması
- Bölgesel mukavim yapılabilme özelliğı

Bu yöntem yaygın olarak tekne gövdelerinde, otomobil ve kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları, depolama tankları, korozyona dayanımlı ürünler, mobilya ve aksesuarlar, elektrikli ev aletleri ve havalandırma kanallarının yapımında kullanılır [59].

Püskürtme yöntemi;

Bu yöntem keçe kullanılarak yapılan el yatırmanın mekanize olmuş şekli olarak düşünülebilir. Yöntem de, örneğın bir tabancaya sürekli olarak beslenen elyaf kırılarak reçine ve sertleştirici ile karıştırılıp kalıba püskürtölür. Reçine içinde kalan havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek için rulolama uygulanır.



Şekil 2.8. Püskürtme yöntemi [61]

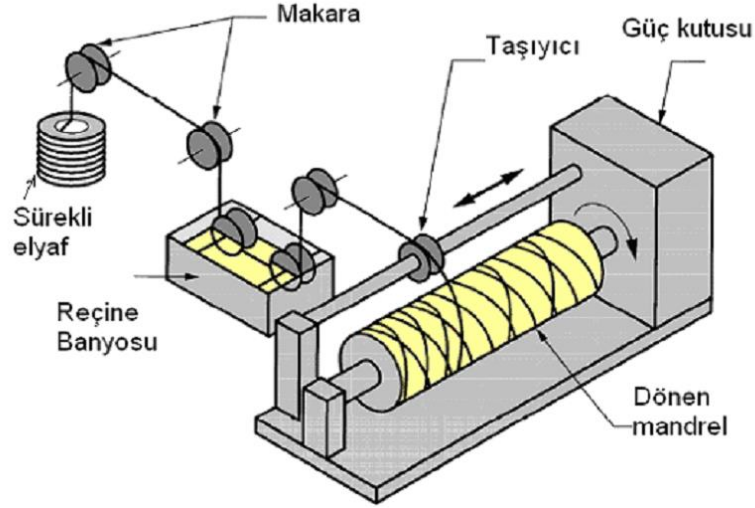
El yatırması prosesiyle aynı avantaj ve kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte [59]:

- Bu yöntemde kullanılacak malzemenin el yatırması yönteminde kullanılanlardan daha ucuza mal edilebilir olması
- Kullanılan fazla malzemedan tasarruf edilebilmesi
- Püskürtme tabancasının kullanımı sayesinde reçine uygulama ve emdirme zamanının düşürülmesi
- Çalışan emeğini azaltılması
- Katalizör katılmış reçine israfının önlenmesi
- Püskürtme yöntemini el yatırması yönteminden maliyet açısından daha avantajlı kılmaktadır.

Elyaf sarma (Filamen sarım metodu/ Fiber yerleştirme);

Elyaf sarma yönteminde sürekli elyaf kalıbı oluşturan bir mandrel üzerine belirli açılarla sarılır. Bu yöntem roket gövdeleri, depo, boru ve basınçlı kap gibi silindirik parçaların üretimi için uygundur. Bu sayede elyafın takviye yönünün zorlanmanın en yüksek olduğu doğrultular ile çakışması sağlanır. En çok ulanılan reçine polyester ve epoksi, elyaf ise camdır. Diğer yöntemlere göre elyaf hacim oranı daha yüksektir. Sarma ıslak ve kuru yapılabilir. Islak yöntemde elyaf sarılmadan hemen önce reçineye

daldırılır, kuru yöntemde ise prepreg sarılır. Sarma sırasında elyafa bir gergi kuvveti uygulanır.



Şekil 2.9. Elyaf sarım prosesi düzeneği [59]

Elyaf sarma değişik ekipmanlarla da mümkündür [59]:

- Sürekli Sarma: Dönmeyen (hareketsiz) mandrel sürekli sarıcı bir sarma istasyonu arasında hareket eder.
- Kutupsal Sarma: Mandreller kapalı bir silindir oluşturacak şekilde iki ekseninde dönerler.
- Kontinü Sarma: Takviye malzemesi ve reçine kesintisiz boru üretebilen, sonsuz hareket kabiliyetli bir kalıp sistemi üzerine uygulanır.
- Örgü Sarma: Bir çemberden geçirilerek bu yapının oluşması sağlanır.
- Kırpma Çemberi: Hibrid bir prosestir. Büyük boyutlu uygulamalarda püskürtme yöntemi ve elyaf sarma yöntemi karışımı şeklindedir.

Avantajları [61]:

- Özelliklerin tam kontrol altında tutulabilmesi.
- Çeşitli mukavemet değerlerinin elde edilebilir olması.
- İşçilik oranının düşük olması.
- Çok sayıda takviye malzemesi ve reçine seçeneği bulunması
- Prosesin çok yüksek düzeyde otomasyona uyarlanabilmesi.

- Termoset ve termoplastik kullanımına imkan vermesi.

Dezavantajları [61]:

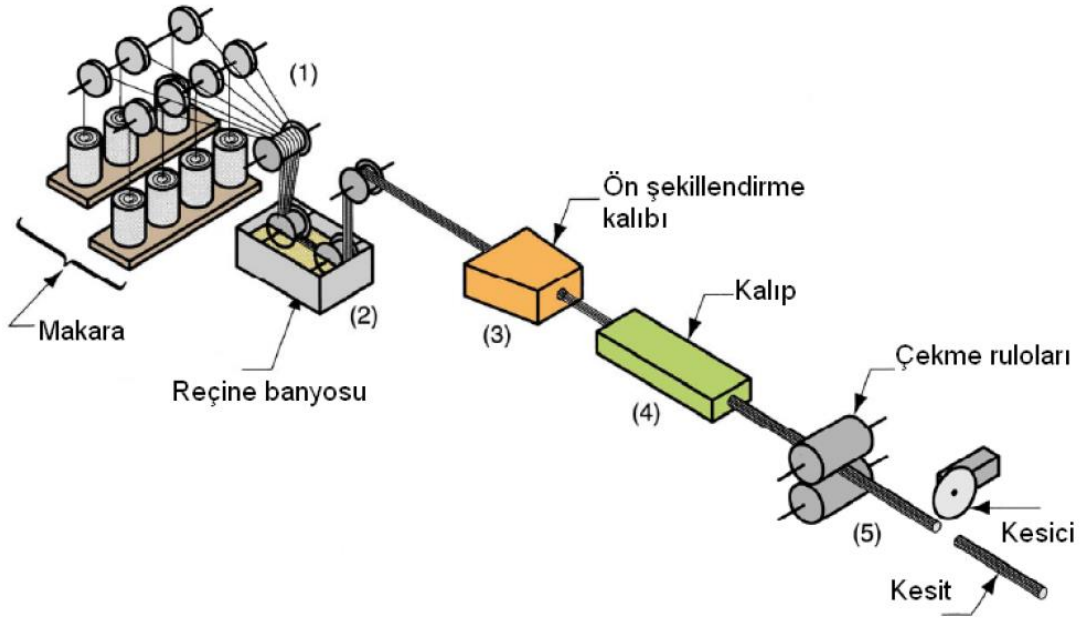
- Yalnızca aksenal ürünler için kullanılabilmesi.
- Tesis yatırımı gerektirmesi
- Uçucu organiklerin emisyonu nedeniyle mekanik kontroller gerektirmesi

2.1.2.2. Kapalı kalıplama teknikleri

Pultruzyon (Profil Çekme) yöntemi;

İstenilen şekilde profillerin ve özel kesitli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bu yöntem 1940'ların sonundan itibaren başlıca iki tür ürün elde etmek amacıyla kullanılmıştır; Rijit çubuk ve lamalar; boru, kanal, kiriş gibi endüstriyel profil şekilleri. Profil şekilleri tamamen kullanılan kalıba bağlı olup çıkan ürünlerin boyuna mukavemetleri çok yüksektir.

“Profil çekme” genelde eş yönlü lifler içeren parçaların üretiminde kullanılır. E-cam, S-cam, karbon ve aramid lifleri takviye elemanı olarak kullanılır. En çok kullanılan takviye tipi E-cam fitiller olmakla birlikte, tek uçlu veya çok uçlu fitiller ve karbon elyafi, bükümlü fitiller, sürekli keçeler, cam ve karbon elyafından tüller, örgü kumaşlar, dikişli veya dokunmuş ürünler veya bunların kombinasyonlarından bir veya birkaçı çift yönlü ve çok yönlü dayanım özelliklerini sağlama için tercih edilir [59].



Şekil 2.10. Profil Çekme Yöntemi Düzenegi [59]

Bu yöntem elyaf takviyeli kompozit malzeme elde etmek için kullanılan sürekli üretim tekniklerinden biridir. Termoset reçineye daldırılan elyaf bir ön kalıptan geçirilerek içindeki hava ve fazla reçine alınır, bu şekilde ön biçim verilmiş kompozit malzeme son kalıptan geçirilir. Malzeme ısıtılmış kalıbın içinde ve bunu izleyen fırında sertleştirilir. Bu yöntemle %60-80'e varan elyaf oranlarına ulaşmak mümkündür [53].

Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir [60].

Profil çekme yönteminin avantajları [59]:

- Zamandan ve malzemeden tasarruf sağlar.
- Elyafın büyük bir kısmı optimum çekme dayanımı elde edecek yönde boyuna yerleştirilir.
- Düşük işçilik maliyeti
- Büyük ölçekli parçalar için uygunluk
- Hızlı üretim yapabilme (otomatikleşmesi)
- Yatırım masrafları diğer yüksek hacimli üretim proseslerine kıyasla düşüktür.
- Sürekli bir proses olduğundan istenen uzunlukta parça üretilebilir.

- Burada kullanılan lif-reçine maliyeti prepreg ve kumaşa kıyasla daha düşüktür.

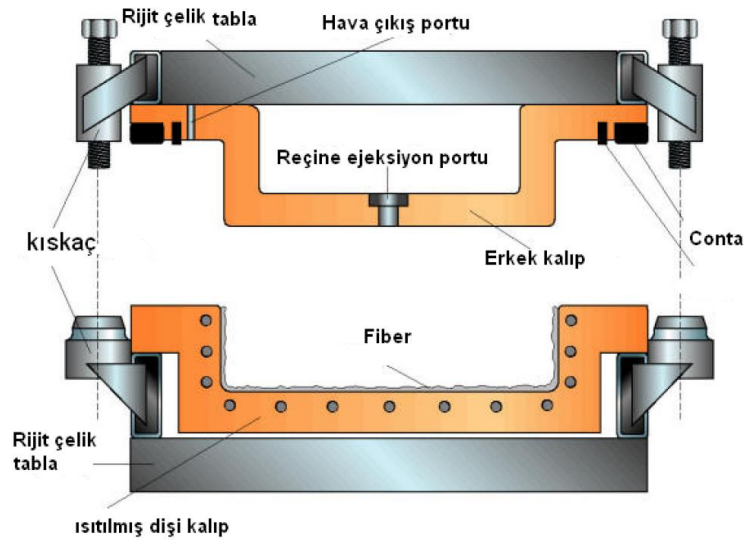
Dezavantajları [59]:

- Elyaf çekme yönüne yerleştirildiğinden enine mukavemet düşüktür. Bu da tasarımcıların daha kalın parçalar tasarlamasını gerektirmektedir. Örgü, dikişli ve dokunmuş kumaşların artan kullanımı pultruzyon yöntemini bazı yapısal uygulamalarda izotropik (her yönde aynı özellikler) özellikler sağlayabilecek hale getirmiştir.
- Reçineler kalıba yapışma eğilimi göstermektedirler buda parça kalitesini etkilemektedir.
- Reçine kalıp içerisinde uzun süre kalmaktadır. Bir hata olduğunda işlemi bitmiş reçineye müdahale etmek zordur.

Reçine transfer metodu (RTM);

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır.

RTM yöntemi çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır. Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyafın matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır [60].



Şekil 2.11. RTM Yöntemi [59]

RTM avantajları [59]:

- Kapalı kalıplama yöntemi olduğu için daha az organik uçucu gaz ortama yayılır.
- Kalıplar diğer kapalı kalıplama yöntemi kalıplarına göre daha ucuzdur.
- İki yüzü düzgün parça üretimi sağlar.
- Dolgu sistemi maliyeti düşürmekte, alevlenmeme, duman yaymama özellikleri, daha iyi yüzey görünümü ve daha yüksek kırılma dayanımı gibi performans özellikleri katar.

Kalıp maliyetleri, orta ölçekli bir üretim yöntemi olması, enjeksiyon basıncının ayarlanabilmesi, kalıpların tasarlanması ve üretimi, kilit ve conta sistemi ele alındığında proses biraz daha karmaşık hal almakla birlikte dezavantaj da oluşturmaktadır [59].

Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama prosesi (SRIM);

RTM'le benzer olup kullanılan reçine ve enjeksiyon karıştırma yöntemi farklıdır. İki reçine bir kamarada yüksek hızda karıştırılarak kalıp içine basılır. Reçine çok düşük viskoziteli ve çok yoğun kullanımı olan poliizosiyaüretattır. Reçine enjeksiyon oranı RTM'de kullanılan vinilester ve polyesterden çok daha hızlı gerçekleşir. Kür hızını arttırmak için de kalıp belli bir sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Yüksek hacim ve düşük

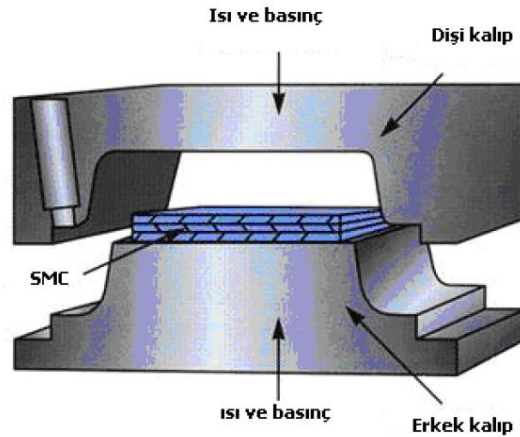
maliyet gerektiren alanlarda kullanılır. (Ör: otomotiv sanayi) tamponda, göğüs panelleri, pikapların taşıyıcı kısımları gibi [62].

Baskı kalıplama metodu;

Yüksek üretim kapasitesi gerektiren yerlerde çok yaygındır. Dört adet temel baskı kalıplama yöntemi vardır [59]:

- SMC hazır kalıplama bileşeni (tabaka kalıp bileşeni)
- BMC hazır kalıplama bileşeni (hacimli kalıp bileşeni)
- Islak sistemli preform ve keçeleri presleme
- Takviyeli termoplastik levha presleme.

Bu yöntemde dişi-erkekli kalıp kullanılır. Önceden hazırlanmış olan baskı kalıplama maddeleri ısıtılmış kalıp arasına yerleştirilir ve belirli bir basınçta kalıp kapatılarak dolgu malzemesine istenilen şekil verilmiş olur [59].



Şekil 2.12. SMC hazır kalıplama bileşeni ile baskı kalıplama [59]

Prosesin en önemli avantajı, delik, flanş ve doğrusal olmayan kalınlıkları üretebilmesi ve ikincil bir işleme gerek kalmamasıdır. Kaliteli yüzeyler için lif oranı %30 'la sınırlıdır. Bu yüzden bu oran göz önünde bulundurularak mekanik özellikler optimize edilmelidir. Kalıp hareketiyle malzeme kalıp boşluğuna yayılır ve bu esnada da malzemenin içine sıkışan havanın dışarı çıkmasını sağlar. Bu yöntemde üretilen parçalar RTM ve Enjeksiyon kalıplamayla üretilen parçalardan daha incedirler. Bu

nedenle kalınlık boyunca sıcaklık değişimi düzgün doğrusaldır. Bu üniform bir kür işlemi demektir. Üniform kür de parçada ilave gerilmelerin önlenmesi demektir [59].

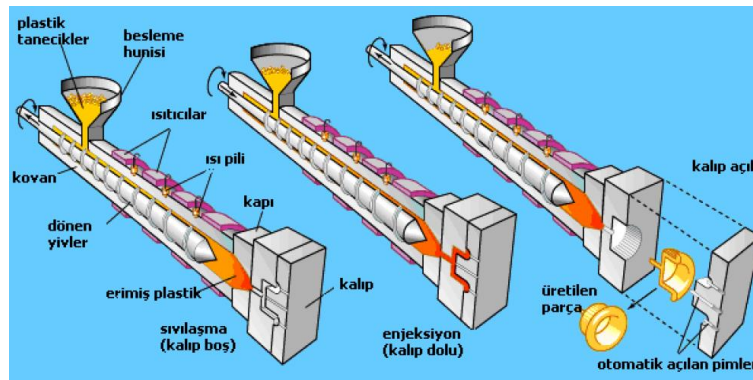
Kalıp malzemesi olarak çelik seçilir. Yüzey kalitesini arttırmak için de kalıp yüzeyi krom ve nikel kaplanır.

SMC takviye malzemeleri, reçine, dolgu malzemeleri, kimyasal kalınlaştırıcılar, katalizörler, kalıp ayırıcılar ve raf ömrünün uzamasını sağlayan diğer katkıların birleştirildiği, tamamen bütünleştirilmiş kalıplama bileşendir. Levha halindeki çeliğin kompozit karşılığı da denebilir [59].

Otomotiv, elektrik/elektronik ve ev aletlerinde ağırlıklı olarak kullanılır. Örnek radyatör destekleri, ağır taşıtların sürücü kabinleri, motor bileşenleri, kişisel tekneler, küvetler ve cephe lambalarında.

Enjeksiyon kalıplama;

Bu yöntemle üretimde daha çok termoplastiklerin kullanımı yaygındır ancak termoset uygulamalarında da başarılıdır. Yöntemin çalışma prensibi termoplastiklerin ısıtıldığında yumuşamasına ve soğutulduğunda sertleşmesine dayalıdır. Prosesin şekillendirilmiş hali aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Enjeksiyon Kalıplama Basamakları

Granül halinde termoplastik reçine ısıtılmış metal silindirin bir ucuna huni aracılığıyla beslenir. Silindir çerisindeki burğu yivleri dönerler ve bu sayede reçine sıcak silindirin

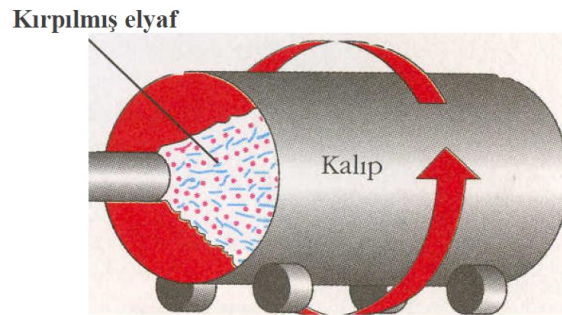
içine alınmış olur. Silindir içerisindeki sürede sıcaklığın etkisiyle reçine yarı akışkan hal alır. Yivler dönerken silindir de ileri geri hareket eder bu esnada reçine çift taraflı kalıba enjekte edilmiş olur.

Silindirik ileri-geri hareketi, reçinenin şekillendirilmesine, reçine miktarının ölçümüne, enjeksiyon sırasında kapalı kalıbı basınç altında tutmaya ve soğutmadan sonra parçanın kalıptan çıkmasını sağlar.

Kalıp boşluğu üretilecek parçanın tam formunu sağlayacak şekildedir. Dişili –erkekli yani çift taraflı kalıp kullanılır. Bu sayede iki yüzü düzgün parçalar elde edilir. Kullanılan kalıplar genellikle çeliktir ve ergimiş plastiğin işlenebileceği sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa kadar ısıtılırlar ki yarı akışkan reçine oluşacak parçanın şeklini alıp katılaşsın [59].

Savurma döküm (Santifrj) kalıplama;

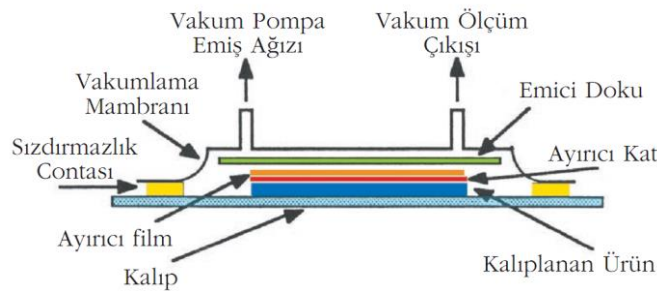
Silindirik parçaların üretimi için (örneğin boru) uygun bir yöntemdir. Kırpılmış elyaf ve sertleştirici katılmış reçine, silindirik bir kabın içine doldurulur ve döndürülen kabın cidarlarına merkezkaç kuvvetleri yardımıyla dağılan kompozit malzeme sıcak hava ile sertleştirilir.



Şekil 2.14. Santifrj Kalıplama Düzeneği [61]

Vakum torbası/ otoklav prosesi;

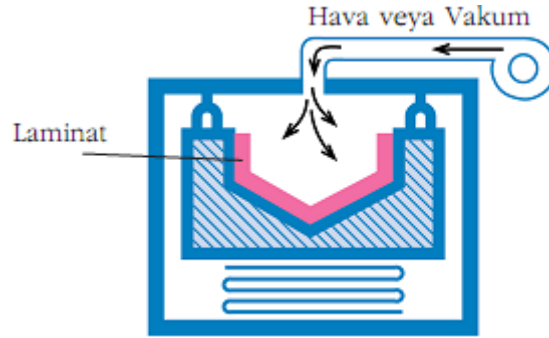
Uçak ve uzay endüstrisi ve talep edilen birçok son ürün alanında high-tech kompozit malzemelerinin kullanımı, özel kompozit kalıplama yöntemlerinin gelişmesini sağlamıştır. Bu prosesler, ticari amaçla üretilen kompozit malzemelerin kullanımı açısından küçük bir tonaja sahip olmasına rağmen, özel ya da performansın kritik olduğu uygulamalarda kullanılır. El yatırmasıyla benzerlik göstermektedir. Belirgin olan fark ise, sertleşme işlemi sırasında basınç uygulanmasıdır. Bu kalıplama yöntemlerinin her birinde malzeme uygulama aşamasında, ıslak sistemler ve prepregler kullanılır. Islak sistemlerde keçe veya dokunmuş fitil takviyeleri kalıba yerleştirilir. Sıvı reçine, takviye malzemesi yüzeyine uygulanır. Kolay şekillenebilir plastik bir film (torba diye de adlandırılır), reçine emdirilmiş takviye malzemesinin üzerine yerleştirilerek, parçanın çevresinde kalıba yapıştırılır. Islak sistem yerine prepreg kullanıldığında, levhalar ve şeritler kalıp yüzeyine el ile yerleştirildikten sonra, plastik film kaplanır. Vakum torba kalıplamada, kalıp yüzeyi ile plastik film (torba) arasındaki hava vakumlanır. Islak sistem kullanıldığında, önce reçine takviye malzemesine emdirilir. Daha sonra, sertleşme tamamlanana kadar vakum uygulanarak, plastik filmin atmosferik basınç altında kalması sağlanır. Sertleşme süreci, ayrıca ısı uygulanarak da hızlandırılabilir. Basınç torba kalıplama, atmosferik basınçtan daha yüksek basınçların kullanılması gereken uygulamalarda kullanılır. Bu yöntemde prepreg veya yaş sistem malzemeleri kullanılabilir. Esnek plastik film reçine emdirilmiş takviye malzemesi üzerine yerleştirildikten sonra, yaklaşık 3,5 bar'lık basınç sertleşme tamamlanana kadar plastik film yüzeyine uygulanır [62].



Şekil 2.15. Vakum torba kalıplama düzeneği [61]

Otoklav kalıplamayla vakum ve basınçlı torba kalıplama yöntemleri kombine edilmiştir. Prepreg veya ıslak sistemlerin her ikisi de kullanılır. Kalıp ve kompozit parça üzerine önce vakum uygulanır, daha sonra sertleşme reaksiyonu için otoklava

yerleştirilir. Bu arada vakum uygulamasına devam edilir. Isı ve dış basınç yüksek basınçlı buhar kullanılarak sağlanır. Günümüzde bir çok yüksek performanslı kompozit uçak parçası, bu yöntemle üretilmektedir [62].



Şekil 2.16. Basınç torba kalıplama [62]

2.1.3. Kompozit malzemelerin kullanım alanları

Kompozit malzemeler birçok alanda giderek artarak kullanılmaya başlanmıştır. Havacılık, uzay, denizcilik, otomotiv, yapı ve inşaat, spor araçları, müzik aletleri, endüstriyel, medikal, elektronik ve askeri alanlar gibi birçok sektörde kullanımı mevcuttur.

- Havacılık/ uzay/ savunma sanayi
- Ev aletleri ve iş ekipmanları (İmalat sanayi)
- Tarım/ gıda sektörü
- Yapı sektörü
- Denizcilik
- Elektrik/ elektronik sektörü
- Tüketim malları/ spor/ eğlence
- Askeri uygulamalar
- Korozyona dayanımlı ürünler
- Taşımacılık ve otomotiv

2.1.4. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır. Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır.

- Yüksek Mukavemet : Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemedeki tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.
- Kolay Şekillendirebilme : Büyük ve kompleks parçalar tek işlemle bir parça halinde kaplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.
- Elektriksel Özellikler : Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.
- Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet : Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.
- Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı : Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

- Kalıcı Renklendirme : Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.
- Titreşim Sönümlendirme : Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- Hammaddenin pahalı olması; Uçaklarda kullanılabilecek kalitede karbon elyafının bir metrekaresine kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$ 'dır.
- Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesime dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- Kompozitler kırılabilir (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler yaratabilir.
- Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutulmuş olarak saklanmaları gerekmektedir.
- Sıcak kurutma gerekmektedir.
- Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı durumlarda bu zor olabilir.

- Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir.

Görüldüğü gibi kompozit malzemeler, bazı dezavantajlarına rağmen çelik ve alüminyuma göre birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleri ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar bir çok sanayi kolunda problemleri çözümlenecek bir malzemedir [60].

2.2. Kompozit Malzemelerin Mekanikliği

2.2.1. Kompozit malzemelerin gerilme analizi

Kompozit yapıların mukavemetlerinin belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir [64,65].

Genelleştirilmiş Hooke kanunu üç boyutlu bir cisim için şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{11} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Yukarıda matris şeklinde belirtilen gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_k = C_{kj} \varepsilon_j \quad (k,j=1,2,\dots,6) \quad (2.20)$$

Burada C_{kj} elastiklik katsayılarıdır.

Şekil değiştirme enerjisi yoğunluk fonksiyonu U_o aşağıdaki gibi belirtilebilir:

$$U_o = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma_i d\varepsilon_i \quad (2.21)$$

Eş. 2.20'deki ifade yukarıda yerine konur ve integral alınırsa;

$$U_o = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilir.

$$\sigma_k = \frac{1}{2} (C_{kj} + C_{jk}) \varepsilon_j \quad (2.23)$$

Eş.2.20 ile Eş. 2.23 karşılaştırıldığında, $C_{kj} = C_{jk}$ olduğu görülür.

Eş.2.20'de belirtilen ilişki anizotropik malzemeler için geçerlidir ve Hooke kanununun en genel halidir. Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyafların birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcuttur. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Yukarıdaki ilişkide $[C]$ katılık matrisini ifade etmektedir. Katılık matrisinin elemanları mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3}, \quad C_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2} \quad (2.25)$$

$$C_{13} = \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{\Delta E_2 E_3} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{\Delta E_1 E_2}, \quad C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_3}$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{\Delta E_1 E_2} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{\Delta E_1 E_2}, \quad C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{\Delta E_1 E_2}$$

$$C_{44} = G_{23}, \quad C_{55} = G_{13}, \quad C_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi bir başka şekilde aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \quad i,j=1,2,\dots,6 \quad (2.26)$$

[S] uygunluk matrisi olarak isimlendirilmektedir ve [C] katılık matrisinin tersidir. Ortotropik malzemeler için uygunluk matrisi [S] mühendislik sabitleri cinsinden şu şekilde yazılabilir:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda eğer düzlem dışında kuvvet uygulanmıyorsa, düzlemsel gerilme durumu söz konusudur. Bu durumda;

$$\sigma_3 = 0, \quad \tau_{31} = 0, \quad \tau_{23} = 0$$

Düzlemsel gerilme durumu için Hooke Kanunu şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}}, \quad Q_{66} = G_{12}$$

Laminatlar genellikle farklı açılı tabakalardan meydana gelir. Bunun sebebi farklı yönlerde de yüksek mekanik özellikler elde etmektir.

Tabakalarda kullanılan koordinat sistemi 1-2 olarak isimlendirilir. 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü belirtir. 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı laminalarda çakışmaz. Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır.

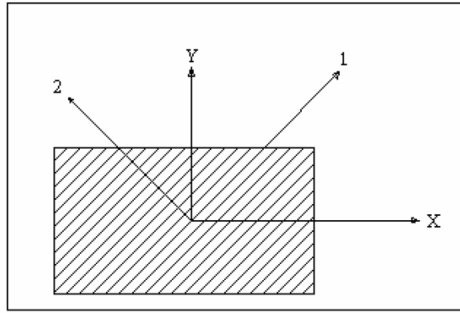
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

[T] dönüşüm matrisi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$c = \cos(\theta), \quad s = \sin(\theta)$$



Şekil 2.17. Eksen takımları

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [T][Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

[R] Reuter matrisidir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

x-y koordinat eksen takımında gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.2.2. Kompozit malzemeler için hasar kriterleri

Tabaka şeklindeki kompozit malzemelerin elastiklik özellikleri ve mukavemet değerleri 1/2/3 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 şekil 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 şeklini 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 yükleme 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 arttırılmasına 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 [64-66].

Kompozit malzeme 1-2-3 ekseninde maksimum kopma ve şekil değiştirme şu şekilde isimlendirilmektedir:

X, Y ve Z : 1, 2 ve 3 yönündeki dayanım değerleri

S: Maksimum kayma dayanımı

ε : birim uzama

γ : maksimum kayma açısı

T, C ve F : çekme, basma ve kayma durumu

1, 2 ve 3 : Eksenler

2.2.2.1. Maksimum gerilme teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma gerilmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar meydana gelmez.

$$\begin{aligned}
 -X^C < \sigma_1 < X^T \\
 -Y^C < \sigma_2 < Y^T \\
 -Z^C < \sigma_3 < Z^T \\
 -S_{12} < \tau_{12} < S_{12} \\
 -S_{23} < \tau_{23} < S_{23} \\
 -S_{13} < \tau_{13} < S_{13}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

2.2.2.2. Maksimum şekil değiştirme teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma şekil değiştirmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar oluşmaz.

$$\begin{aligned}
 -\varepsilon_1^C < \varepsilon_1 < \varepsilon_1^T \\
 -\varepsilon_2^C < \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\
 -\varepsilon_3^C < \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\
 -\gamma_{12}^F < \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\
 -\gamma_{23}^F < \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\
 -\gamma_{13}^F < \gamma_{13} < \gamma_{13}^F
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

2.2.2.3. Tsai-Hill hasar teorisi

Tsai-Hill Hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış seklidir. Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki formülasyonu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$(G_2 + G_3)\sigma_1^2 + (G_1 + G_3)\sigma_2^2 + (G_1 + G_2)\sigma_3^2 - 2G_3\sigma_1\sigma_2 - 2G_2\sigma_1\sigma_3 - 2G_1\sigma_2\sigma_3 + 2G_4\tau_{23}^2 + 2G_5\tau_{13}^2 + 2G_6\tau_{12}^2 < 1 \quad (2.40)$$

$$G_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\sigma_2^T]^2} - \frac{1}{[\sigma_{12}^T]^2} \right)$$

$$G_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\sigma_1^T]^2} \right)$$

$$G_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\sigma_1^T]^2} \right)$$

$$G_6 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{[\tau_1^F]^2} \right)$$

2.2.2.4. Hoffman hasar kriteri

Bu teoriye göre kompozit tabakadaki gerilme dağılımı aşağıdaki durumu sağlıyorsa malzemede hasar meydana gelmez.

$$[C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\tau_{23}^2 + C_8\tau_{13}^2 + C_9\tau_{12}^2]/F < 1 \quad (2.41)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{Z^T Z^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{X^T X^C} \right)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Z^T Z^C} - \frac{1}{Y^T Y^C} \right)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X^T X^C} + \frac{1}{Y^T Y^C} - \frac{1}{Z^T Z^C} \right)$$

$$C_4 = \left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right)$$

$$C_5 = \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right)$$

$$C_6 = \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right)$$

$$C_7 = \frac{1}{S_{23}^2}$$

$$C_8 = \frac{1}{S_{13}^2}$$

$$C_9 = \frac{1}{S_{12}^2}$$

2.2.2.5. Tsai-Wu hasar teorisi

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 oluşumu beklenmez, 1'i eşit veya aşması durumlarında ise hasarın gerçekleşeceği kabul edilir.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad i,j=1,2,\dots,6. \quad (2.42)$$

$$\left[\left(\frac{1}{X^T} - \frac{1}{X^C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y^T} - \frac{1}{Y^C} \right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z^T} - \frac{1}{Z^C} \right) \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X^T X^C} + \frac{\sigma_2^2}{Y^T Y^C} + \frac{\sigma_3^2}{Z^T Z^C} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3 \right] < 1$$

$$F_{12}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Y^T Y^C}$$

$$F_{23}^2 = \frac{1}{Y^T Y^C} \frac{1}{Z^T Z^C}$$

$$F_{13}^2 = \frac{1}{X^T X^C} \frac{1}{Z^T Z^C}$$

BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu, mühendislerin karşılaştığı karmaşık ve zor fiziksel problemleri kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözebilen sayısal bir çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak, örnek olarak bir yapıda kuvvet altında meydana gelen gerilme dağılımı, deformasyon vb. hesaplanabilir. Bu metot kullanılarak ayrıca ısı transferi, dinamik, titreşim analizi gibi analizler de yapılabilir. Bu bölümde sonlu elemanlar metodu hakkında kısa ve temel bilgiler verilecektir. Sonlu elemanlar metodunda analiz edilen yapı belirli sayıda elemanlara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir eleman birbirine düğüm noktaları ile bağlanır. Analiz sekline ve incelenen yapının geometrisine göre farklı eleman tipleri seçilebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık, vb. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki bu bilgilerin ortalamaları alınarak elemana ait bilgiler elde edilir [65, 69].

Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi, her elemandaki sürekli fonksiyonların cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan

değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir [70].

Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşım çözüm işleminde izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır:

1. Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
2. İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
3. Eleman rijitlik matrisinin teşkili
4. Sistem rijitlik matrisinin hesaplanması,
5. Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
6. Sınır şartlarının belirlenmesi,
7. Sistem denklemlerinin çözümü.

3.1. Deformasyon Kinematığı

Üç nokta eğme modelinin sonlu eleman analizinde hem birim şekil değişiminin, hem de yer değiştirmenin büyük olması nedeniyle lagranj metodu kullanılmıştır. Bu metot genellikle aşağıdaki durumlar için tercih edilir;

- Eğriliklerin çok fazla ihmal edilemeyeceği, nonlineer anlamda dönmelerin büyük olduğu kabuk ve çubuk yapıların analizinde
- Plastik deformasyonun sonsuz küçük olduğu kabul edilemeyeceği yani büyük birim şekil değişimi içeren hesaplamalarda [71].

3.2.Elastik ve Plastik Analiz

3.2.1. Elastik analiz

Elastik analiz elastik gerilme-gerinim ilişkisine bağlı elastik yapı üzerinde çalışır. Yüklemelerin ve yer değiştirmelerin elastik bölgede kalacağı analizlerdir. Elastik analiz nonlinear analiz gibi çok fazla niceliğin kaydedilmesine ihtiyaç duymaz.

3.2.2. Nonlinear analiz

Nonlinear analizin üç temel özelliği vardır.

- Malzeme nonlinearitesi
- Geometrik nonlinearite
- Kontak nonlinearitesi

Malzeme nonlinearitesi, malzeme özellikleri gerilme-birim şekil değişimi durumunun bir fonksiyonudur. Nonlinear malzeme davranışını belirleyen birçok model mevcuttur. Elasto-plastik, plastik ve sürenme davranışları nonlinear malzeme davranışına örnek verilebilir.

Geometrik nonlinearite, gerilme ve kuvvetler arasındaki nonlinear ilişki kadar birim şekil değişimi ve yer değiştirmeler arasındaki değişken ilişkiden kaynaklanır. Geometrik nonlinearite problemlerinin iki ana çeşidi burkulma problemi ve büyük yer değiştirme problemleridir.

Kontakt nonlinearitesi, değişken sınır şartlarının bir sonucudur. Bu tip nonlineariteye gerçek yaşamdan birçok örnek verilebilir; metal şekillendirme, dişliler, mekanik parçalar arasındaki ara yüzeyler, çarpışma [72].

BÖLÜM 4. TÜP KESİTLİ YAPILAR ve KOMPOZİT KİRİŞ TASARIMI

4.1. Tüp Kesitli Yapılar

Günümüzde kullanılan taşıyıcı ve emniyet amaçlı ince cidarlı yapılarda, parçanın imal edildiği malzeme ve yüklemeler dikkate alınarak boyutlandırmaya gidilmektedir. Ağırlıktan sağladıkları tasarruf nedeniyle dairesel ve kare geometriye sahip kutu kirişler, özellikle kren ve iş makinası ya da büyük ölçekli mühendislik uygulamalarında olduğu gibi parça büyüklüğünün çok önemli olmadığı taşıt/makinalarda rahatlıkla kullanılabilir. Ancak kiriş görevi görece yapının bazı uygulamalarda olabildiğince küçük hacme sahip olması ve yüksek dayanıma sahip olması beklenmektedir. Örneğin taşıtlarda kapı içi koruma çubukları, kaporta kargir yapısı, direk vs. gibi uygulamalarda basit kiriş tasarımı yetersiz kalmaktadır (Şekil 4.1). Ayrıca, taşıtlarda çarpışma esnasında enerji absorbe etme kabiliyetinin de arandığı durumlarda mevcut yapıların başka malzemelerce desteklenmesi zorunludur. Bu tür durumlarda takviyesiz tüp kirişler içten veya dıştan olmak üzere çeşitli takviye malzemeleriyle güçlendirilerek kullanılmaktadır.



(a)



(b)



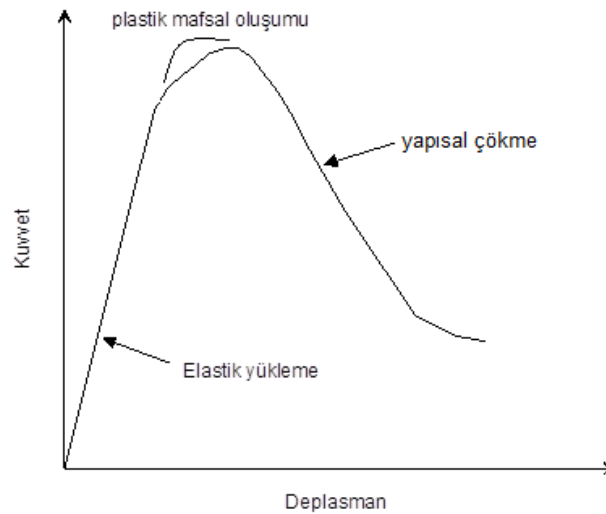
(c)

Şekil 4.1. (a) otomobil ön şasi (kapalı, yarı açık kutu kiriş) (b) otomobil kapı içi koruyucu çubuklar (silindirik veya profil) (c) traktör emniyet çemberi (kutu kiriş)

4.1.1. Tüp kesitli yapıların eğme davranışı

İnce cidarlı tüp parçalar hafif yapı elemanı olarak kullanılmasına rağmen, yük taşıma kabiliyetleri sınırlı kalmaktadır. Hasar, eğme zorlanması altında öncelikle lokal burkulma ve buna bağlı olarak eğilme momentinin etkisiyle tüp iki ucunun katlanması şeklinde cereyan etmektedir [3,4,9,10]. Lokal burkulma sonrası tüp yapının alt cidarında akmanın etkinliği tüp yapının yük taşıma kapasitesini belirlenmekte; cidarın tamamen akmasıyla bükülme kendini göstermektedir. Bükülmenin oluşmasıyla kuvvet-deplasman eğrisinde kuvvet hızla düşmektedir. Burada, bükülme öncesi gelişen hasar mekanizmasının geciktirilmesi bir anlamda yapının yük taşıma kapasitesini arttıracak anlamına gelmektedir.

Bir tüp kirişin eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri şekilsel olarak birbirlerine benzemektedir [12,23]. Bu eğrilerin şematik bir gösterimi Şekil 4.2’de verilmiştir [23]. Kuvvet-deplasman eğrisinin başlangıç kısmında yani, küçük deplasman değerlerinde elastik davranış söz konusudur; artan deplasmanla tüp yapıda yerel akma bölgeleri oluşmakta, bunun sonucunda kuvvet-deplasman eğrisinin eğimi azalmaktadır. Mandrelin temas ettiği üst cidarda oluşan yerel burkulma ve alt cidarın akmasıyla plastik mafsallık oluşmakta ve hemen ardından bükülmeyle kuvvet düşmekte, dolayısıyla kiriş eğme momenti taşıyamaz hale gelecek şekilde yapısal çökme göstermektedir [12].



Şekil 4.2. Tipik bir tüp kirişin eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisinin şematik gösterimi

Yapılan üç nokta eğme simülasyon çalışmalarından; tüp yapının yük taşıma performansı lokal deformasyon sonrası ve alt cidardaki akmanın etkinliği tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir. Bükülmenin gerçekleştiği deplasman değerinin çapın bir fonksiyonu olduğu sonlu eleman analizleriyle belirlenmiştir [12,68]. Diğer araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaların da bu sonuçları desteklediği görülmüştür. Bu çalışmalardan, bükülmenin çapın yaklaşık % 37-55 değerinde meydana geldiği saptanmıştır. Bu konu tezin sonlu eleman analiz sonuçları kısmında ayrıca detaylandırılacaktır. Saf eğme deneylerinin yapıldığı çalışmalarda bükülmenin, deplasmanın belirli bir değerinden sonra belirgin olarak gözlenebildiği [4,7,8,9] analitik olarak ortaya konmuştur. Bu bağlamda, tüp yapının dışarıdan takviye edildiği çalışmalarda yapının yük taşıma kapasitesi ve bükülme deplasmanının arttığı genel olarak rapor edilen bir sonuçtur.

Yukarıda özetlenen bu bilgilerin ışığı altında, lokal burkulma oluşumuna karşı içeriden yapılacak bir takviyenin, eğme davranışı üzerinde katkısı büyük olması beklenmektedir. Tüp yapının ağırlığını (m) aşırı derecede arttırmadan, içten ve dıştan yapılacak takviye parçanın özgül yük taşıma kabiliyeti açısından önem arz etmektedir.

4.1.2. Teorik inceleme: Tüp yapılarda yük taşıma kabiliyeti-hafiflik ilişkisi

İnce cidarlı dairesel kesitli yapıların genelde hafifliğin önemli olduğu ancak taşınan yükün çok yüksek olmadığı uygulamalar için uygundur. Bu tür yapıların çap (D) ve cidar kalınlığı (t) üzerinden tanımlanmaktadır. Aşağıda silindirik ince cidarlı tüp yapının kiriş olarak kullanılabilirliği sistematik olarak ele alınmıştır. Burada yapılan inceleme sadece elastik yükleme koşulları için geçerlidir.

İnce cidarlı yapıların atalet momenti- (D/t) değişimi, 30 mm çaplı 1 mm cidar kalınlığındaki tüp için elde edilmiş ve grafiği Şekil 4.3'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, artan D/t oranı ile yapının elastik yük taşıma kapasitesinin bir göstergesi olan I değeri sürekli azalmaktadır. Yük taşıma kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda da hafif bir kiriş tasarımı için kirişin atalet momenti (I) ile ağırlığı (m) dikkate alınmış ve karşılaştırma kriteri olarak I/m oranı kullanılmıştır.

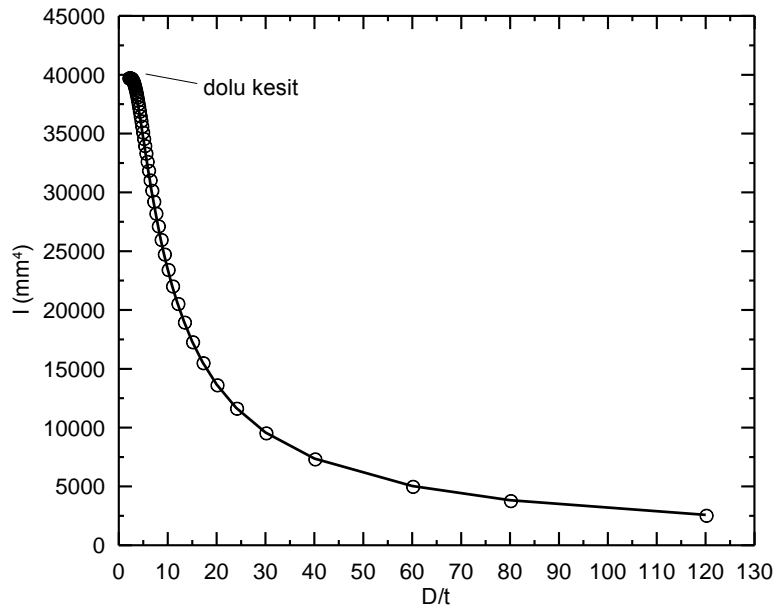
Dairesel kesit için atalet momenti ve ağırlık ifadeleri sırasıyla Denk.(1)'de verilmiştir.

$$I = \frac{\pi(D^4-d^4)}{64}, \quad m = \frac{\pi(D^2-d^2)}{4} \cdot \rho \cdot L \quad (4.1)$$

İki ifade oranlanır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa;

$$\frac{I}{m} = \frac{1}{\rho} \frac{(D^2+d^2)}{16.L} \quad (4.2)$$

elde edilir. Burada $(1/\rho)$ ifadesi malzemeye ait bir çarpan, diğerleri ise geometriye ait büyüklüklerdir. (I/m) oranını maksimize eden şartlar, verilen bir malzeme için hafif ve yük taşıma kabiliyeti yüksek kirişin geometrik özelliklerini verecektir.

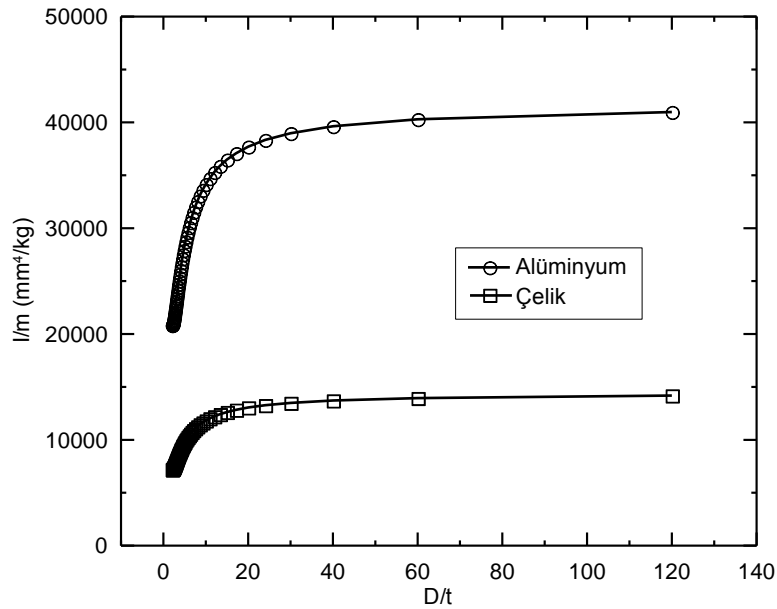


Şekil 4.3. Çapı 30 mm olan tüp kirişin atalet momenti değerinin (D/t) oranı ile değişimi

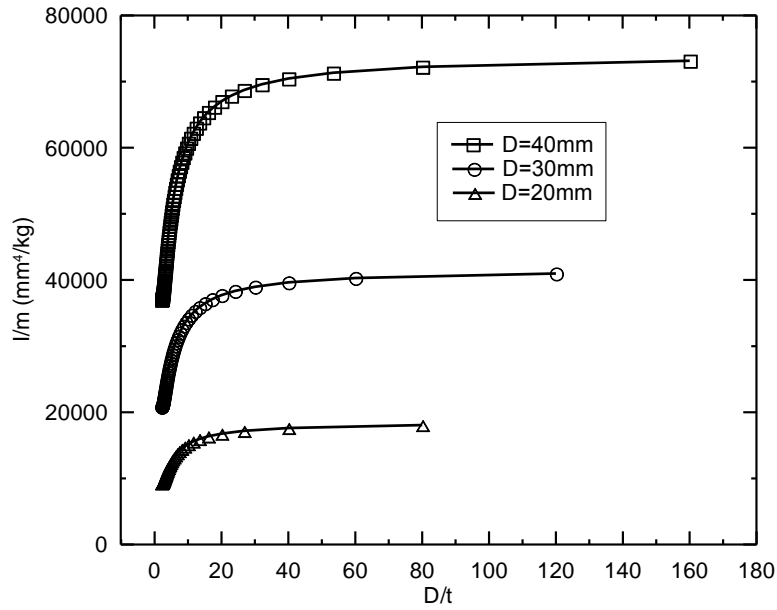
30 mm çaplı tüp kirişte I/m farklı D/t değerleri çelik ve alüminyum için hesaplanmış ve grafik ortamına aktarılan veriler Şekil 4.4'de verilmiştir. Eğrilerden $(I/m)-(D/t)$ değişimi malzemenin yoğunluğu ile ters orantılı olarak değiştiği ve hafif yapı tasarımı açısından alüminyumun uygun olduğunu söylemek mümkündür. Malzemedен bağımsız olarak, D/t 'nin küçük değerlerinde I/m 'in hızlı bir şekilde arttığı, $D/t=10$ 'dan sonra artış hızının azaldığı dikkati çekmektedir. $D/t=20$ 'den sonra ise artış hızındaki

azalma daha belirginleşmektedir. $D/t=50$ ve sonrasında eğriler neredeyse yatıklaşmaktadır. Buradan, çok ince cidarlı yapının neden tercih edilmemesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca literatürde yük taşıma amaçlı ince cidarlı yapılar için tavsiye edilen $15 < D/t < 80$ aralığının [4] temel gerekçesi de anlaşılmıştır. Örneğin; sadece sıvı depolama amaçlı olarak kullanılan, çapı 50 mm cidar kalınlığı 0.25 mm olan alüminyum içecek kutularının D/t oranı 200 mertebelerindedir.

Şekilde de anlaşılacağı gibi alüminyum tüpün eğme zorlanması için uygun D/t oranının $15 < D/t < 50$ aralığında olması gerektiğini söylemek mümkündür (Şekil 4.4). Literatürde rastlanan çalışmalarda seçilen parça ebatlarının bu aralıkta yoğunlaştığı görülmektedir [4,9,10]. Şekil 4.5'te ise alüminyumda üç farklı çap için $I/m - D/t$ değişimi verilmiştir. Parçanın iç kısmının boşaltılmış olmasının, dolu duruma göre sağladığı üstünlük büyük çaplar için çok daha fazladır. Diğer bir ifadeyle, küçük çaplı parçaların dolu kesitten seçilmiş olması önemli bir kayıp oluşturmamaktadır (Şekil 4.5).

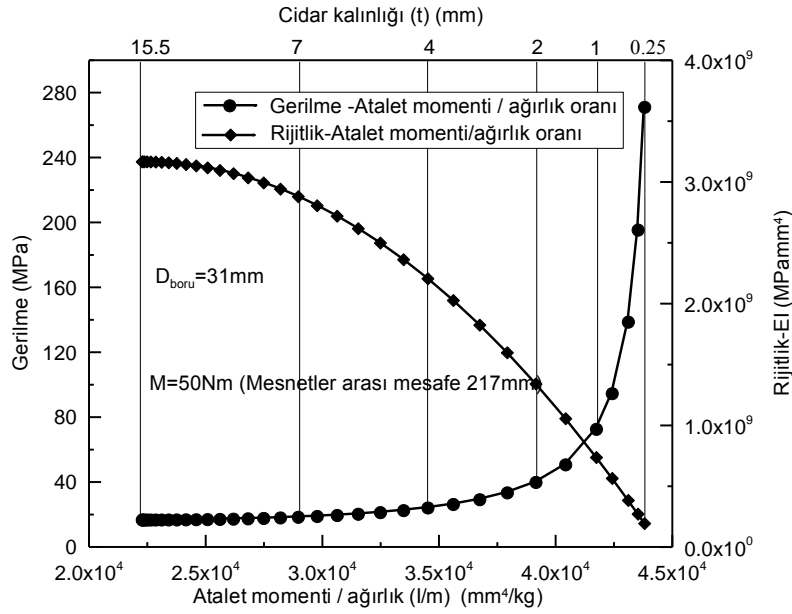


Şekil 4.4. Çelik ve alüminyum malzemede $D=30$ mm için $(I/m) - (D/t)$ değişim grafiği



Şekil 4.5. Alüminyum malzemede farklı çaplar için I/m - D/t değişim grafiği

Takviyesiz tüp yapıda verilen bir eğme momenti için I/m 'e bağlı olarak, gerilmenin ve eğilme rijitliğinin (EI) değişimi Şekil 4.6'da 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 şiddetlenmektedir. Diğer taraftan rijitlik açısından I/m 'in büyük değerleri için, beklendiği üzere rijitlik sürekli azalmaktadır (Şekil 4.6).

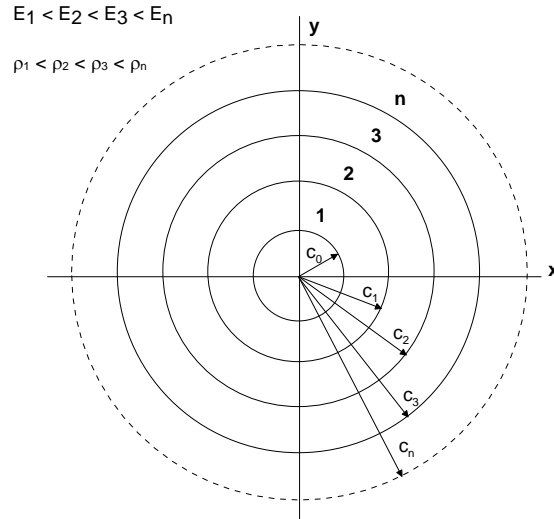


Şekil 4.6. Dış çapı 31 mm olan farklı cidar kalınlıklarına sahip alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin ve rijitliğin atalet momenti/ağırlık oranına göre değişimi

4.2. Kompozit Kiriş Tasarımı

Bu kısımda, tez kapsamında dairesel kesitli çok katmanlı içeriden ve dışarıdan farklı malzemelerle takviye edilmiş bir kompozit çubuğun tasarımında izlenecek olan temel yaklaşım özetlenmiştir.

Eğme yükü altında gerilme gradyeninin özelliğinden dolayı, yük taşımaya katkısı açısından parçanın yüzeye yakın kısımlarda kullanılacak malzemelerin elastiklik modülünün (E) yüksek olması gerekir; dıştan nötr eksene doğru uzaklaştıkça düşük yoğunluklu (ρ) ve düşük modüle sahip bir malzemenin tercih edilmesi hafif kiriş tasarımı açısından uygun olacaktır. Dolayısıyla numunenin farklı malzeme katmanlarından oluşması söz konusudur. Buna göre, çok katmanlı dairesel kesitli bir parçanın şematik gösterimi Şekil 4.7'deki gibi olacaktır.



Şekil 4.7. Dairesel kesitli malzemelerden oluşmuş bir kompozit çubuk

n katmandan oluşan bir numunenin eşdeğer kesit atalet momenti ve her bir katmanda gelişen gerilmenin hesaplanmasında sırasıyla aşağıdaki denklemler kullanılabilir [67].

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \frac{E_i}{E_{Al}} (c_i^4 - c_{i-1}^4), \quad (4.3)$$

$$n = \frac{E_i}{E_{Al}} \quad \sigma = \frac{MY}{I} n \quad (4.4)$$

Burada I kompozit yapının alüminyuma göre eşdeğer atalet momenti, n katman sayısı, c yarıçaptır.

Şekil 4.7’de gösterilen kesite sahip bir kompozit tüpün birim uzunluk başına ağırlığı, aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir.

$$m = \pi[(C_1^2 - C_0^2)\rho_1 + (C_2^2 - C_1^2)\rho_2 + (C_3^2 - C_2^2)\rho_3 + \dots + (C_n^2 - C_{n-1}^2)\rho_n] \quad (4.5)$$

σ_a , ilgili malzemenin akma gerilmesi olmak üzere, öngörülen 3 katmandan oluşan dairesel kesitli kompozit bir çubuk için her bir katmandaki gerilmelerin durumu aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir.

$$\sigma_1 = \frac{MC_1}{I} \leq \sigma_a^1 \quad (4.6)$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) \frac{MC_2}{I} \leq \sigma_a^2 \quad (4.7)$$

$$\sigma_3 = \left(\frac{E_3}{E_1}\right) \frac{MC_3}{I} \leq \sigma_a^3 \quad (4.8)$$

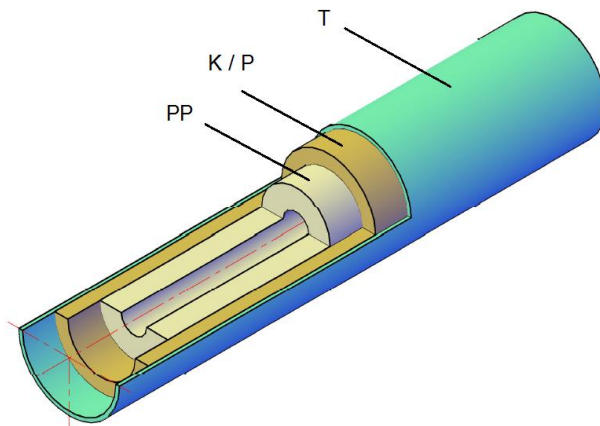
Tasarlanan kompozit yapının eğme rijitliği;

$$Rijitlik = \sum_i^n E_i I_i \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada, n: Katman sayısı, E: Elastiklik modülü, I : kirişi oluşturan her bir bileşenin atalet momentidir

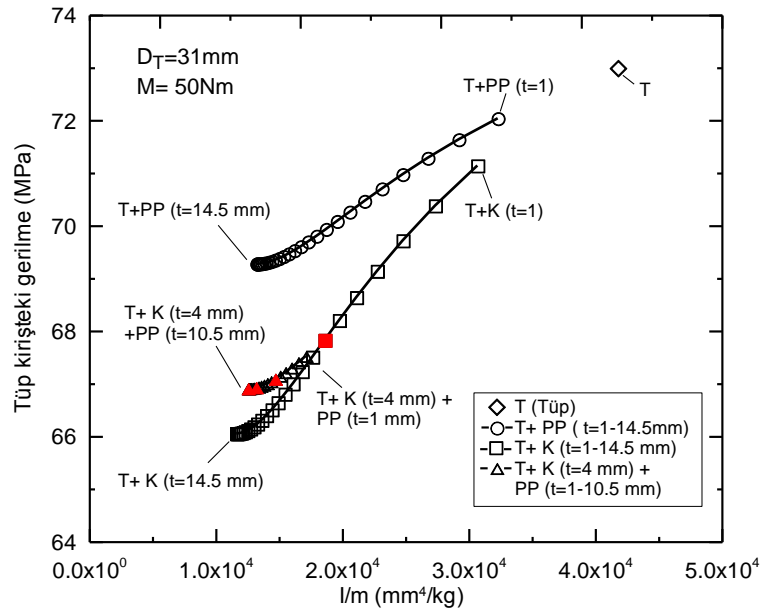
Kompozit yapıda öngörülen malzemelerin elastiklik modülü ve dayanım değerleri göz önünde tutularak ve de temel mekanik prensipleri kullanılarak kompozit yapının alüminyuma göre eşdeğer atalet momenti (I) ve her bir katman için gelişebilecek gerilme değerlerini verilen bir moment için hesaplamak mümkündür. İnce cidarlı dairesel kesitli bir kirişe içeriden yapılacak takviye için mühendislik polimerik malzemelerinden kestamit, polyamit ve polipropilen malzemeler öngörülmüştür.

İçten polimerik malzemeler takviye edilmiş hafif ve yük taşıma kapasitesi yüksek bir kompozit yapı tasarımı için, polimer malzemelerin farklı cidar kalınlıkları göz önüne alınmış ve malzeme özellikleri kullanılarak farklı kombinasyon için I/m oranları saptanmıştır. Genel olarak öngörülen kompozit yapının bir kombinasyonu için şematik görünümü Şekil 4.8'de verilmiştir.

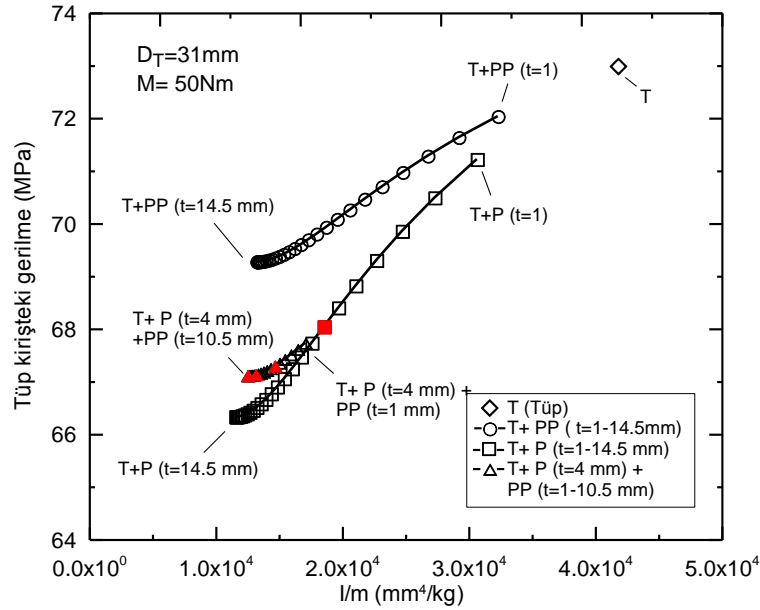


Şekil 4.8. İçten takviyeli tüp kirişin şematik gösterimi

Örnek olarak seçilen bir 31 mm çaplı tüp yapının takviye edilmesi durumunda, alüminyum tüpün yüzeyindeki gerilmenin I/m ile değişimini gözlemlemek amacıyla Şekil 4.9-10'daki grafikler oluşturulmuştur. Bu grafiklerin çiziminde eğme momenti 50 N.m olarak sabit tutulmuştur. Bu moment değerinin seçiminde kompozit yapıyı oluşturan tüm bileşenlerin elastik sınırlar içinde kalmasına özellikle dikkat edilmiştir. Grafiklerin oluşturulmasında malzemelere ait elastiklik modülü ve yoğunluk gibi mekanik ve fiziksel özellikler kullanılmış, deneysel çalışmada değerlerin ayrıca doğruluğu kontrol edilmiştir. Alüminyum tüp, kestamit, polyamid ve polipropilene ait elastiklik modülleri sırasıyla 69, 2.25, 2.15 ve 1.15 GPa'dır. Yoğunluk değerleri ise aynı sırayla 2.7, 1.15, 1.15 ve 0.9 g/cm³'tür. Ağırlık (m) 1 m uzunluktaki kiriş için hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş D=31mm t=1mm olan alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen



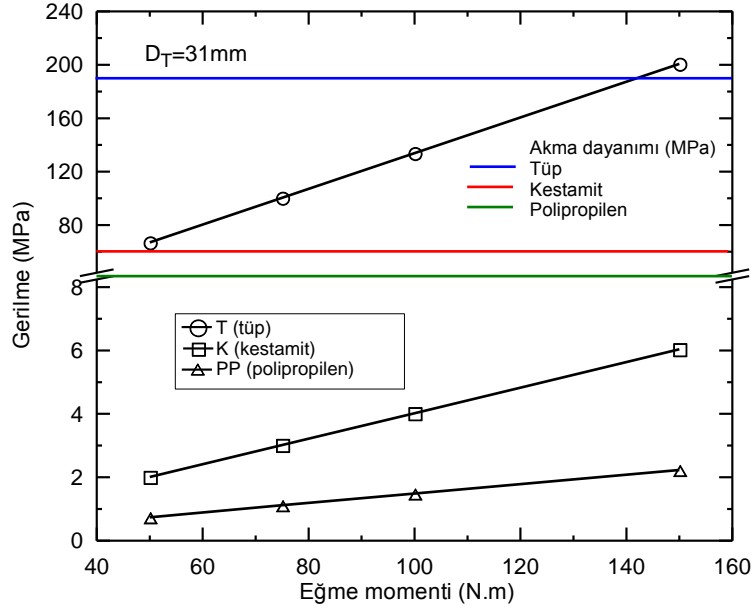
Şekil 4.10. Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş $D=31\text{mm}$ $t=1\text{mm}$ olan alüminyum kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, P: Polyamid, PP: Polipropilen

Şekil 4.9-10' da çeşitli polimerik malzemeler ile takviye edilmiş tüp kirişin yüzeyinde oluşan gerilmenin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi incelendiğinde, ilave edilen malzemelerin etkisiyle tüp kiriş yüzeyinde oluşan gerilmenin önemli ölçüde azaldığı dikkat çekmektedir.

Tüp yapıya farklı kalınlıklarda PP takviye edilmesiyle yüzeyde oluşan gerilmelerin değeri PP yerine kestamid takviye edilenlerde daha düşük seviyelerde kalmıştır (Şekil 4.9). Bu sebeple tüp yapıya ilk yapılacak takviye katmanı kestamid olarak belirlenmiştir. Kestamid malzemenin talaşlı işlemdeki zorluklarını göz önünde bulundurarak, uygun bir kalınlık değerinde ince cidarlı olarak sabit tuttuktan sonra içerisine farklı kalınlıklarda PP ilave edilmesi, uygun olacağı sonucuna ulaşılmıştır. Kestamid malzemenin yerine polyamid takviye ederek te grafikler elde edilmiş fakat polyamidin mekanik özellikleri kestamite çok yakın olduğundan grafiklerde önemli bir fark görülmemiştir. Buradan grafikteki kırmızı ile işaretlenmiş kombinasyonlardan üç nokta eğme deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir.

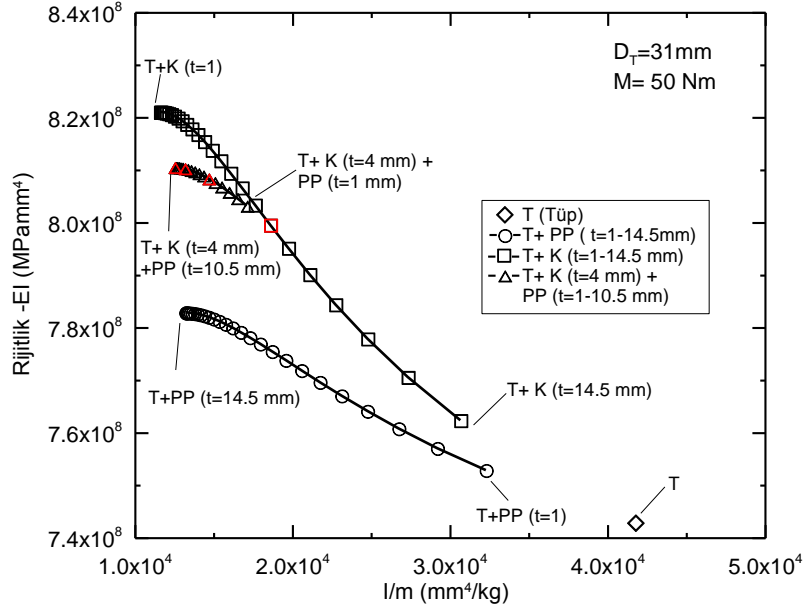
Eğme momenti artıçça tüpte ve takviye malzemelerindeki gerilmelerin akma dayanımını aşıp aşmayacağını belirlemek için farklı eğme momenti değerlerinde (50,

75, 100 ve 150 N.m) hesaplamalar yapılmıştır. T+K+PP(dolu) kombinasyonu için malzemeler üzerinde oluşan gerilmelerin eğme momentine göre değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir.

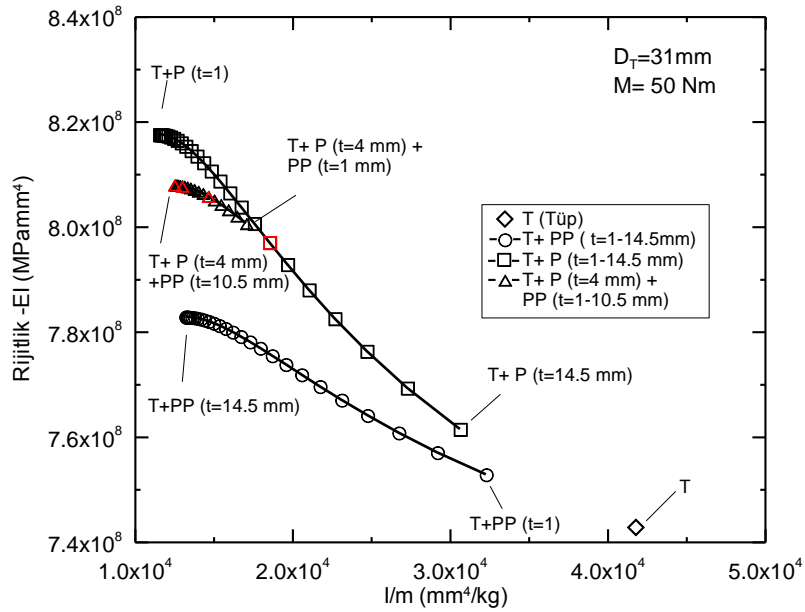


Şekil 4.11. Farklı eğme momenti değerlerinde (50, 75, 100 ve 150 N.m) T+K+PP(dolu) kombinasyonu için malzemeler üzerinde oluşan gerilmelerin eğme momentine göre değişimi

Şekilden görüldüğü gibi tüp yapıda 140 N.m eğme momenti değerinden sonra akma başlamaktadır. Diğer polimerik malzemelerde ise akma oluşmamaktadır. Şekil 4.12-13’de çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş tüp kirişin rijitliğinin *atalet momenti/ağırlık* oranıyla değişimi incelenmiştir. Bu grafikler incelendiğinde elastik sınırlar içerisinde takviye malzemelerinin ilave edilmesi rijitliği arttırmıştır.



Şekil 4.12. Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş $D=31\text{mm}$ $t=1\text{mm}$ olan alüminyum kirişin rijitliğinin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, PP: Polipropilen



Şekil 4.13. Çeşitli polimerik malzemelerle takviye edilmiş $D=31\text{mm}$ $t=1\text{mm}$ olan alüminyum tüp kirişin rijitliğinin atalet momenti/ağırlık oranıyla değişimi. T: Alüminyum tüp kiriş, P: Polyamid, PP: Polipropilen.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Bölüm 4.1.2 ve 4.2’de yapılan inceleme sonuçları göz önüne alınarak çalışmanın amacı ve ana hatları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Literatür üzerinde yapılan incelemelerden ince cidarlı yapıların, düşük yoğunluğa sahip gözenekli polimer veya metal esaslı malzemelerle içten takviye edilmesi, parçanın eğme zorlanması altında enerji absorbe etme kapasitesini belirgin bir şekilde arttırmasına rağmen, bu tür takviyenin yük taşıma kabiliyetini sınırlı oranda katkı sağladığı anlaşılmıştır. Eğme performansının arttırılması konusunda tüp yapıya dıştan yapılacak elyaf takviyesinin eğme davranışını önemli oranda geliştirdiği; elyaf yönlenmesi, sırası ve de tabaka sayısının parçanın genel olarak davranışını etkilediği tespit edilmiştir.

Tez çalışmasında, kiriş görevi gören tüp yapı ağırlığını çok fazla arttırmaksızın yük taşıma kabiliyetini geliştirmek amacıyla hem içten, hem de dıştan takviye imkanları üzerinde durulmuştur. Hazırlanacak yapıda tüp eksenine paralel, 0° yönlenmiş elyafın eğme zorlanmasını birinci dereceden göğüslediği, 90° yönlenmiş elyafın bulunması yapısal bütünlük için özellikle 0° elyafın burkulma göstermemesi için kullanıldığı sonucuna varılmıştır. Tasarlanan yapıların mekanik davranışlarının değerlendirilmesinde üç nokta eğme deneyinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda öncelikle ince cidarlı bir tüpün (takviyesiz) eğme zorlanması altındaki davranışını etkileyen değişkenler belirlenmiş ve bunların her birinin kuvvet-deplasman grafiğine olan etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Kuvvet-deplasman grafiğindeki bükülme deplasmanı ve elde edilen en büyük kuvvet değerinin tüp cidarında gerçekleşen plastik şekil değişimiyle olan ilişkisi sonlu elemanlar yöntemiyle detaylı olarak incelenmiş, daha sonra yapılacak veya yapılması gereken takviyenin yük taşıma kabiliyetine olan

etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Kompozit yapının tasarımına ait kararların alınmasında genel olarak aşağıdaki iki madde göz önüne alınmıştır;

- Kesit atalet momentini arttırılması
- Yükün taşıtılmasını ortak edilen takviye malzemesinin, hasar başlangıç mekanizmasını geciktirerek şekilde tasarlanması.

Buna göre çerçevede, içten takviyede nispeten düşük yoğunluklu olan polimerik esaslı (K ve PP), malzemelere, dıştan takviyede ise farklı yönlenmelere sahip elyaf malzemelere (cam ve karbon) yer verilmiştir. İçten takviyede kullanılacak malzemelerin sırası ve kalınlıklarına, temel mekanik esasların (Bölüm 3) yanı sıra imalata ait kısıtlar dikkate alınarak karar verilmiştir. Benzer şekilde, dıştan takviyede başvurulacak elyaf yönlenme çeşitlerinin belirlenmesinde de yine mekanik esaslar göz önüne alınmış, ancak nihai kararlar pilot deney sonuçlarına göre verilmiştir. Dıştan takviye edilecek kompozit kirişler için öncelikle, yük taşıma kabiliyeti üzerine en fazla katkı sağlayan elyaf yönlenmesi ve sırası belirlenmiş, daha sonra karar verilen bu tasarım, içten takviye edilen tüp yapıya uygulanarak uygun kombinasyonlar oluşturulmuştur.

Tüm tasarımlarda, özellikle ağırlığı minimum düzeyde arttıracak kompozit yapının belirlenmesine öncelik verilmiştir. Bu amaçla deneysel verilerin karşılaştırılmasında, en büyük taşıma kuvveti ve absorbe edilen enerji miktarının, parça ağırlığına oranlanmasıyla elde edilen, sırasıyla özgül yük taşıma kabiliyeti ve özgül enerji absorbe etme kabiliyeti değerleri hesaplanmıştır.

Takviyeli ve takviyesiz tüm durumlar için sonlu eleman modellemesine başvurulmuş, deneysel olarak elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri, analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

5.1. Deneysel Çalışmalar

5.1.1. Deneysel Malzemeler

5.1.1.1. Alüminyum (6063-T5) Boru

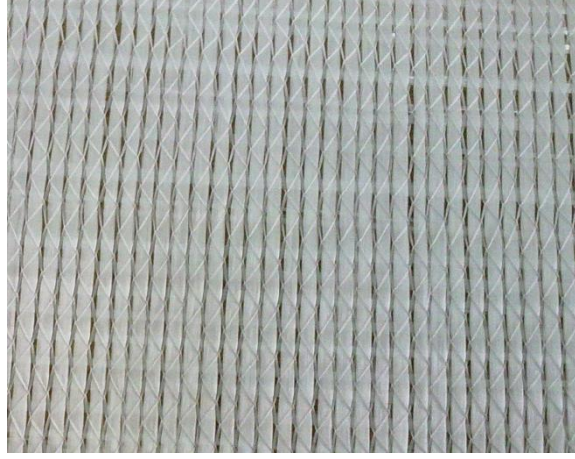
Deneysel çalışmalarda 19, 30 ve 31 mm çapları olan 6063-T5 alaşımına ait alüminyum boru kullanılmıştır. Ticari malzemelerden kuponlar kesilerek her bir boy için sertlik değeri, Webster sertlik ölçüm el aleti kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 5.1). Tez çalışmasında T5 koşullarına sahip boruların sertlikleri 65-70 HB aralığında değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.1. Alüminyum borudan alınan kuponlar üzerinden Webster sertlik ölçme el aleti

5.1.1.2. Elyaf Malzemeler

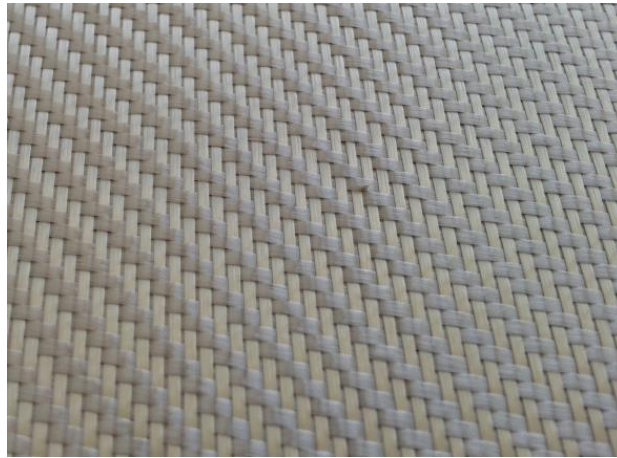
Alüminyum tüpün dıştan takviye edilmesinde 0° ve 90° yönlenme açılarında cam ve karbon elyaf ve ayrıca dokuma kumaş formunda yaklaşık olarak aynı kalınlıkta cam, aramid ve karbon elyaf kullanılmıştır. Tek eksenli cam ve karbon elyaf malzemeler Metyx firmasından, dokuma elyaf malzemeler ise Dost Kimya firmasından temin edilmiştir. Elyaf malzemelere ait fotoğraflar Şekil 5.2-5.6'da verilmiştir.



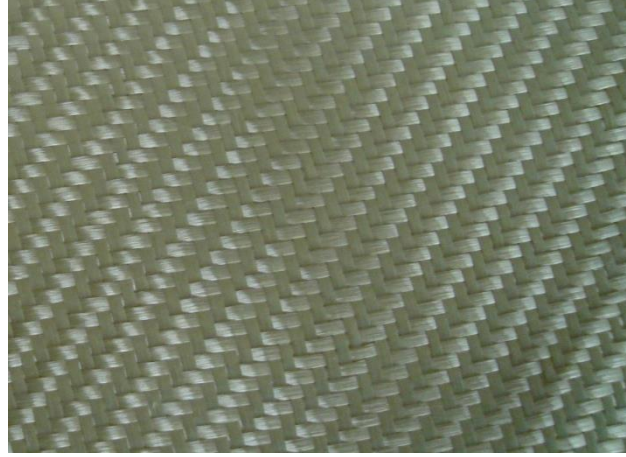
Şekil 5.2. 300 g/m² yoğunluğa sahip 0° (ve 90° sarıma bağlı) tek eksenli cam elyaf



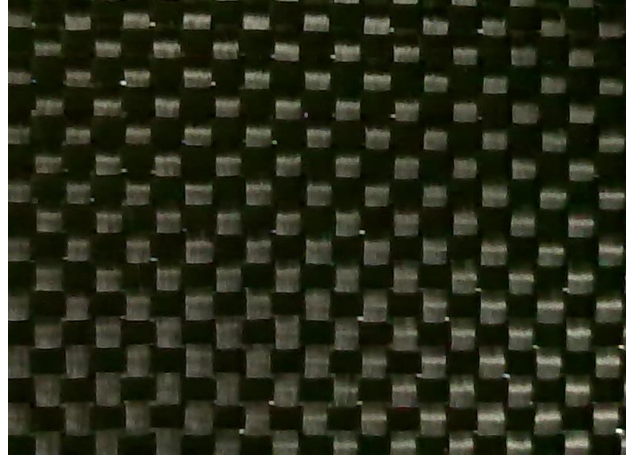
Şekil 5.3. 350 g/m² 0° (ve 90° sarıma bağlı) tek eksenli karbon elyaf



Şekil 5.4. 280 g/m²-twill cam elyaf kumaş



Şekil 5.5. 170 g/m²-twill aramid elyaf kumaş



Şekil 5.6. 200 g/m²-plain karbon elyaf kumaş

5.1.1.3. Polimerik malzemeler

Alüminyum tüp kirişe yapılacak içten takviyelerde, takviye malzemesi olarak, kestamit (K), polyamit (P) ve polipropilen (PP) kullanılmıştır. Tezin devam eden kısmında tanımlamanın daha kolay yapılabilmesi amacıyla bu malzemeler için sırasıyla K, P ve PP gösterimi tercih edilmiştir. Bu malzemelerin farklı çaplarda ve de içi boş olarak piyasadan temin edilememesi nedeniyle, tüm parçalar çubuk geometrisinden istenilen boyut ve cidar kalınlıklarına işlenmiştir.

5.1.1.4. Yapıştırıcı ve epoksi reçineler

Polimerik malzemeler tüp içine yerleştirilmesinde hafif sıkı geçme şeklinde işlenmiş olmasına rağmen, iç cidara yapıştırılması amacıyla ticari ismi Loctite 406 olan kimyasal kullanılmıştır. Elyaf, epoksi reçine ve sertleştirici kullanarak tüp yüzeyine sarılmıştır. Elyaf takviye işleminde ticari ismi MGS laminasyon olan epoksi seti kullanılmıştır. Epoksi ve sertleştiricinin karışım oranı ağırlıkça %40'tır.

5.1.2. Deney numunelerinin hazırlanması

5.1.2.1. Alüminyum tüp giriş ve polimerik malzemelere ait çekme deneyi numunelerinin hazırlanması

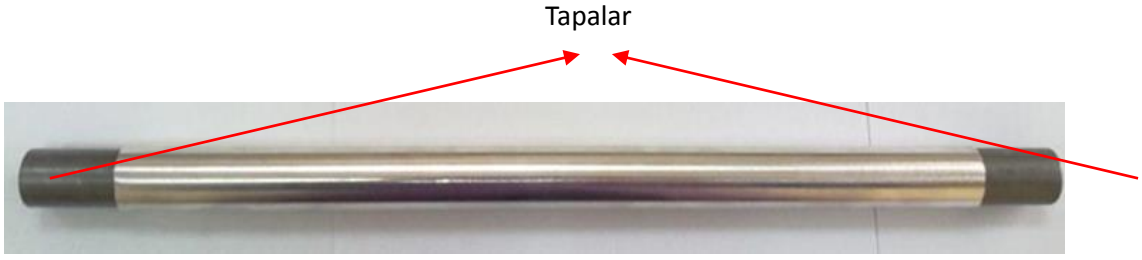
Deneylerde tüp olarak kullanılacak alüminyum borunun polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri 3 ton kapasiteye sahip Instron marka çekme makinasında polimerik malzemeler için 0,5 mm/s hızda, metal malzemeler için 0,1mm/s hızda gerçekleştirilmiştir.

Çapı 19 mm ($t=1$ mm) olan alüminyum borunun çekme deneyi için borudan ASTM-E8/E8M-09 standardına göre numune hazırlanmıştır. Çekme makinasının çenelerin tuttuğu kısımların ezilmemesi için bu kısımlarda boru içine tapalar yerleştirilmiştir. Tapaların boyutları standartlara uygun olarak hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan tapalara ait fotoğraflar Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Çapı 19 mm ($t=1$ mm) olan alüminyum tüp giriş için hazırlanan tapalar

Çekme numunesine ve tapaların boru içine yerleştirilmesine ait fotoğraf Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Tüp giriş çekme numunesine tapaların yerleştirilmesi

Tapaların boru uçlarına yerleştirilmesinden sonra çekme makinasının çenelerinin numuneyi uygun bir şekilde kavraması için numune boyutlarına uygun çeneler yapılmıştır. Çenelere ait fotoğraflar ve çenelerin boru çekme numunesine yerleştiriliş biçimi Şekil 5.9 ve 5.10'da gösterilmiştir.

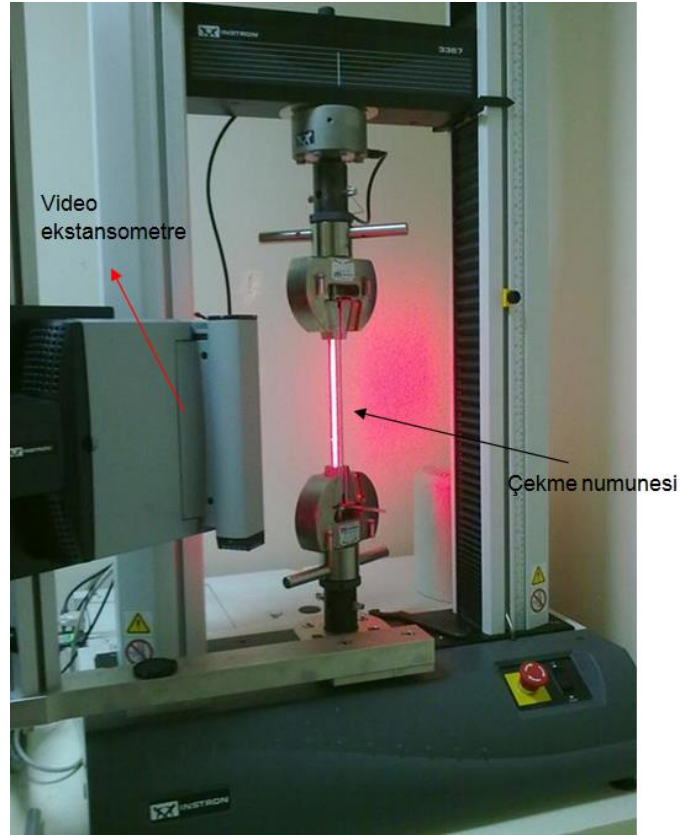


Şekil 5.9. 19 mm çaplı borunun çekme deneyi için hazırlanan çeneleri



Şekil 5.10. Çenelerin boru çekme numunesine yerleştiriliş biçimi (tapasız)

Çekme deneylerinin yapıldığı Instron marka cihazın görüntüsü Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11. Çekme deneylerinin yapıldığı Instron marka makina (boru numunenin çekme deneyine ait görüntü)

Standartlarda belirtildiği üzere çapı 25 mm den büyük borular için boru doğrultusunda çekme numunesi çıkartılarak çekme deneyi yapılmaktadır. Deneylerde çoğunlukla kullandığımız çapı 30 mm ve 31 mm cidar kalınlığı 1 mm olan borular için boru gövdesinden çekme numunesi çıkartılarak deneyler bunlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çapı 31 mm olan borudan çıkartılan çekme numunesine ait fotoğraf Şekil 5.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Çapı 31 mm olan alüminyum borudan çıkartılan çekme numunesi

Çapı 30 mm ve 31 mm olan boruların çekme numunelerinde kullanılmak üzere imal edilen çene aparatlarına ait fotoğraflar Şekil 5.13’de verilmiştir.



Şekil 5.13. Çekme çenesi (a) ve numunenin yerleştiriliş şekli (b)

Polimerik malzemeler için ASTM-D638-09 standardına göre çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Polimerik malzemelerden (kestamit, polyamit ve polipropilen) işlenmiş silindirik çekme numuneleri

5.1.2.2. Elyaf malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyi numunelerinin hazırlanması

Cam, aramid ve karbon dokuma elyaf kumaş ve tek eksenli cam ve karbon elyafın mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, basma ve kayma numuneleri hazırlanmıştır. İlk olarak elyaf kumaşlar düz bir zemin üzerinde el yatırması yöntemiyle epoksi katkısıyla birlikte plakalar şeklinde parçalar hazırlanmış (Şekil 5.15), daha sonra bu numuneler bir gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra düz zemin yüzeyinden ayrılarak 75 °C de 8 saat süreyle etüvde kürlenmiştir. Daha sonra

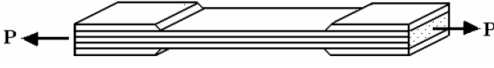
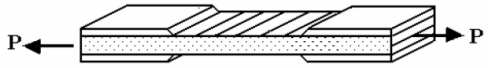
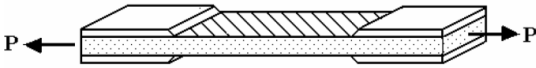
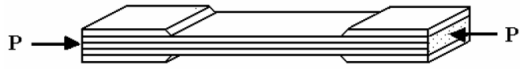
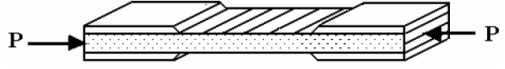
bu parçalardan çekme, basma ve kayma deney numuneleri standartlarına uygun olarak işlenmiştir. Çekme deneyi numuneleri ASTM D3039, basma deneyi numuneleri ASTM D 3410 ve kayma deneyi numuneleri ise ASTM D 3518 standartlarına göre hazırlanmıştır. Bazı deney numunelerinde çenelerin tuttuğu kısımda ezilme olmaması için bu kısımlara çelikten imal edilmiş plakalar yapıştırılmıştır.



Şekil 5.15. Deney numunelerinin elle yatırma yöntemiyle düz zemin üzerinde hazırlanışı

Deney numunesi standardı ve bu numuneyle belirlenen özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney numunesi standardı ve belirlenen özellikler

Belirlenebilen özellikler	Sembol	Geometri	ASTM test yöntemi
Eksenel veya boylamasına modül Eksenel poisson oranı Eksenel çekme dayanımı	E_1 (MPa) ν_{12} (-) X_C (MPa)		ASTM D 3039
Enlemesine modül Enlemesine poisson oranı Enlemesine çekme dayanımı	E_2 (MPa) ν_{21} (-) Y_C (MPa)		ASTM D 3039
Kayma modülü Kayma dayanımı	G_{12} (MPa) S (MPa)		ASTM D 3518
Boylamasına basma dayanımı	X_B (MPa)		ASTM D 3410
Enlemesine basma dayanımı	Y_B (MPa)		ASTM D 3410

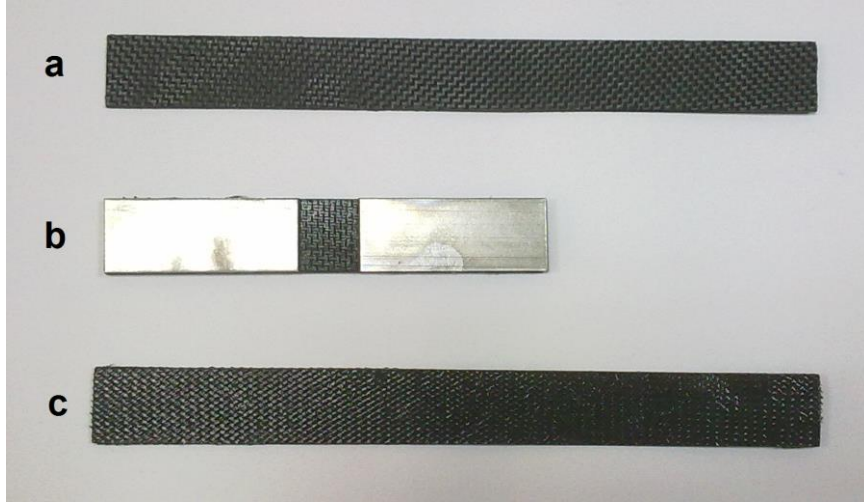
Çekme, basma ve kayma deney numunelerine ait fotoğraflar Şekil 5.16-20’de verilmiştir.



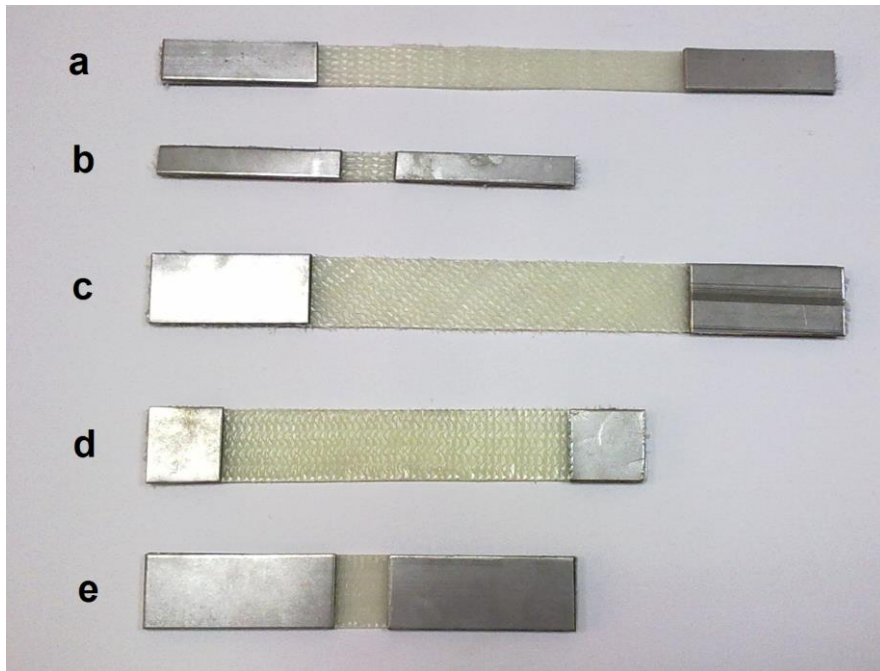
Şekil 5.16. Cam dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm)



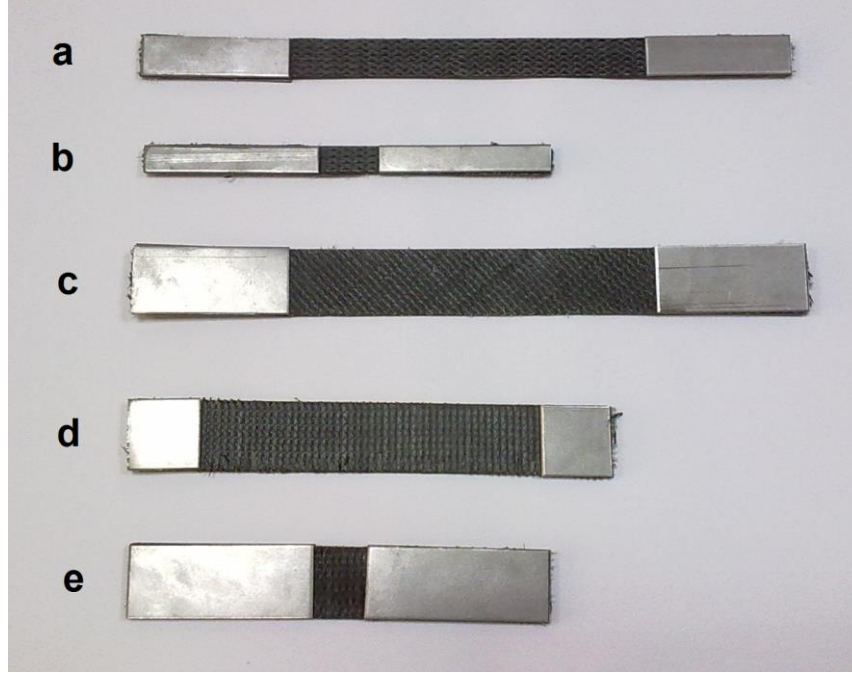
Şekil 5.17. Aramid dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm)



Şekil 5.18. Karbon dokuma elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) çekme numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm), b) basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 2.5 mm)



Şekil 5.19. Tek eksenli cam elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) boylamasına çekme numunesi (en:15 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), b) boylamasına basma numunesi (en: 10 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), d) enlemesine çekme numunesi (en:25 mm, boy: 175 mm, kalınlık: 2 mm), e) enlemesine basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm)



Şekil 5.20. Tek eksenli karbon elyaftan hazırlanan deney numuneleri a) boylamasına çekme numunesi (en:15 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), b) boylamasına basma numunesi (en: 10 mm, boy: 150 mm), c) kayma numunesi (en:25 mm, boy: 250 mm, kalınlık: 1 mm), d) enlemesine çekme numunesi (en:25 mm, boy: 175 mm, kalınlık: 2 mm), e) enlemesine basma numunesi (en:25 mm, boy: 150 mm)

Poisson oranının hesaplanmasında kullanılan şekil değişimleri için numune üzerine yatay ve dikey noktalar işaretlenmiş ve daha sonra video ekstansometre kullanılarak deneyler yapılmıştır (Şekil 5.21). Çekme ve kayma deneyleri 2 mm/dak çene hızında, basma deneyleri 1.5 mm/dak çene hızında gerçekleştirilmiştir.



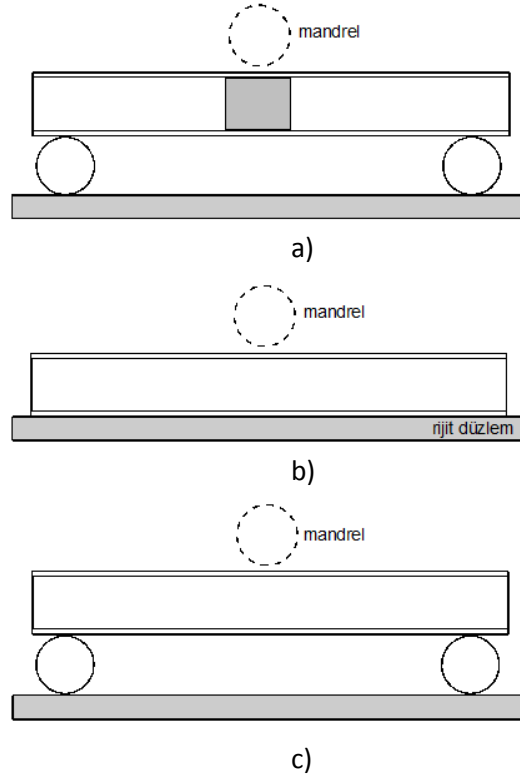
Şekil 5.21. Cam elyaftan hazırlanan çekme numunesine çekme deneyinin uygulanışı

5.1.2.3. Eğme deneyi numunelerinin hazırlanması

a) Üç nokta eğme deneyinde eğmenin ve cidardaki lokal burkulma deformasyonunun etkisini incelemek amacıyla hazırlanan numuneler

Bu kısımda, dairesel kesitli alüminyum tüp kirişin üç nokta eğme davranışı ve bu davranışa etki eden etkenlerin deneysel olarak incelenebilmesi için ayrıca numuneler tasarlanmıştır. Tüp yapının üç nokta eğme davranışında hem eğme, hem de cidarın lokal burkulması söz konusudur. Her birinin etkisini araştırmak amacıyla ayrı deneyler yapılmıştır. Alüminyum tüp kirişe düzlem üzerinde basma deneyi uygulanarak, sadece cidarda lokal burkulmanın etkisi incelenmiştir. Sadece eğme davranışını incelemek için ise tüp kiriş içerisine, mandrelin temas ettiği bölgeye mandrel genişliğinde dolu kesite sahip silindirik alüminyum parça yerleştirilmiştir. Tüp kiriş yapıda mandrel

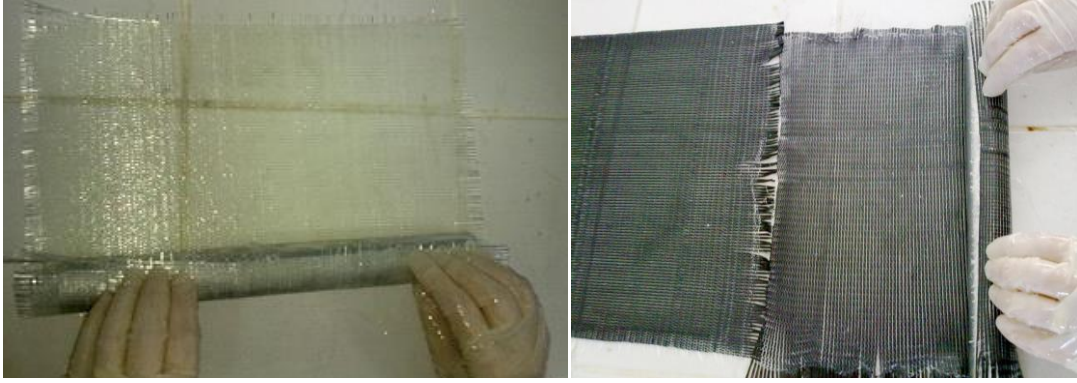
desteksiz eğme, düzlem basma ve mandrel destekli eğme deneylerine ait şematik gösterim Şekil 5.22’de verilmiştir.



Şekil 5.22. Tüp yapıda gerçekleştirilen deneyler a) mandrel destekli eğme, b) düzlem basma, c) mandrel desteksiz basit eğme

b) Dıştan ve içten takviyeli numuneler

Dıştan takviye edilecek tüp kiriş için, dokuma elyaflar uygun oranda (hacimce %50) karıştırılmış (epoksi+sertleştirici) kullanılarak ıslatma problemi yaşanmayacak şekilde tüpün etrafına sarılmış (Şekil 5.23), bir gün oda sıcaklığında ve daha sonra 8 saat 75°C sıcaklıkta kütleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Her bir numunede kullanılan karışımın miktarı katman sayına bağlı olarak kontrol edilmiş ve numuneler arasında farklılık oluşmamasına özen gösterilmiştir. Şekil 5.24’de kütleme sonrası bir grup deney numunesinin görünümü verilmiştir.



Şekil 5.23. Tüp kiriş yüzeyine elle yatırma yöntemiyle elyaf sarılması

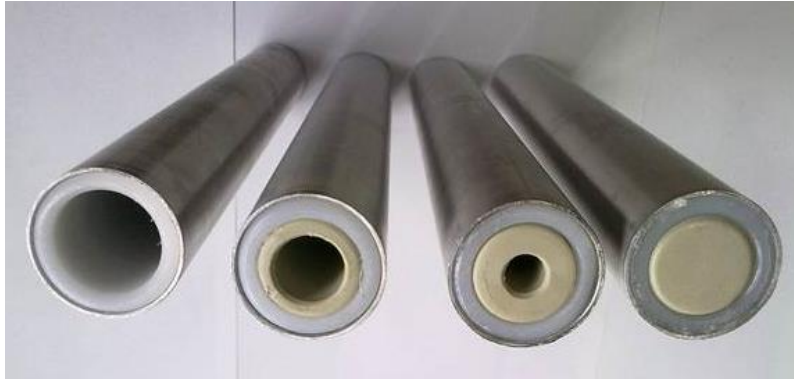


Şekil 5.24. Kütleme sonrası bir grup deney numunesinin görünümü

İçten polimerik malzemelerle (polyamit, kestamit ve polipropilen) takviye edilmiş 31 mm çaplı 1 mm cidar kalınlığındaki bir grup alüminyum tüp kirişin görünümü Şekil 5.25’de verilmiştir.



(a)



(b)

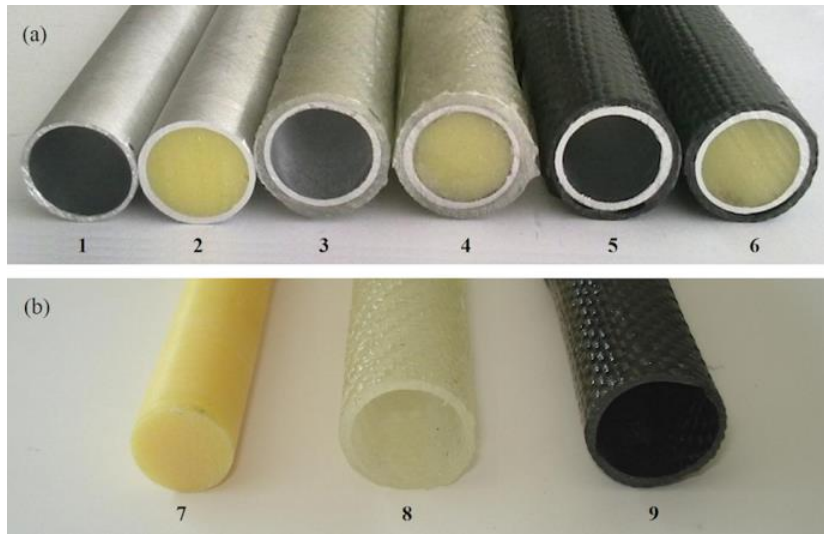
Şekil 5.25. Çeşitli polimerik malzemelerle içten takviye edilmiş $D=31$ mm $t=1$ mm olan alüminyum tüpler

Cam elyaf takviyeli kompozit kirişlerin katman sayısı 2, 4 ve 5 katman olarak öngörülmüştür. 2 katmanlı yapının elyaf dizilişi $[0_190_1]$, 4 katmanlı yapının dizilişi $[0_290_2]$ ve $[0_390_1]$, 5 katmanlı yapının dizilişi ise $[0_290_3]$ ve $[0_390_2]$ şeklindedir. Cam elyafın kullanıldığı dıştan takviyeli numunelerde elde edilen en iyi elyaf yönlenmesi ve sırası, karbon elyafı yapılar için de kullanılmıştır. Her iki elyaf takviyesi için katman sayısı beş olarak sabit tutulmuştur. Yapılan pilot deneylerden beş katmanlı yapı için $[0_290_3]$ yönlenmenin tercih edilebilir olduğu görülmüştür. Dıştan cam elyaf ve karbon elyaf takviye $[0_290_3]$ ile içten takviye edilerek oluşturulan kombinasyonlar birleştirilerek üretilen kombinasyonlara ait numune alın görüntüleri ise Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.26. İçten (kestamit ve polipropilen) ve dıştan (cam ve karbon elyaf) takviye edilmiş $D=31\text{ mm}$ $t=1\text{ mm}$ olan alüminyum tüpler

Çapı 19 mm cidar kalınlığı 1 mm olan alüminyum tüp kirişe içten kestamit ve dıştan 4 katman cam (280 g/m^2) ve karbon (200 g/m^2) dokuma elyaf takviye edilerek oluşturulan eğme deneyi numuneleri Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Çapı 19 mm olan tüp kiriş ile oluşturulan içten ve dıştan takviyeli kompozit kirişler

Çapı 30 mm olan alüminyum tüp kirişe sadece dıştan dokuma şeklindeki cam, aramid ve karbon elyaf kullanılarak oluşturulan hibrit kompozit kirişlere ait fotoğraflar Şekil 5.28’de verilmiştir.



Şekil 5.28. Çapı 30 mm olan alüminyum tüpte dokuma şeklindeki karbon, aramid ve cam elyaf kullanılarak oluşturulan kompozit kiriş yapılara ait eğme deneyi numuneleri

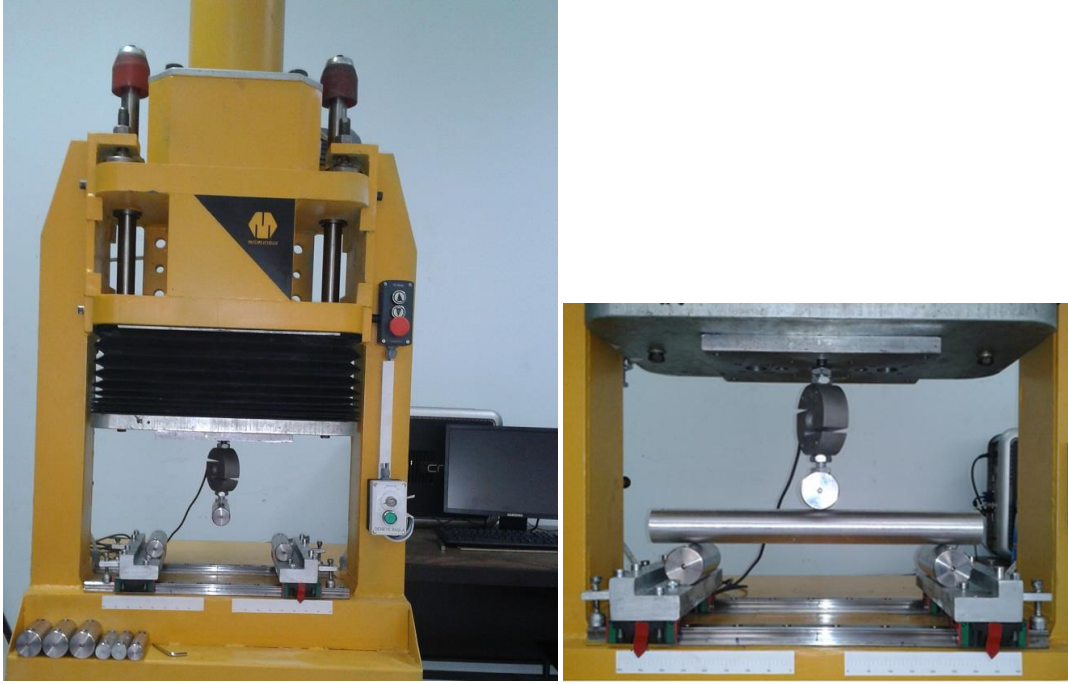
5.1.2.4. Burkulma deney numunelerinin hazırlanması

Numunelerin burkulma şartlarındaki yük taşıma kabiliyetlerinin belirlenebilmesi için kullanılacak numunenin çap ve uzunluğu, deneye uygun narinlik derecesini sağlayacak şekilde belirlenmiştir. buna göre 19 mm çapında ve 400 mm boyunda numunelerde çalışılmıştır.

Bu grup deney numunelerinin bir kısmı eğme deneylerinde kullanılmıştır. Numuneler içten (kestamit) ve dıştan (280 g/m^2 cam elyaf ve 200 g/m^2 karbon elyaf dokuma) takviye edilmiştir. Dıştan takviyede dokuma kalınlığı her iki elyaf için aynı olup, katman sayısı da dört olarak sabit tutulmuş ve eğme numunelerinde izlenen üretim aşamalarının aynısı, burkulma numunelerine de uygulanmıştır.

5.1.3. Eğme deneyi düzeneği

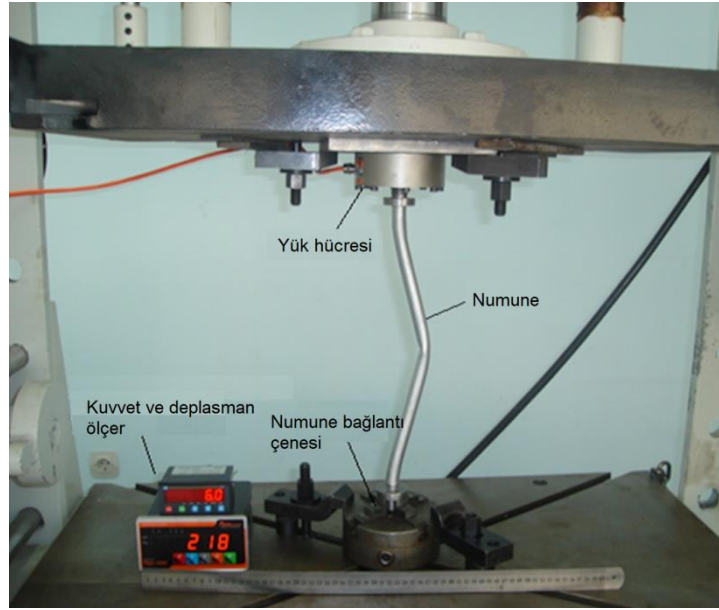
Eğme deneyleri, üniversitemiz bünyesinde yaptırılan, kontrol ve kalibrasyonu Tübitak-UME tarafından yapılmış 10 ton kapasiteli eğme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneylerinde aşağıdaki temel kurallar dikkate alınmıştır. Deneylerde numune boyunun (L) uzun tutularak eğilme etkisinin özellikle yüksek olması sağlanmıştır. Bu amaçla tüm deneylerde L/D oranının (D:numune çapı) 7 olmasına, ayrıca mesnet çapı ve mandrel çapının numune çapıyla aynı olmasına dikkat edilmiştir (Şekil 5.29).



Şekil 5.29. Üç nokta eğme deneylerinde kullanılan cihaz

5.1.4. Burkulma deneyi düzeneği

Burkulma deneyleri için iki ucu ankastre kiriş şartları altında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan düzenek Şekil 5.30'da verilmiştir. Buna göre parçanın bir ucu 10 ton kapasiteli yük hücreğine saplamayla (M24x3), diğer ucu ise yine ankastre şartlarını sağlayacak şekilde aynaya bağlanmıştır. Burkulma esnasında yanal kuvvetleri karşılayacak ve böylece bağlantı kesitinde yeteri rijitliği sağlamak üzere özel bağlantı aparatları kullanılmıştır. İki ucu ankastre şartları için etkin burkulma boyu, parça boyunun yarısı olması nedeniyle, parça boyu mümkün olduğunca uzun tutulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla 19 mm çaplı 1 mm cidar kalınlığındaki boru için 400 mm'lik boy seçilmiştir. Deneylerde yer değiştirmelerin ölçümünde lineer pozisyon sensörü (LVDT) kullanılmış ve burkulmanın plastik bölgede etkin olarak gerçekleşmesi için deneyler büyük deplasmanlara kadar devam edilmiştir.



Şekil 5.30. Burkulma deney düzeneği (tüp kirişin deneyine ait bir görüntü)

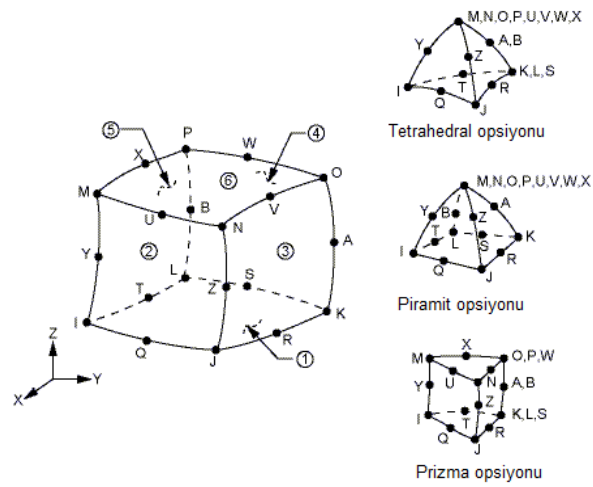
5.2. Sonlu Eleman Analizleri

Bu bölümde içten ve dıştan takviyeli kompozit kirişlerin sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Üç nokta eğme deneylerinin simülasyonu olan analizlerde ANSYS programı kullanılmış ve daha sonra deney ile analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Kompozit kirişi oluşturan parçaların malzeme değerleri için çekme deneylerinden alınan veriler kullanılmıştır. Deneysel çalışma her zaman çok ekonomik olmadığından simülasyon yardımıyla birçok model oluşturulabilmekte ve çıkan sonuçlar gerçeğe yakın bir şekilde elde edilmektedir.

ANSYS paket programı, mühendislik alanlarının birçoğunda karşılaşılan problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan çok amaçlı bir tasarım ve analiz programıdır. Bu program elastik ve plastik analizlerde doğru eleman, ağ (örgü) yapısı, malzeme modeli kullanıldığında ve sınır şartları da gerçek durumu temsil eder bir şekilde belirlendiğinde çok büyük bir yakınsamayla doğru sonuçlar vermektedir. Bu tezde tasarımı yapılan kompozit kirişlerin üç nokta eğme deneyi simülasyonları ANSYS' de yapılmıştır.

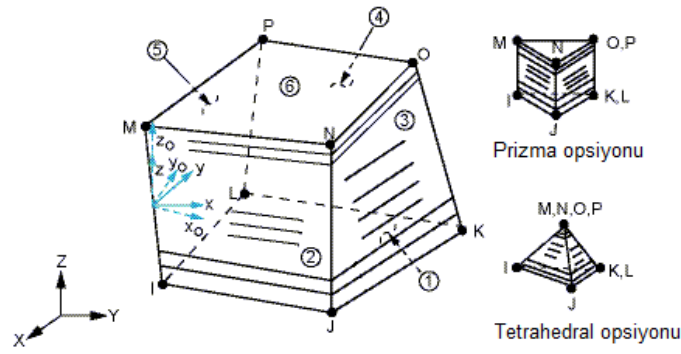
5.2.1. Eleman tipi

Kompozit kirişlerin sonlu eleman analizlerinde Solid 95 ve Solid 46 eleman tipleri kullanılmıştır. Solid 95 elemanı kompozit kirişlerin analizinde alüminyum tüp, çelik mesnet ve mandrel ve polimerik esaslı malzemeler için kullanılmıştır (Şekil 5.31). Bu eleman 20 düğüm noktası ile tanımlanmıştır. Elemanın her bir düğüm noktasının 3 serbestlik derecesi vardır. Bunlar; x,y, ve z eksenlerindeki doğrusal harekettir. Elemanın plastikliği, büyük esnemelere dayanma özelliği ve oldukça fazla şekil değiştirme özelliği vardır.



Şekil 5.31. Solid 95 elemanı [73]

SOLID 46 elemanı kompozit kirişlerde dıştan takviye olarak kullanılan elyaf malzemeleri modellemek için kullanılmıştır. Bu eleman 8 düğüm noktasına sahip olup, tabakalı malzemelerin modellenmesinde kullanılmaktadır (Şekil 5.32). 250'ye kadar tabaka bir eleman içinde modellenebilir. Elemanın her bir düğüm noktasının 3 serbestlik derecesi vardır. Bunlar; x,y, ve z eksenlerindeki doğrusal harekettir. Her tabakadaki gerilme ve şekil değiştirme değerleri hesaplanabilir.



Şekil 5.32. Solid 46 elemanı [73]

Kompozit kirişlerin üç nokta eğme ve burkulma sonlu eleman analizlerinde kompozit kiriş/mandrel ve kompozit kiriş/mesnet arasında temas tanımlanmıştır. Bu bölgelerde temas elemanları (TARGE 170, CONTA 174) kullanılmıştır. Temasın tanımlandığı bölgelerde 0.2 sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Literatür incelendiğinde genellikle kompozit ile metal arasında sürtünme katsayısı olarak 0.2 alınmıştır [65]. Dolayısıyla bu çalışmada da bu değer kullanılmıştır.

5.2.2. Malzeme modelleri

Sonlu elemanlar analizinde elde edilecek sonuçlar, seçilen malzeme modeline bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Kullanılan malzeme modeline bağlı olarak, kullanılan formülasyon ve sonuçta elde edilen deformasyon değerleri değişmektedir. Bunun nedeni ise değişik malzeme modellerinin farklı parametreleri dikkate alması ve bazı faktörleri ise ihmal etmesidir. Bu nedenle ihmal edilecek faktörlerin ve ağırlık derecelerinin kullanıcı tarafından doğru olarak belirlenmesi ve buna bağlı olarak uygun malzeme modelinin kullanılması gerekmektedir.

Analizlerde her malzeme kendi özellik ve davranışına göre farklı malzeme modelini kullanmaktadır. Çelik, lastik, köpük, beton, polimer, kompozit vb. malzemeler farklı yapıda oldukları için verecekleri tepkilerde değişmektedir. Her malzemenin deformasyon şekli, hem yapısına hem de analiz tipine (statik, dinamik, çarpma, termal, manyetik vb.) göre değişiklikler göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı malzeme modeli en önemli kısımlardan birini oluşturmaktadır. Analiz için öncelikle çalışmanın

hangi aralıkta olacağı tespit edilmelidir (elastik, plastik deformasyon bölgesi). Bu aşamadan sonra malzemeyi en iyi tanımlayan malzeme modeli seçilmelidir.

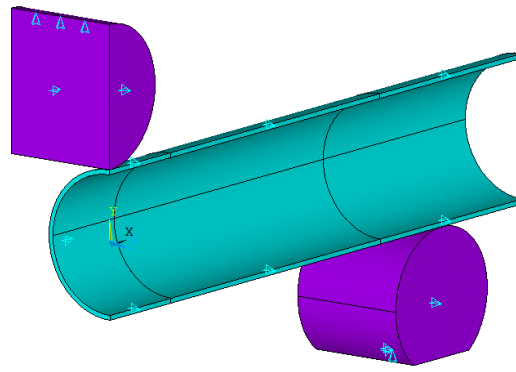
Bu çalışmada kullanılan metal (alüminyum tüp kiriş, çelik mandrel ve mesnet) ve polimerik malzemeler için izotropik malzeme modeli, elyaf esaslı malzemeler için ise ortotropik malzeme özelliklerinin içeren malzeme modeli kullanılmıştır. Çekme verilerinden elde edilen değerler analize girilmiştir.

İzotropik malzeme, bir malzemenin tüm yönlerde tüm özelliklerinin aynı olduğu durumu ifade etmektedir. İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin boyutu büyümekte ve genişlemektedir; ama düzlemdeki merkezi aynı kalmaktadır. Bu malzeme modelinde malzemenin gerilme-zorlanma davranışını tanımlamak için elastik ve plastik olmak üzere iki eğri mevcuttur. Bu malzeme modeli zorlanma parametrelerinden bağımsız olmaktadır.

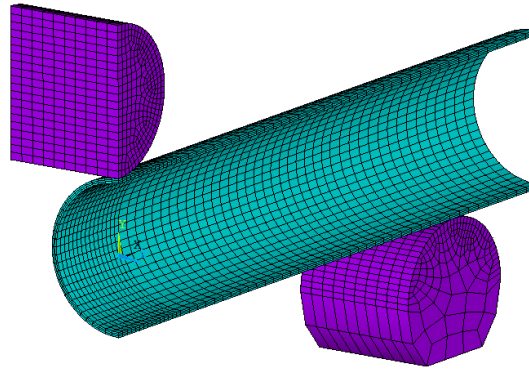
Ortotropik malzemelerin dayanım karakterlerine bağlı olan teoriler, izotropik olanlardan daha karmaşıktır. Ortotropik malzemelerin analiz sonuçları üç temel ekseninde aksel dayanım özelliklerine bağlıdır. Bunlar; elastik modülü, poisson's oranı ve dayanım karakteristikleridir.

5.2.3. Malzeme özellikleri, sınır şartlar ve yükleme koşulları

Analizler tam modelin 1/4 ünü oluşturan çeyrek-simetri model üzerinde gerçekleştirilmiştir. Cidar kalınlığı boyunca gerilme dağılımının detaylı olarak incelenebilmesi için 3 eleman kullanılmıştır. Tüpte yükleme esnasında büyük deformasyonlar söz konusu olduğundan analizde nonlinear geometri özelliği açık tutulmuştur. Analizler deplasman kontrollü olup, belirli aralıklarda deplasman adımları küçük tutulmuştur. Kirişin deneysel olarak belirlenen en büyük kuvvetin görüldüğü deplasman değerlerinde ve özellikle elastik bölgede ilerleme aralığı daha sık verilmiştir. Bu amaçla çözümler makro dosyası oluşturularak yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde örnek olarak sadece takviyesiz bir tüp kirişe ait, sınır şartları ve elemanlara bölünmüş ¼ simetrik modellere ait görüntüleri sırasıyla Şekil 5.33- a ve b'de verilmiştir. .



(a)



(b)

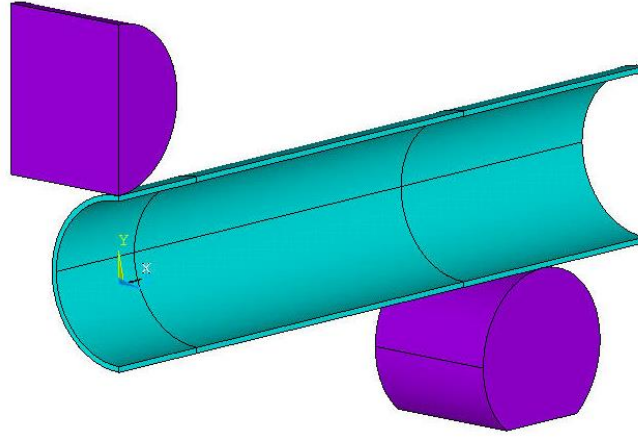
Şekil 5.33. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan çeyrek simetri model (a) sınır şartları gösterilmiş model (b) elemanlara bölünmüş model

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

5.2.4. Sonlu eleman analiz modelleri

5.2.4.1. Alüminyum tüp kirişin üç nokta eğme modeli

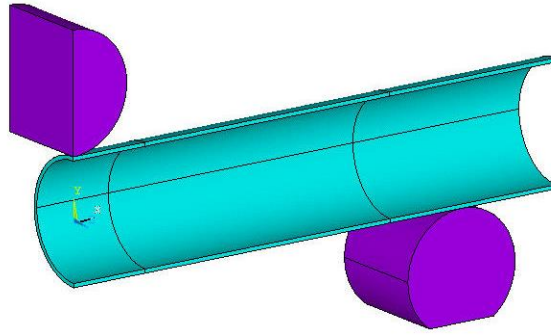
Eğme zorlanması altındaki davranışı ayrıntılı bir şekilde incelenecek olan alüminyum tüp kirişin sonlu eleman modeli Şekil 5.34’de verilmiştir.



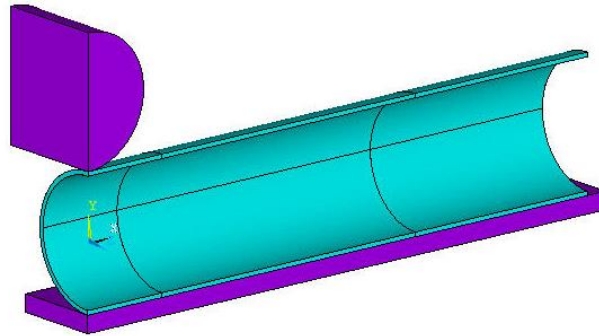
Şekil 5.34. Alüminyum tüp kirişe ait sonlu eleman modeli

5.2.4.2. Üç nokta eğmenin ve cidardaki lokal burkulma etkisinin incelendiği modeller

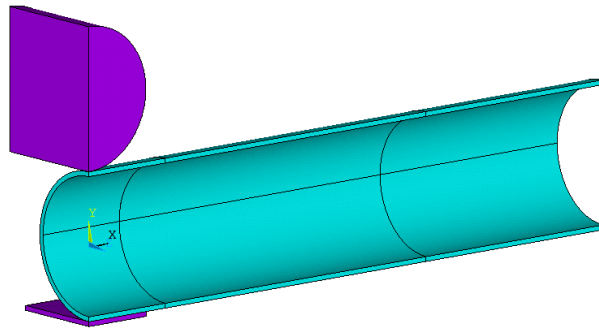
Alüminyum tüpün üç nokta eğme deneyinde, tüpteki etkin olan eğilme ve cidarındaki lokal burkulmanın detaylı olarak incelenebilmesi için, bu konuyla ilgili deneysel çalışmaya ek olarak, sonlu eleman analizleri planlanmıştır. Bu amaçla, sadece cidarda lokal burkulmanın etkisini incelemek amacıyla tüp kirişin düzlem üzerinde basma modeli, sadece lokal burkulmanın etkisinin incelenmesi amacıyla ikinci olarak mandrel genişliğinde düzlem üzerinde basma modeli, sadece eğme davranışını incelemek için ise tüp kiriş içerisine mandrelin temas ettiği bölgeye mandrel genişliğinde dolu kesite sahip alüminyum yerleştirilerek eğme deney modeli ve son olarak hem eğme hem de burkulma davranışının gözlendiği üç nokta eğme deney modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan modellere ait resimler Şekil 5.35-38’de verilmiştir.



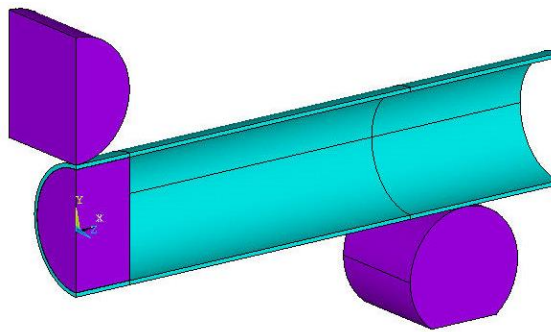
Şekil 5.35. Tüp kiriş yapıdaki mandrel desteksiz basit eğme modeli (Eğme ve lokal burkulma oluşumu)



Şekil 5.36. Tüp kiriş yapıdaki düzlem basma modeli (Sadece lokal burkulma durumu)



Şekil 5.37. Tüp kiriş yapıdaki mandrel genişliğindeki düzlem üzerinde basma modeli (Sadece lokal burkulma durumu)



Şekil 5.38. Tüp kiriş yapıdaki mandrel destekli eğme modeli (Sadece eğme durumu)

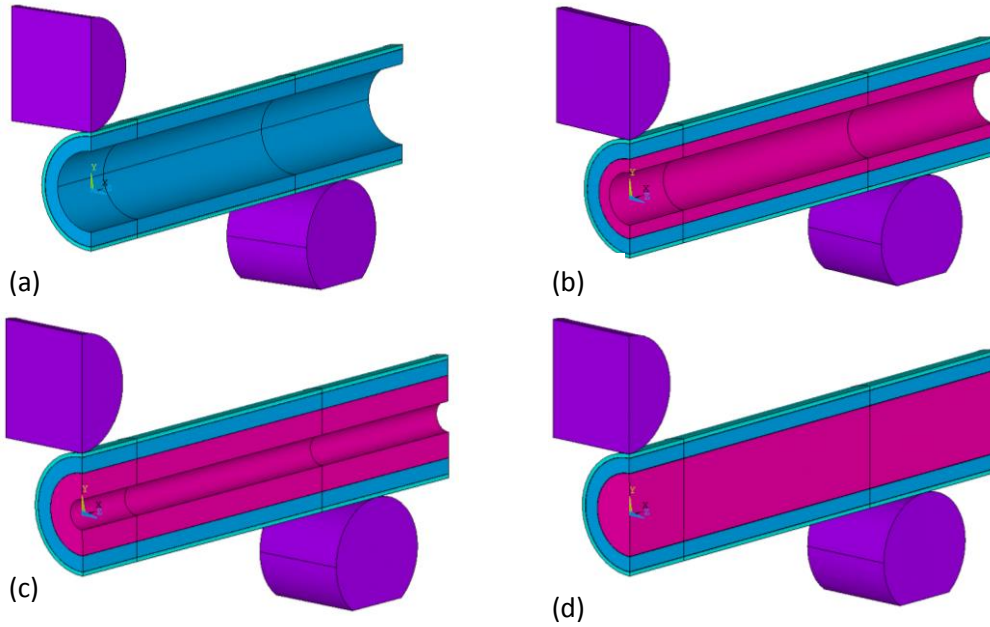
5.2.4.3. Tüp yapının eğme davranışına etki eden etmenlerin sonlu eleman analizleriyle incelenmesi

Bu bölümde, aynı malzeme özelliği için, eğme deformasyonuna etki eden geometrik ve malzemeye bağlı özellikler sonlu eleman analizleriyle incelenecektir. Bu değişkenler aşağıda sıralanmıştır;

- Cidar kalınlığı
- Tüp çapı ve mesnetler arası mesafenin etkisi
- Mandrel çapı
- Malzemenin mekanik özellikleri

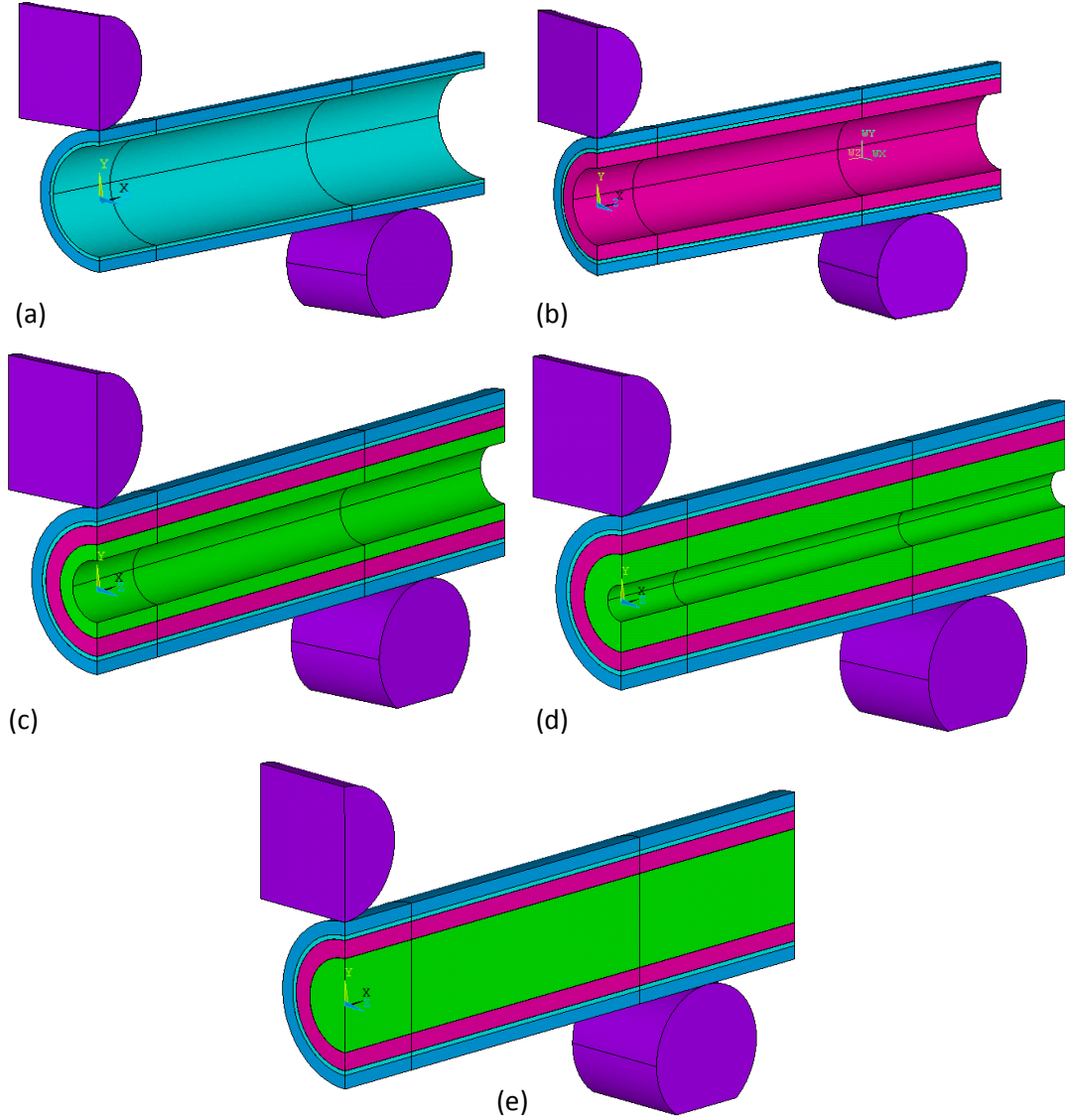
5.2.4.4. 31 mm çaplı tüp kirişe ait içten ve dıştan takviyeli numunelerin sonlu eleman analizleri

Çapı 31 mm olan tüp kirişe ait içten takviyeli kompozit kirişlerin sonlu eleman analiz modelleri Şekil 5.39'da verilmiştir.



Şekil 5.39. Çapı 31 mm olan tüp kirişe ait içten takviyeli kompozit kirişlerin modelleri a) T+K (t=4 mm) b) T+K (t=4 mm)+PP (t=3.5 mm) c) T+K (t=4 mm)+PP (t=6.5 mm) d) T+K (t=4 mm)+PP (dolu)

İçten ve dıştan (cam elyaf) takviyeli çapı 31 mm olan tüp yapının Tsai-Wu hasar kriteri uygulanarak eğme davranışının incelenmesinde kullanılan sonlu eleman modelleri Şekil 5. 40'da verilmiştir.



Şekil 5.40. Çapı 31 mm olan tüp kirişe ait içten ve dıştan (cam veya karbon elyaf) takviyeli kompozit kirişlerin modelleri a) CE/KE+T+K (t=4 mm) b) CE/KE+T+K (t=4 mm) c) CE/KE+T+K (t=4 mm)+PP (t=3.5 mm) d) CE/KE+T+K (t=4 mm) + PP (t=6.5 mm) e) CE/KE+T+K (t=4 mm) + PP (dolu)

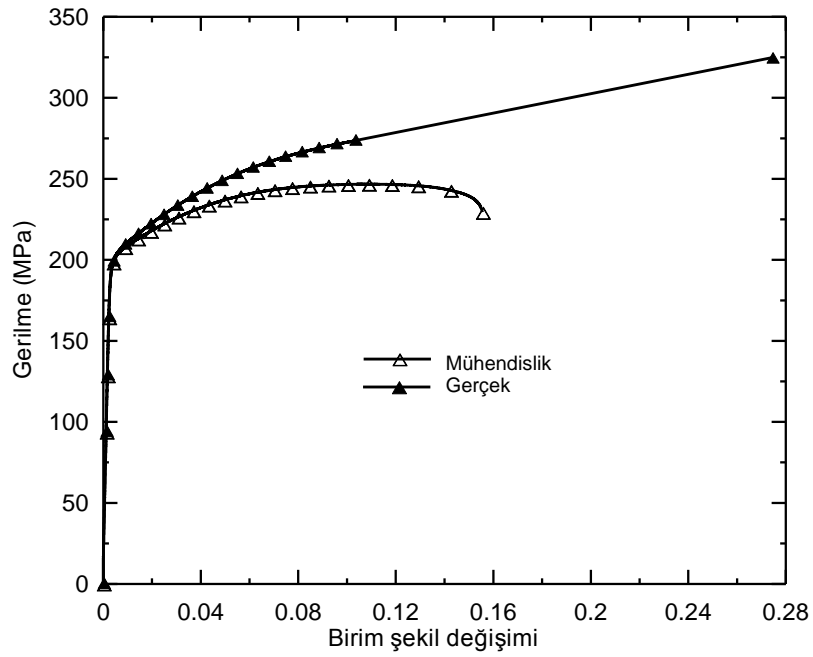
BÖLÜM 6. DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI

6.1. Deneysel Sonuçlar

Tüm deneyler en az üçer defa tekrarlanmıştır.

6.1.1. Alüminyum tüp ve polimerik malzemelere ait çekme deneyi sonuçları

19 mm çaplı ($t=1$ mm) olan alüminyum tüpün çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrisi ve çekme deneyi sonrası görünümü Şekil 6.1-6.2'da verilmiştir.

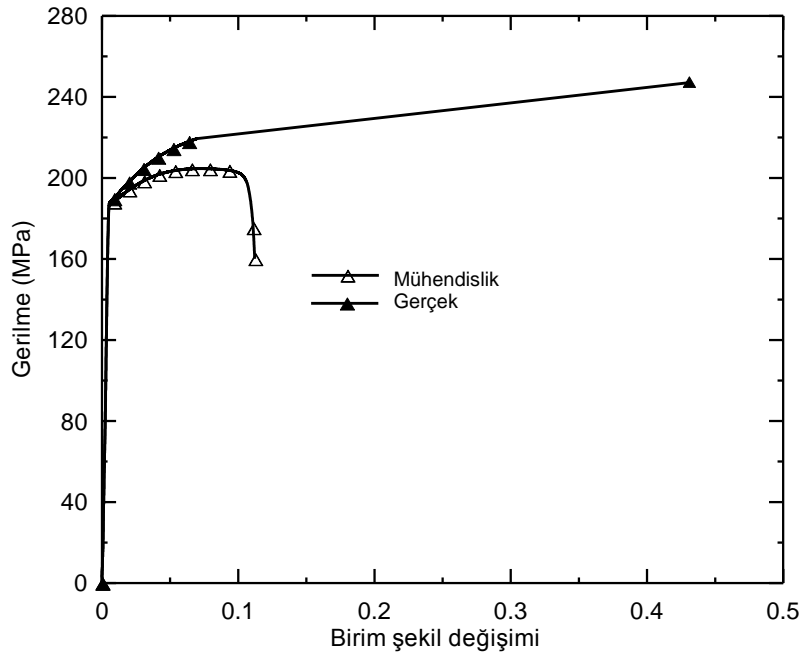


Şekil 6.1. 19 mm çaplı alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi

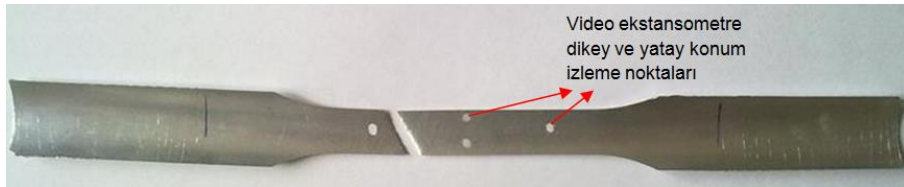


Şekil 6.2. Numunenin (19 mm çaplı tüp) çekme deneyi sonrası görüntüsü

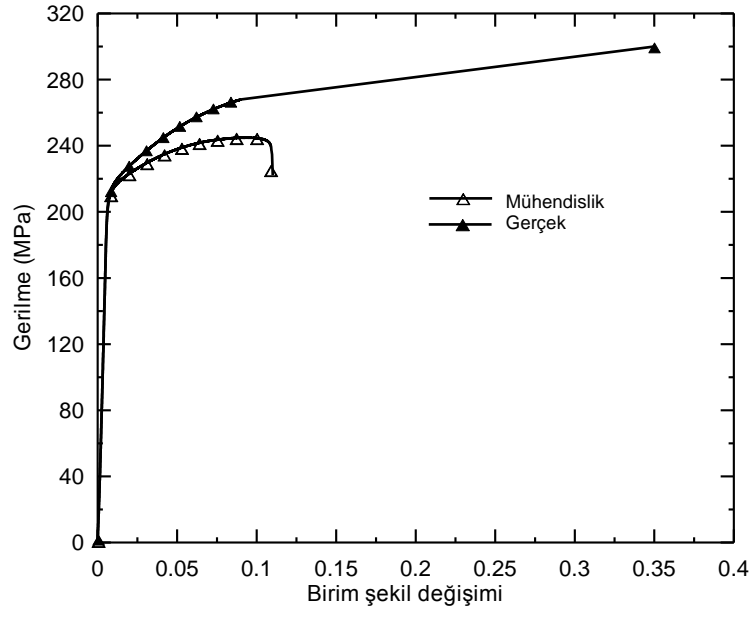
Çapı 31 ve 30 mm olan alüminyum tüplere ait çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değişim eğrileri ve deney sonrası numunelerin görünüşleri Şekil 6.3-6.6' da verilmiştir.



Şekil 6.3. 31 mm çaplı alüminyum tüpe ait numunenin gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



Şekil 6.4. 31 mm çaplı tüpten işlenen numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü

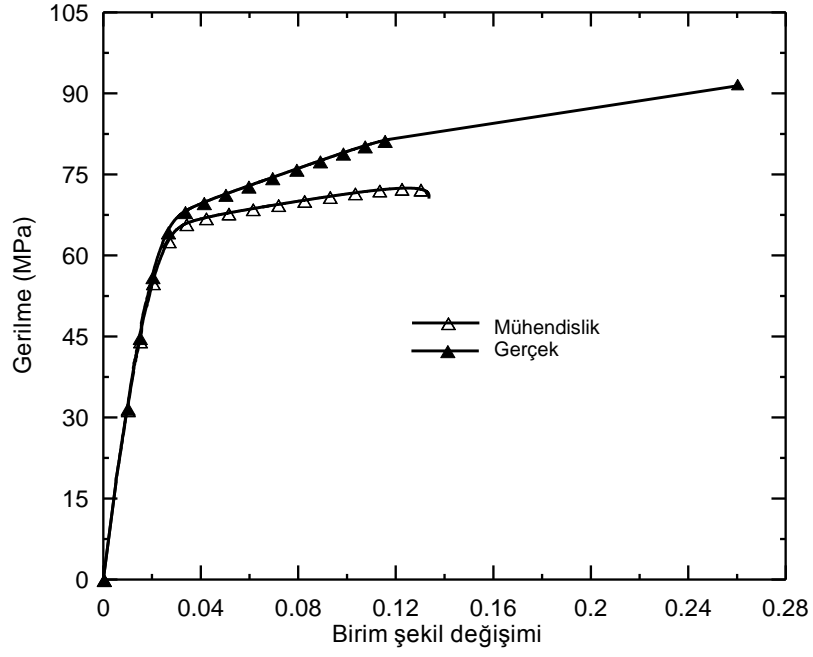


Şekil 6.5. Çapı 30 mm olan alüminyum tüpe ait numunenin gerilme birim şekil değişimi eğrisi

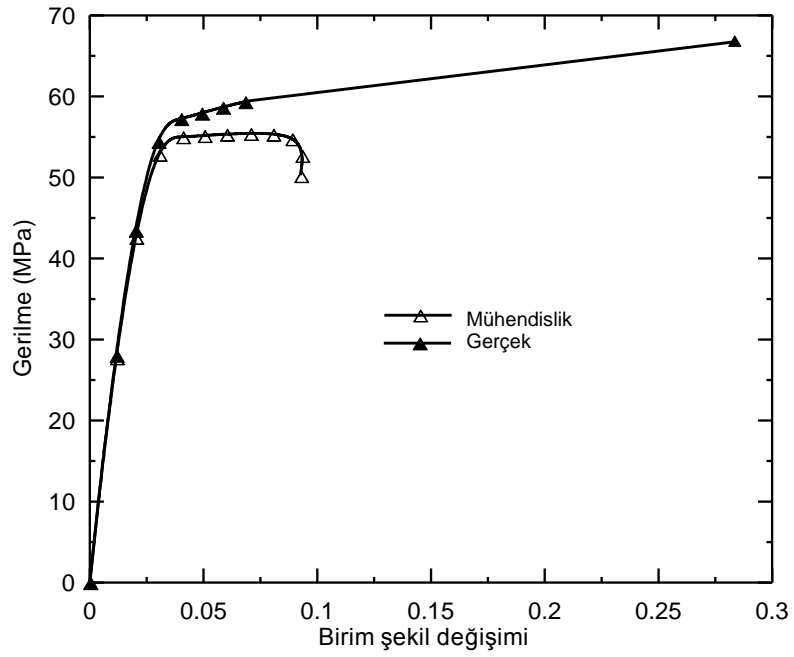


Şekil 6.6. Çapı 30 mm olan alüminyum tüpün çekme deneyi sonrası görüntüsü

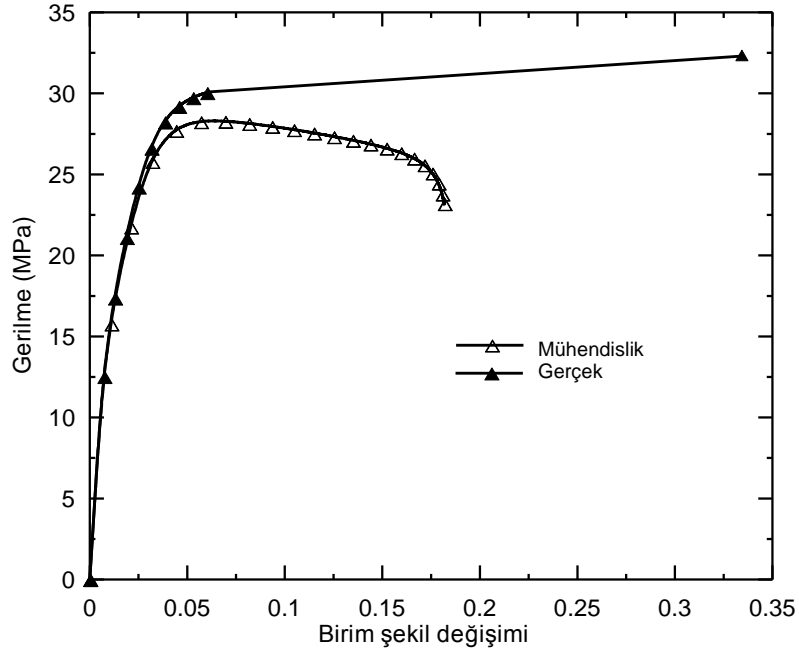
Kestamid, polyamid ve polipropilen malzemelere ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri sırasıyla Şekil 6.7-6.9'da ve çekme deneyi sonrası görünümü Şekil 6.10'da toplu olarak verilmiştir.



Şekil 6.7. Kestamid malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



Şekil 6.8. Polyamid malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



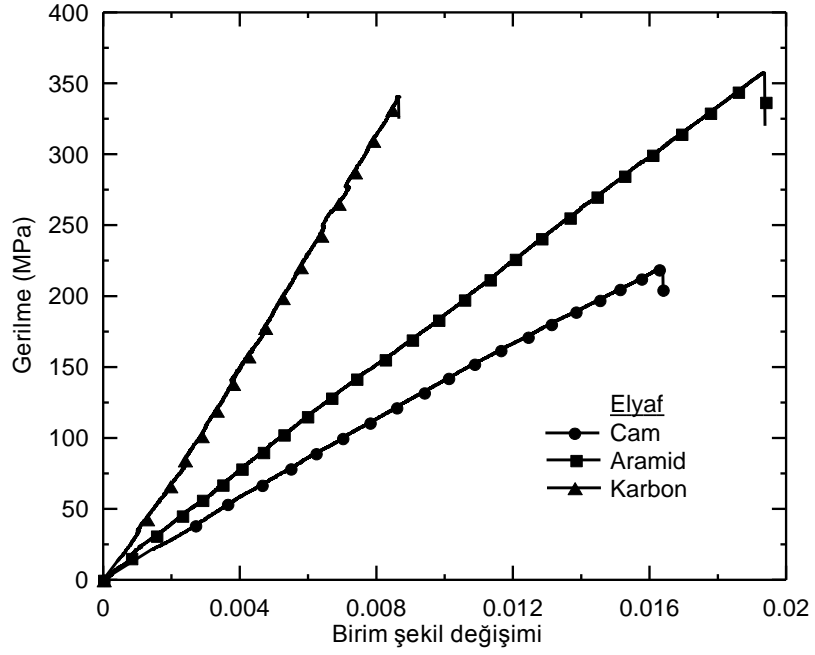
Şekil 6.9. Polipropilen malzemesine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrisi



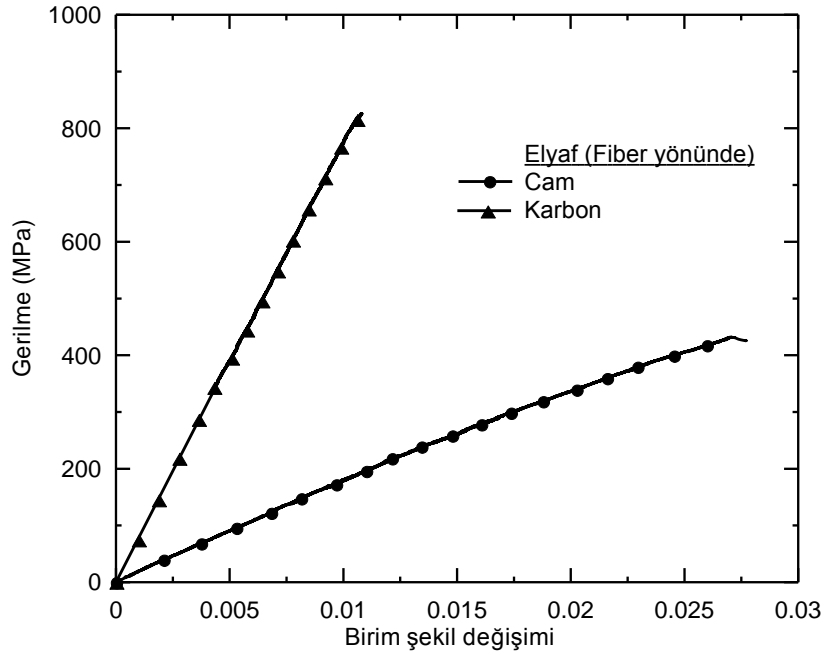
Şekil 6.10. Polimerik malzemelerin çekme deneyi sonrası görüntüleri

6.1.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyi sonuçları

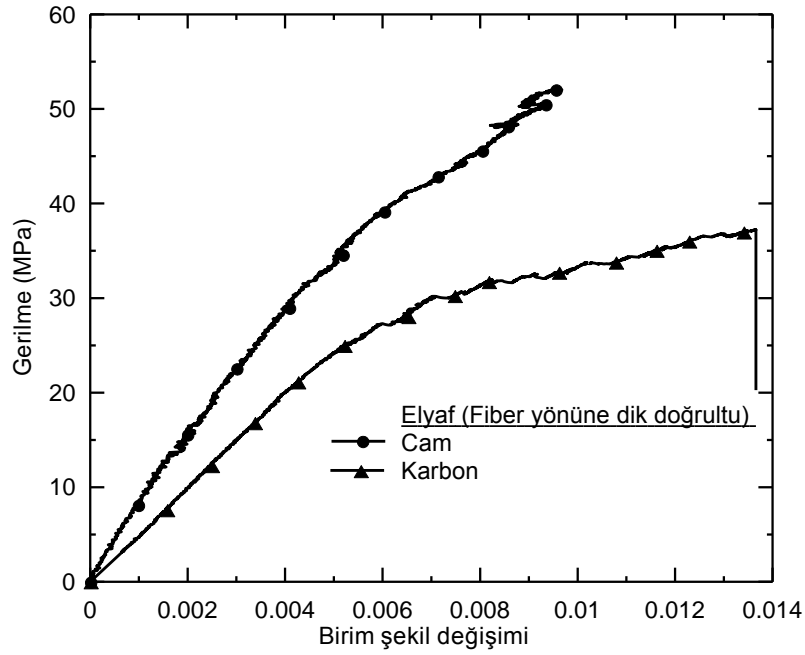
Dokuma ve tek eksenli elyaf takviyeli kompozitlerin çekme deneyi sonuçları Şekil 6.11-6.13'de verilmiştir.



Şekil 6.11. Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

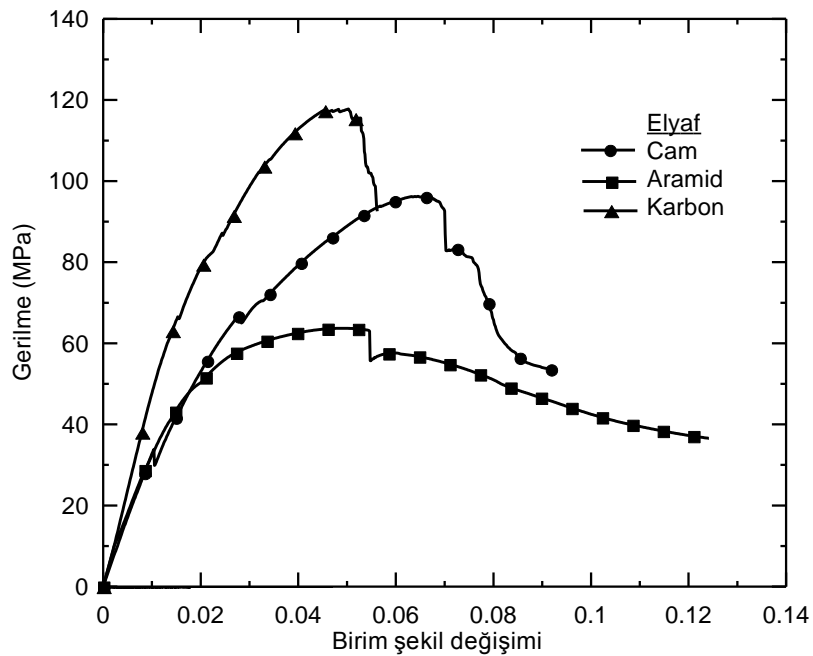


Şekil 6.12. Tek eksenli (boylamasına) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

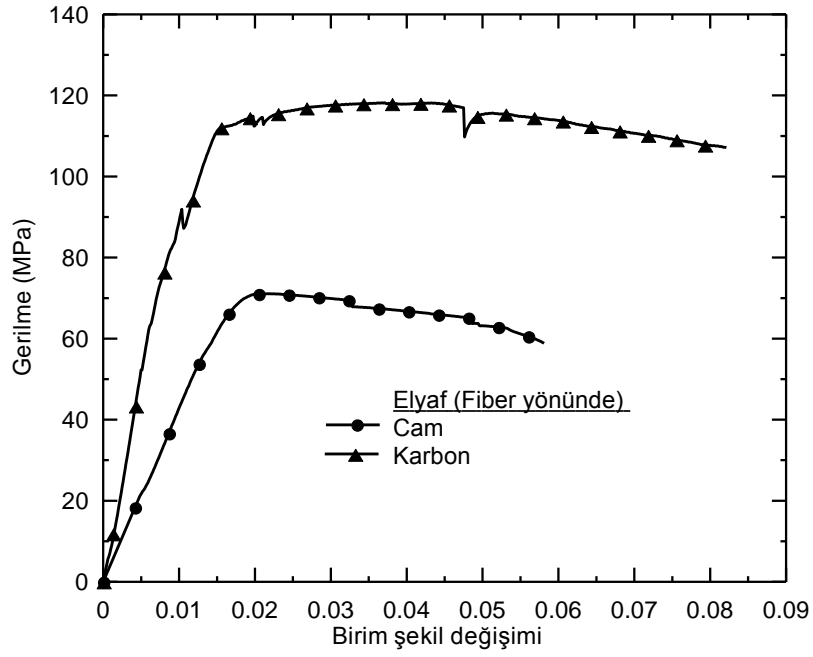


Şekil 6.13. Tek eksenli (enlemesine) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

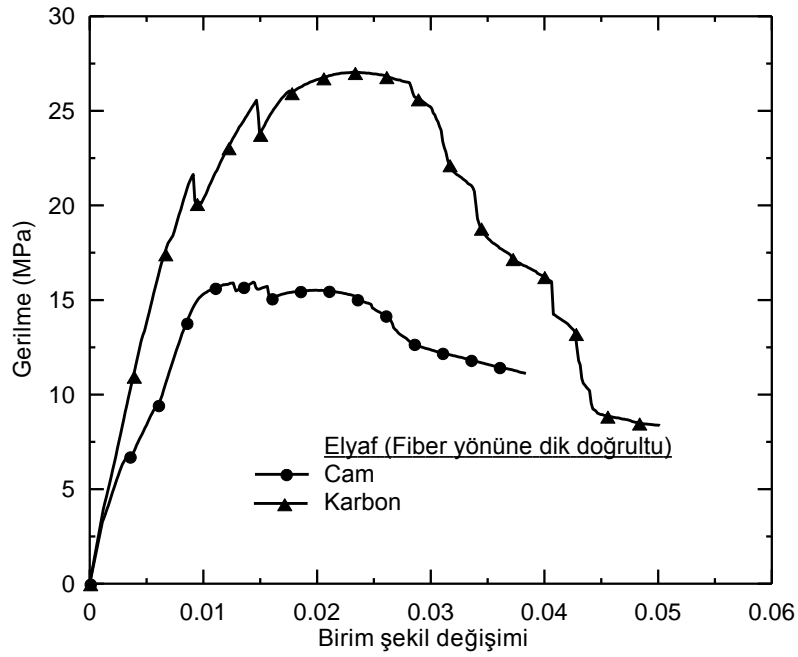
Dokuma ve tek eksenli elyaf kumaşların basma deneyi sonuçları Şekil 6.14-6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.14. Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

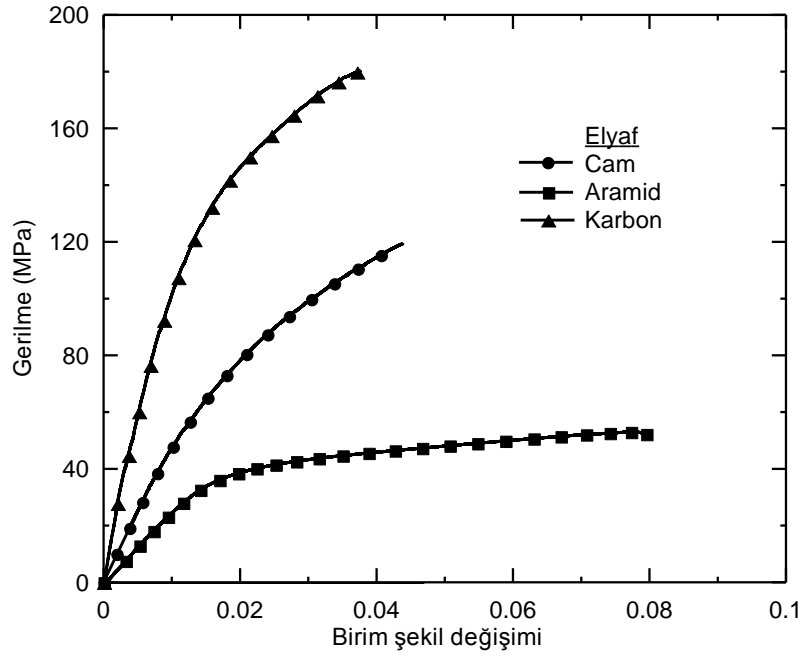


Şekil 6.15. Tek eksenli (boylamasına) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

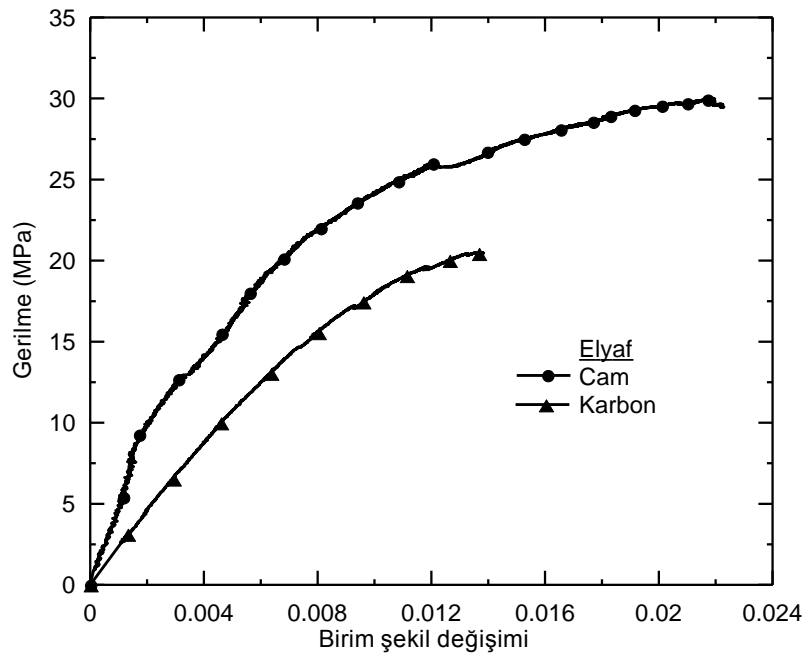


Şekil 6.16. Tek eksenli (enlemesine) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin basma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

Dokuma ve tek eksenli elyaf kumaşların kayma deneyi sonuçları Şekil 6.17-6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Dokuma cam, aramid ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin (45° yönlenmiş) kayma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri



Şekil 6.18. Tek eksenli (45° yönlenmiş) cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kayma deneylerine ait gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

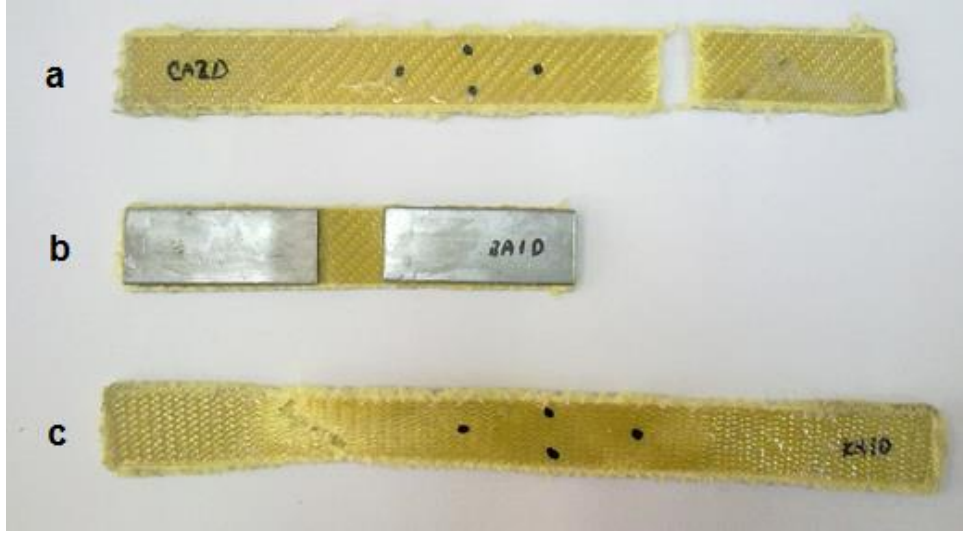
Kompozit malzemelere ait numunelerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası görüntüleri Şekil 6.19-6.23’de verilmiştir.



Şekil 6.19. Cam dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri



Şekil 6.20. Karbon dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri



Şekil 6.21. Aramid dokuma elyaf takviyeli kompozitin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri



Şekil 6.22. Tek eksenli (enlemesine ve boylamasına) cam elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a) boylamasına çekme deneyi, b) boylamasına basma deneyi, c) tek eksenli (45° yönlendirilmiş) kayma deneyi, d) enlemesine çekme deneyi, e) enlemesine basma deneyi



Şekil 6.23. Tek eksenli (enlemesine ve boylamasına) karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonrası hasar görüntüleri a) boylamasına çekme deneyi, b) boylamasına basma deneyi, c) tek eksenli (45° yönelmiş) kayma deneyi, d) enlemesine çekme deneyi, e) enlemesine basma deneyi

Elyaf takviyeli kompozitlerin malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Üretilen elyaf takviyeli kompozitlerin malzemelerin çekme, basma ve kayma deneyleri sonucu elde edilen mekanik özellikleri

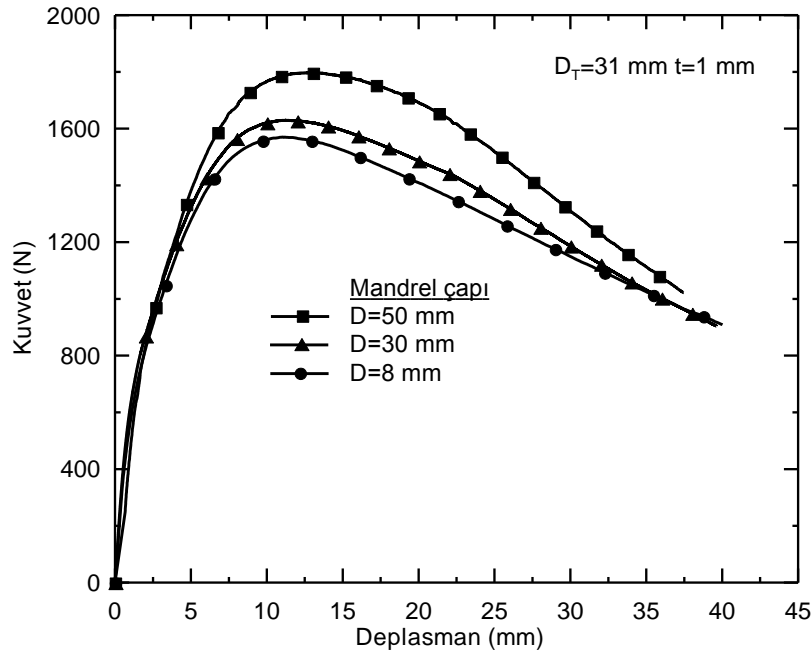
Elyaf çeşidi	Hacimce elyaf oranı (V _e)	Elastiklik modülü (MPa)	Kayma modülü (MPa)	Poison oranı (-)	Çekme dayanımı (MPa)	Kayma dayanımı (MPa)	Basma dayanımı (MPa)	Maks. birim şekil değişimi
Cam dokuma	30	14 352	4728	0.24	220	119	96	0.016
Aramid dokuma	30	19 087	2585	0.38	357	53	64	0.019
Karbon dokuma	30	42 000	12350	0.32	340	180	118	0.009
Boylamasına cam elyaf	30	18 300	3895	0.25	432	30	71	0.028
Enlemesine cam elyaf	30	7 940	3895	0.17	52	30	16	0.0096
Boylamasına karbon elyaf	30	78 715	2195	0.4	826	20	118	0.01
Enlemesine karbon elyaf	30	4 930	2195	0.25	37	20	27	0.013

% 30 elyaf oranına sahip dokuma ve tek eksenli elyaf içeren kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin beklenen mertebelerde olduğu tespit edilmiştir.

6.1.3. Eğme deneyi sonuçları

6.1.3.1. Farklı mandrel çaplarıyla yapılan eğme deney sonuçları

Çapı 31 mm ve cidar kalınlığı 1 mm olan tüpte, farklı mandrel çaplarının yük taşıma kabiliyetine olan etkisini incelemek amacıyla 8, 30 ve 50 mm çaplarındaki mandreller ile eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.24'de bu deneylere ait sonuçlar verilmiştir.

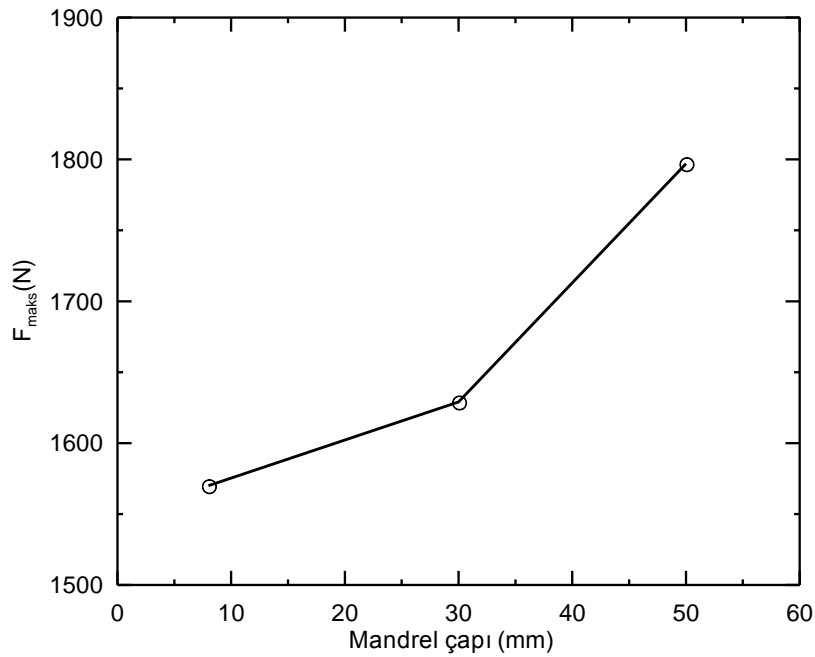


Şekil 6.24. Çapı 31 mm cidar kalınlığı 1 mm olan tüpte farklı mandrel çapları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

Büyük mandrel çaplarında, temas bölgesi artmakta ve ilerleyen deplasmanlarda tüp cidarının mandrele sarılması zorlaşmasıyla, yük taşıma kabiliyeti küçük çaplı mandrellere göre daha yüksek değerler almaktadır. Bir diğer sonuç ise maksimum kuvvetin görüldüğü deplasmanın da artmış olmasıdır. Sözü geçen mandrel çapı ile yük taşıma kabiliyeti ve de bükülme deplasmanı arasındaki bu ilişki farklı metalik malzemeler için de deneysel olarak tespit edildiği literatürde rapor edilmiştir [10]. Bu

çalışmaya göre, küçük çaplı mandrel lokal deformasyonu önemli oranda şiddetlendirerek bükülme olayının daha düşük yük ve deplasman değerlerinde gerçekleşmesine yol açmaktadır.

En büyük kuvvet değerinin (F_{maks}) mandrel çapına bağlı olarak değişim Şekil 6.25'te verilmiştir.



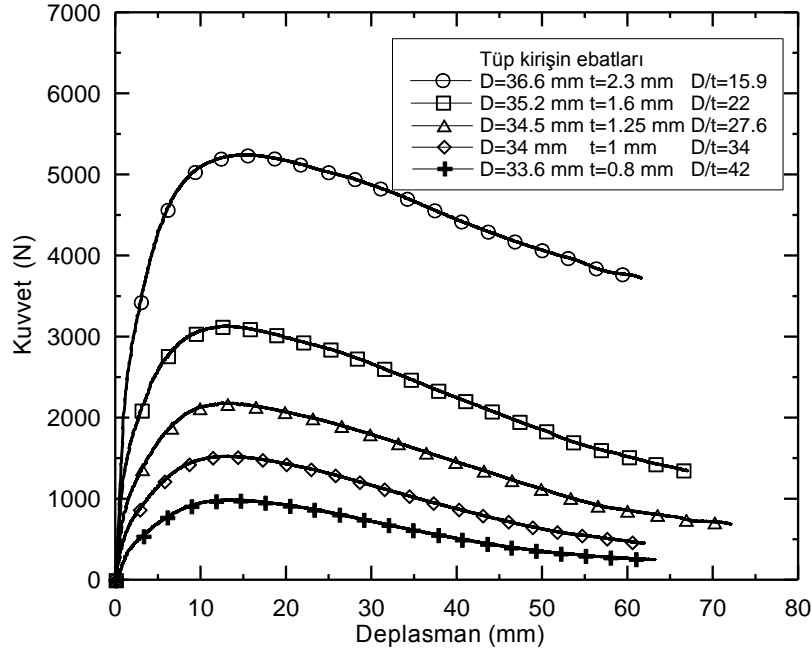
Şekil 6.25. En büyük kuvvet değerinin (F_{maks}) mandrel çapına bağlı olarak değişim eğrisi

6.1.3.2. Farklı çap ve cidar kalınlıklarındaki tüplerin eğme deney sonuçları

6063-T5 malzemedan üretilmiş, 38 mm çaplı, 3 mm cidar kalınlığına sahip tüpün dış yüzeyinden talaş kaldırarak elde edilen beş farklı çapta dolayısıyla da, beş farklı cidar kalınlığında tüp numunelerin eğrileri Şekil 6.26'da verilmiştir.

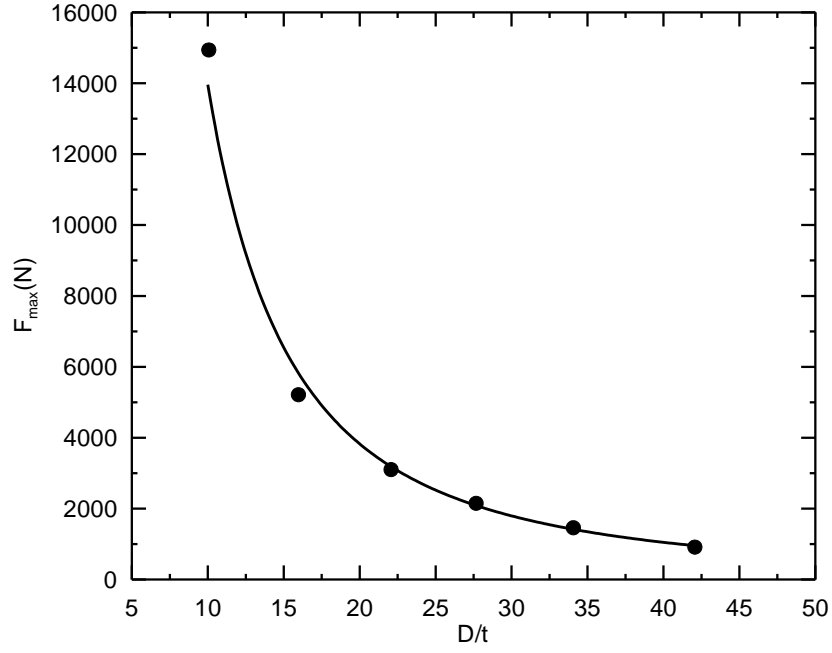
Grafiklerden, bükülme deplasman değerlerinin çapa oranının % 37-41 arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Bükülme deplasmanına etki eden etkenlerin başında çap olmak üzere, mekanikler özellikler ikinci derecede etkilidir. Literatürde 7070-T6 ve 6063-T6 alaşımdan üretilmiş tüp numunelerle yapılan deney sonuçları grafikleri incelendiğinde, yukarıda sözü edilen aralıkta bulunduğu belirlenmiştir [10]. Bu

davranış tezde bükülmenin detaylı olarak incelendiği sonlu eleman çalışma sonuçlarıyla uyum içindedir.



Şekil 6.26. Farklı çap ve cidar kalınlığındaki tüplerin kuvvet-deplasman grafikleri

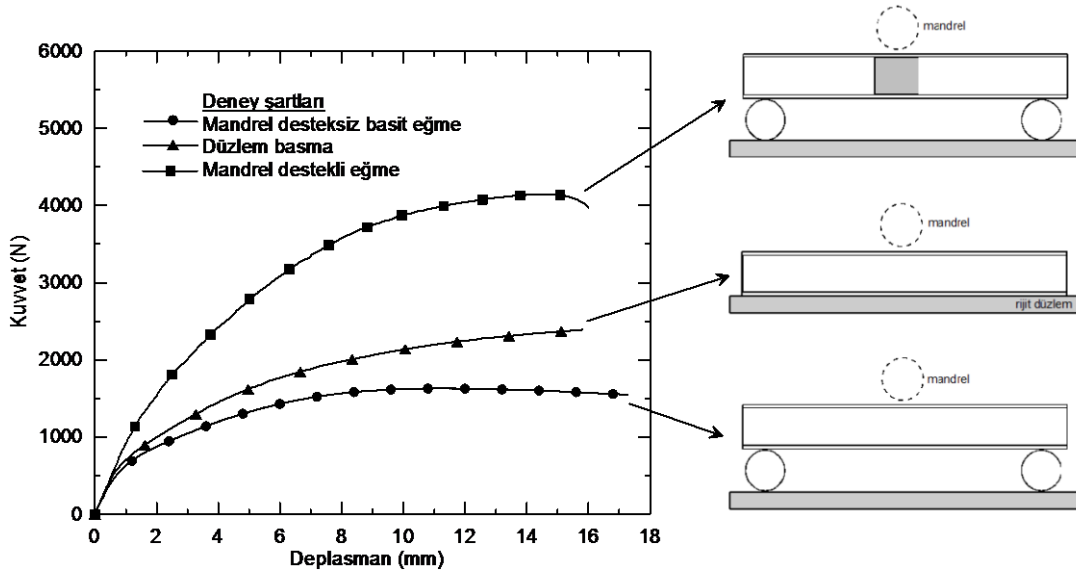
Ayrıca bükülmenin oluştuğu deplasman değerinin artan çapla bir miktar yükseldiğini de söylemek mümkündür. Bu grafikten elde edilen en büyük kuvvet değerinin (F_{maks}), D/t oranına bağlı olarak değişimi ise Şekil 6.27’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, D/t oranı artışıyla F_{maks} ’ın azaldığı göze çarpmaktadır. Deneysel olarak belirlenen bu davranış, 4. bölümde teorik inceleme kısmında $I-D/t$ oranı değişim grafiği ile paralellik arz etmektedir. Diğer bir deyişle dolu kesite doğru gidildikçe taşıma yükünün artması temel mekanik esaslarıyla uyum göstermektedir.



Şekil 6.27. Bükülmenin gerçekleştiği kuvvetin (F_{\max}), D/t oranı ile değişimi

6.1.3.2. Tüp yapının üç nokta eğme deneyinde eğilme ve cidardaki lokal burkulmanın etkilerinin incelenmesi amacıyla yapılan deneylerin sonuçları

Üç nokta eğme deneyinde eğme ve cidardaki lokal burkulmanın etkisinin incelenmek amacıyla hazırlanan üç çeşit numunenin eğme ve düzlem basma davranışının belirlendiği deney sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 6.28’de verilmiştir.



Şekil 6.28. Tüp kiriş yapıda mandrel destekli eğme, düzlem basma ve mandrel destekli eğme deneylerinden elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri

Şekilden de görüldüğü gibi, mandrel destekli numunenin cidarında deformasyon engellenmekte ve böylece numunede sadece eğme zorlanması söz konusu olduğu için bu numunenin yük taşıma kapasitesi en yüksek seviyededir. Mandrelin tüp yüzeyinde neden olduğu lokal deformasyon davranışının incelendiği düzlem basma deneyinde ise yük taşıma kabiliyeti, sadece eğme zorlanmasına maruz mandrel destekli numunenin sergilemiş olduğu performanstan daha düşük seviyede kaldığı dikkat çekmektedir. Hem lokal burkulma, hem de eğme zorlanmasına maruz tüp yapının yük taşıma kabiliyeti mandrel destekli numuneye göre çok daha düşük seviyededir. Değer olarak incelendiğinde basit eğme deneyinde 1620 N yük taşınırken, mandrel destekli eğme deneyinde taşınan yük 4147 N olarak tespit edilmiştir. Buradan yüzeydeki lokal burkulmanın sınırlandırılmış olması, 2391 N’luk bir yük artışı sağladığı anlaşılmaktadır. Düzlem basmada ise basit eğmeğe göre 771 N fazla yük taşınmıştır. Sonuç olarak basit eğme deneyinde cidardaki lokal burkulmanın genel olarak parçanın bükülme hareketine etkisi nedeniyle hasar başlangıç mekanizması olduğu ve bu hem bükülme kuvveti hem de deplasman üzerinde önemli tetikleyici rol oynadığını söylemek mümkündür. Bu mekanizmanın basit eğme olayındaki etkisi, eğmeden daha etkin olduğunu söyleyebiliriz.

6.1.3.4. Takviyesiz tp kiriŒe ait eğme deney sonuçları

Tez kapsamında sertlik değeri 65-70 HB olan alüminyum borular kullanılmıŒtır. Eğme deneyine tabii tutulmuŒ tp kiriŒin görünümü Œekil 6.29’da görülmektedir.

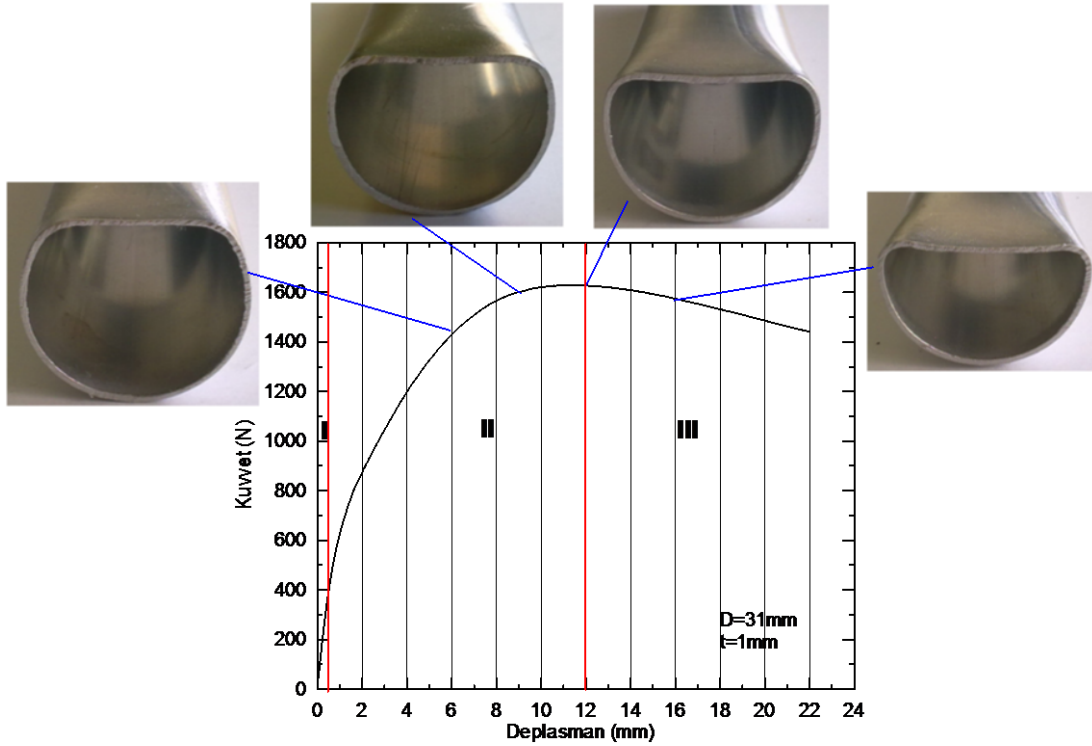


Œekil 6.29. Eğme deneyi sonrası tp kiriŒin görünümü

Œekil 6.30’da $D=31$ mm ($D/t=31$) olan tüpün üç nokta eğme deneyine ait kuvvet-deplasman grafiği, farklı deplasman değerlerinde (6, 9, 12 ve 16 mm) deneyi yapılan parçaların ortasından kesilerek elde edilen kesite ait fotoğraflarla birlikte verilmiŒtir.

Œekil 6.30’da verilen kuvvet-deplasman grafiğine incelendiğinde, ince cidarlı bir tp kiriŒin eğme yükü altındaki davranıŒını üç farklı bölgede incelemek mümkündür. I. Bölge baŒlangıta kuvvetin deplasmanla orantılı bir Œekilde arttığı, tam elastik davranıŒın söz konusu olduğu 0.5 mm’lik deplasmanla sınırlanmıŒ olan kısımdır.

II. Bölge, tp yapının üst cidarında mandrelin teması ve zorlanmanın etkisiyle ovalleŒmenin baŒladıęı ve de kuvvetin artıŒ hızında azalmanın görüldüğü kısımdır. Dolayısıyla bu bölgede yapının yk taŒımadaki etkinliği I. Bölgeye göre daha azdır. Bunun nedeni olarak cidarda lokal akma bölgelerinin geliŒmiŒ olmasıdır. Lokal akma ve ovalleŒmeyi takiben kiriŒ yapıda plastik mafsal oluŒumu kendini göstermekte, bu bölgenin sonunda kiriŒ görevi gören yapının eriŒebileceęi en büyük kuvvet değerine ulaŒılmaktadır. Œekilden de anlaŒıldıęı gibi, II. Bölgenin sona erdiği deplasman değeri 12 mm’dir. 12 mm’den 22 mm’ye kadar olan kısım ise III. Bölgeye ait olup, maksimum yükten hemen sonra kiriŒ uçlarının ortada oluŒan plastik mafsal etrafında dönerek kiriŒte plastik ckmenin (kuvvetin aŒırı miktarda dŒmesi) belirgin bir Œekilde görüldüğü bölgedir. İlerleyen deplasmanlarda bükülme bölgesinde aŒırı Œekil deęiŒimi nedeniyle cidarların birbirlerine yaklaŒması söz konusudur.

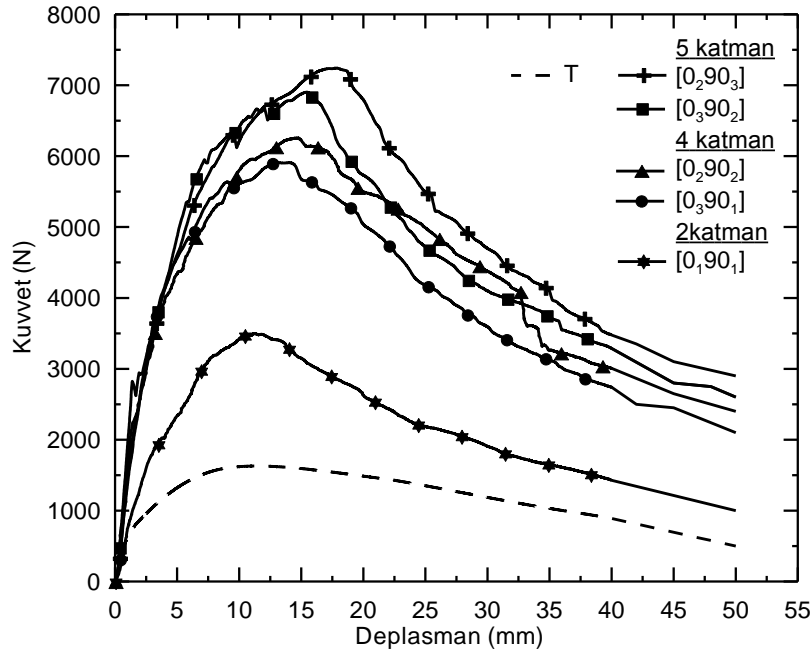


Şekil 6.30. D=31 mm (D/t=31) tütün kuvvet-deplasman grafiği ve farklı deplasman değerlerinde (6, 9, 12 ve 16 mm) deneyi yapılan parçaların ortasından kesilerek elde edilen kesite ait fotoğraflar

6.1.3.5. Çapı 31 mm olan alüminyum tüpe içten ve dıştan yapılan takviye ile oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları

Dıştan takviyeli kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları;

Çapı 31 mm olan alüminyum tüpe dıştan takviye yapılarak oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları Şekil 6.31’de verilmiştir. Cam elyafın katman sayısı (2, 4 ve 5 katman) ve yönlendirmenin etkisi bu grafikten açıkça görülmektedir. Takviyesiz tüp beklendiği şekilde, Şekil 6.29’dakine benzer bir deformasyonla eğme davranışı sergilemiştir. Tüp cidarında yüklemenin seyrine bağlı olarak öncelikle mandrel etkisiyle lokal burkulma ve sonrasında bükülme oluşmuştur.



Şekil 6.31. Dıştan cam elyaf ile takviye edilmiş numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri

Dıştan cam elyaf takviye edilerek üretilen kompozit parçaların grafikleri incelendiğinde, yük taşıma kabiliyetinin artan katman sayısı ile arttığı görülmektedir. Cidar kalınlığındaki artış doğal olarak kesit atalet momentini arttırmış, bu da, YTK'ne yansımıştır. Diğer önemli bir bulgu, bükülme deplasmanındaki artıştır. Tüpün takviye edilmiş olması cidarda akmanın gecikmesine ve dolayısıyla hem taşınabilecek yük değerinde, hem de bükülme deplasmanında artışa yol açmıştır. Bu, takviye edilmiş tüp kırımlarında beklenen bir davranıştır [12-14].

Şekil 6.31'de iki katmanlı yapılan cam elyaf takviyeli tüp kırımlarında $[0_1 90_1]$ yük taşıma kabiliyetindeki artış oranı 2.16 kattır. Elyaf yönelmesi açısından; her ne kadar eğilme zorlanması altında 0 derece yönelmeye sahip elyaflar birincide derecede sorumlu olsa da, hem cidarda lokal deformasyonun engellenmesi açısından, hem de 0° derece yönelmiş elyafların zorlanma altındaki bütünlüğünün sağlanması için dış yüzeyde 90° açılı elyafın bulunması sağlanmıştır. Aynı katman sayısı için, örneğin 4 katmanlı kompozitlerin kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde, aralarında maksimum yük değerlerinin aşırı miktarda değişmediği, 90° açılı elyaflı kompozit kuvvet değerinin nispeten daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. $[0_2 90_2]$ yönelmesine sahip kompozitte bükülme sonrası kısımlar içinde eğrinin diğerlerinin biraz üstünde bulunması dikkat çekmektedir. Tekrarlanan deney sonuçları da bu davranışı destekler niteliktedir. Bu

grup parçaların nispeten daha tok olduğu söylenebilir (Şekil 6.31). Benzer davranış 5 katmanlı yapı içinde görmek mümkündür. Buna göre, takviyesiz yapıya göre YTK'de en yüksek artış 4.5 ile 5 katmanlı kompozit numunede görülmüştür. Absorbe edilen enerji değeri ise 4.7 kat arttırılmıştır. Sonuç olarak $[0_290_3]$ yönlenmesine sahip 5 katmanlı kompozit yapı, YTK ve enerji absorbe etme kabiliyeti açısından en iyi değerleri vermiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, dıştan yapılacak takviye işlemleri için bu yönlenme ve katman sayısı kullanılacaktır.

Tablo 6.2' de eğme deneyleri sonucu elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri verilmiştir. Tablo 6.2 incelendiğinde 2 katmanlı kombinasyonda özgül yük taşıma kabiliyeti (ÖYTK) ve özgül enerji absorbe etme kabiliyetinin (ÖEAK) sırasıyla 1.25 ve 1.2 kat arttığı görülmektedir. Diğer kombinasyonlarda da artan katman sayısı ile orantılı olarak hem maliyetin, hem de F_{maks} oranının yükseldiği dikkat çekmektedir. 4 katmanlı kombinasyonlar için hem ÖYTK hem de ÖEAK açısından 3 nolu kombinasyon tercih edilebilir bir durumdadır. ÖYTK 1.5 kat, ÖEAK ise 1.6 kat artmıştır. 5 katmanlı kombinasyonlarda ise en iyi sonucu 6 nolu kombinasyon vermiş, takviyesiz yapıya göre maliyet 3.1 kat artmasına rağmen, F_{maks} oranı yaklaşık 4.4 kat, enerji oranı ise 4.7 kat arttığı belirlenmiştir. ÖYTK ve ÖEAK ise sırasıyla 1.5 kat ve 1.6 kat artış göstermiştir.

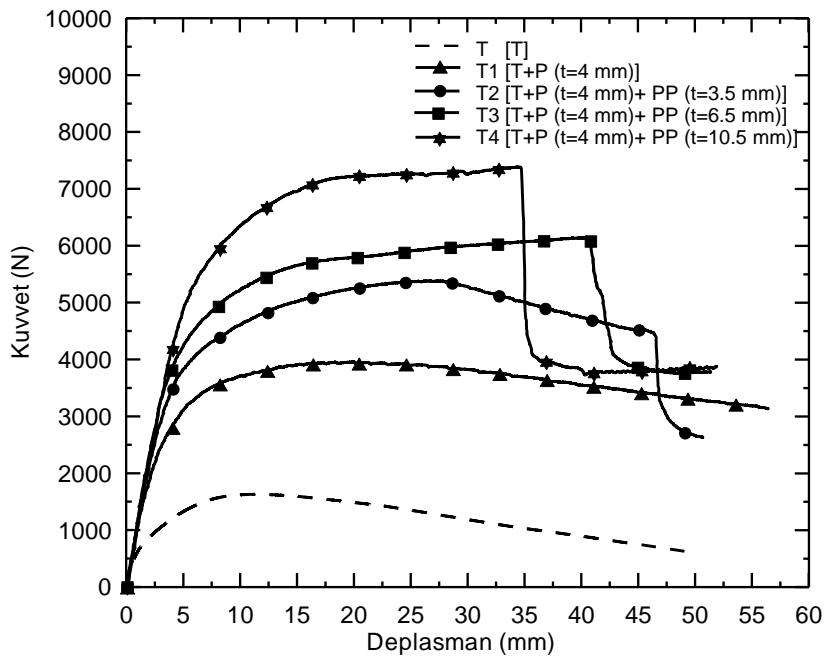
Dıştan takviyeli kompozit tüp kirişlerde tabaka sayısının artışıyla eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) değerleri de artmaktadır. F_{maks} 'ın, $I_{eş}$ ile orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. $F_{maks}/I_{eş}$ oranının en büyük değeri $[0_290_3]$ yönlenmesine sahip 5 katmanlı kompozit yapıda elde edilmiştir. Ağırlık yerine yoğunluk değerinin kullanıldığı $F_{maks} / \text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk oranları için de yine $[0_290_3]$ yönlenmesine sahip kompozit yapı tercih edilebilir olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2. Çapı 31 mm olan alüminyum tüp kirişin dıştan cam elyaf ile takviye edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Elyaf yönü	Katman sayısı	F_{maks} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (gr)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti, ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Maliyet/ parça (TL)	Maliyet oranı	F_{maks} oranı	Enerji oranı	F_{maks} /ağırlık (ÖYTK) (N/gr)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık (ÖEAK) (J/gr)	Enerji/ yoğunluk (kJcm ³ /gr)	F_{maks} /Maliyet (N/TL)
1	T	-	1620	51	69	2.7	10614.7	0.54	1.0	1.0	1.0	23.5	600.0	0.15	0.74	18.9	3000.0
2	[0 ₁ 90 ₁]	2	3500	105	120	2.89	13502.5	3.0	5.5	2.2	2.1	29.2	1211.1	0.26	0.88	36.3	1166.6
4	[0 ₃ 90]	4	5920	194	188	2.01	18321.2	5.5	10.2	3.7	3.8	31.5	2945.3	0.32	1.03	96.5	1076.4
3	[0 ₂ 90 ₂]	4	6255	210	180	2.01	16950.2	5.5	10.2	3.9	4.1	34.7	3111.9	0.37	1.17	104.5	1137.2
5	[0 ₃ 90 ₂]	5	6900	223	203	1.83	19610.5	6.77	12.6	4.3	4.4	34.0	3770.5	0.35	1.10	121.9	1019.2
6	[0 ₂ 90 ₃]	5	7240	239	205	1.83	18239.5	6.77	12.6	4.5	4.7	35.3	3956.3	0.40	1.17	130.6	1069.4
*50 mm'lik deplasmana kadar hesaplanmıştır																	

İçten takviyeli kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları;

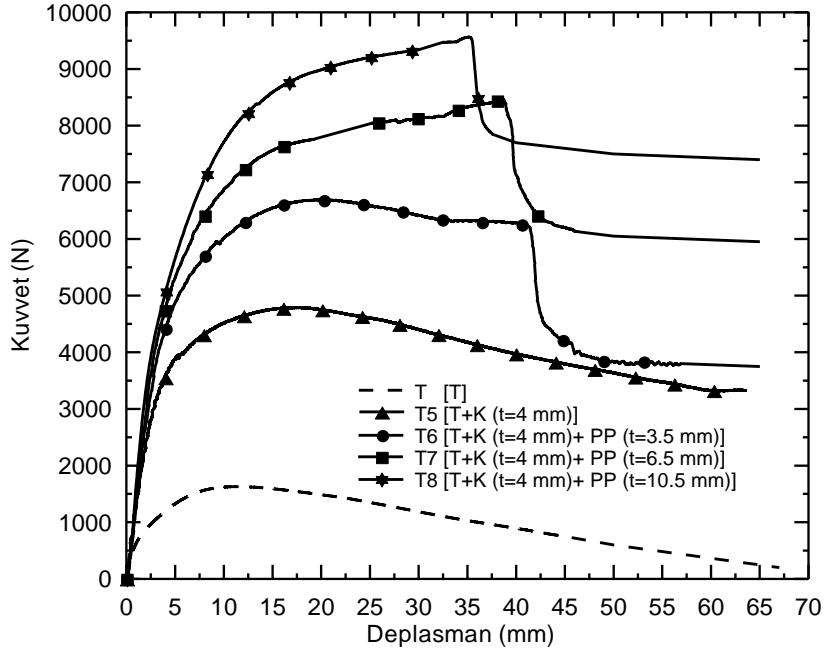
Teorik çalışma kısmında kombinasyonları planlanan tüp kirişlerin eğme deney sonuçları bu bölümde incelenecektir. Çapı 31 mm olan tüp kirişe çeşitli polimerik malzemeler (K, P ve PP) ile takviye edilerek oluşturulan kompozit tüp kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.32-33’de verilmiştir.



Şekil 6.32. Tüp kirişe P ve PP ilave edilmesiyle oluşturulan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil 6.32’den, yapılan takviyenin parçanın eğme direncini belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Tüp kirişe polyamit, ve polipropilen ilavesiyle oluşturulan T4 kodlu numunenin, takviyesiz tüpe göre kuvvet değerinin 4.6 kat artarak 7384 N değerine ulaştığı dikkat çekmektedir. Aynı numunede enerji absorbe etme kabiliyeti 4.7 kat artış göstermiştir. Ayrıca farklı kalınlıklardaki polipropilenin takviye edildiği numunelerin kuvvet-deplasman grafiklerinde kuvvette ani bir düşüş oluşturacak şekilde eğrilerde ani değişimler görülmektedir. Bu grup numunelerde tüpün yırtıldığı anlaşılmıştır.

Polyamit yerine kestamitin kullanıldığı içten takviyeli kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri ise Şekil 6.33’de verilmiştir.



Şekil 6.33. Tüp kirişe kestamid ve polipropilen ilave edilmesiyle oluşan kompozit kirişlerin kuvvet-deplasman eğrileri

Takviye malzemelerinin ilave edilmesiyle tüp kirişin yük taşıma kabiliyetinde önemli oranda artış elde edilmiştir. Ayrıca kuvvetin maksimum değerini aldığı deplasman miktarı da ötelenmiştir. Buradan kompozit yapının daha tok davranış gösterdiğini söylemek mümkündür. T5 kodlu numunede, sadece 4 mm kalınlığında K içeren tüp yapının YTK yaklaşık olarak 3 kat artmıştır. Farklı cidar kalınlığında PP'e T6, T7 ve T8 kodlu numunelerde, artan PP cidar kalınlığı ile YTK'nde önemli oranda iyileşmeler elde edilmiştir. En yüksek iyileşmenin elde edildiği T8 kodlu numunede takviyesiz yapıya göre YTK 5.9 kat artmıştır. T5 kodlu numunede, yükün en büyük değerini aldığı bükülme deplasmanından sonra deplasmanın bir miktar arttığı ancak T6, T7 ve T8 kodlu numunelerde en büyük yük değerinde tüp cidarında oluşan yırtılmaya bağlı olarak eğrilerde ani düşüşler olduğu görülmektedir (Şekil 6.33). Polimer takviyesi metal cidarda bükülmenin oluşması için gerekli şekil değişimini kısıtlamış olması eğilmenin nedeniyle gelişen çekme gerilmeleri tüpün alt cidarında yırtılmaya yol açmıştır. İçeriden yapılan polimer takviyenin rijitliği bu davranış üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. T8 kodlu numunenin T7'ye göre bir miktar daha küçük deplasmanda hasarlanması bu etkileşimi destekleyen önemli bir bulgudur.

Deney sonrası numuneler ait görüntüler Şekil 6.34' de verilmiştir.



Şekil 6.34. Eğme deneyi uygulanan bir grup kompozit numuneye ait fotoğraflar

Sadece içten takviye edilmiş kombinasyonlara ait deney sonuçlarından (Tablo 6.3) en yüksek F_{maks} oranı 5.9 ile T8 kodlu kombinasyonda elde edilmiştir. Takviyesiz duruma göre maliyetteki artış oranı $(3.9/0.54)$ 7.2 kat olduğu dikkate alındığında maliyet düşürülmeden tercih edilebilecek bir kombinasyon olarak görülmemektedir. Maliyet dikkate alınarak bir seçim yapılırsa T2 nolu numune en uygun kombinasyonu oluşturmaktadır. Hem ÖYTK olarak hem de ÖEAK açısından T7 ve T8 kodlu kombinasyonlar en uygun kombinasyonlar olarak öne çıkmaktadır.

$F_{maks}/I_{eş}$ değeri açısından T8 kodlu numune en yüksek değere sahiptir. $F_{maks}/yoğunluk$ ve enerji/yoğunluk parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda yine T8 kodlu kompozit kiriş tercih edilebilir olduğu görülmektedir.

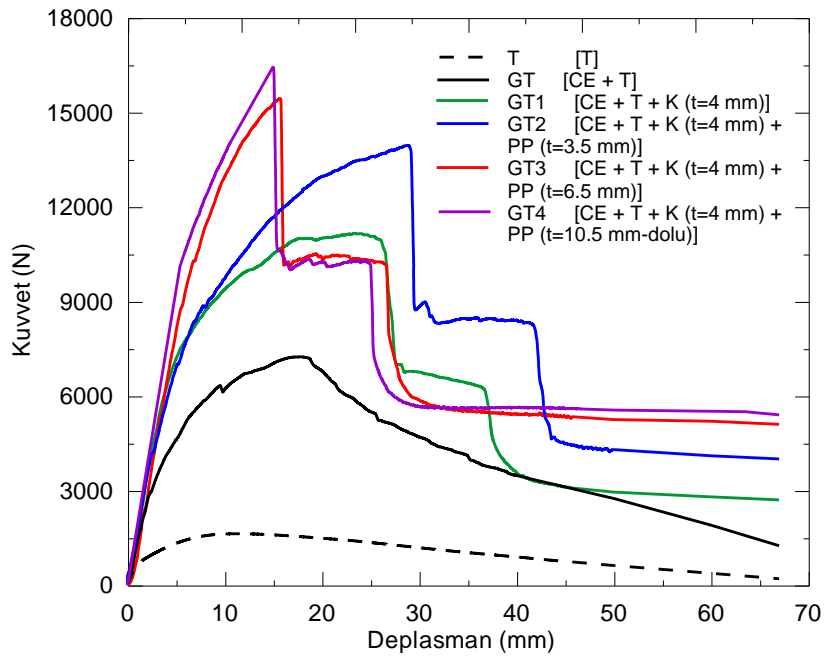
Tablo 6.3. İçten takviye edilmiş kompozit kırımların eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon	F _{maks} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	Maliyet /parça (TL)	Maliyet oranı	F _{maks} oranı	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji oranı	F _{maks} /ağırlık (ÖYTK) (N/kg)	Enerji /ağırlık (ÖEAK) (J/g)	Enerji/ yoğunluk (kJcm ³ /gr)	F / Maliyet (N/TL)
T	T	1620	51	69	1.45	10614.68	0.54	1.0	1.0	600.0	0.15	1.0	23.5	0.74	18.9	3000.0
T1	T+ P (t=4 mm)	3956	176	160	1.26	11387.82	1.7	3.1	2.4	2726.4	0.35	3.5	24.7	1.10	121.3	2327.1
T2	T+ P (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	5381	226.5	205	1.22	11513.68	1.8	3.3	3.3	4258.2	0.47	4.4	26.2	1.10	179.2	2989.4
T3	T+ P (t=4 mm) + PP (t=6.5 mm)	6137	255.2	232	1.18	11541.36	2.7	5.0	3.8	5031.7	0.53	5.0	26.5	1.10	209.2	2273.0
T4	T+P (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	7384	278.2	240	1.48	11544.66	2.8	5.2	4.6	6269.9	0.64	5.5	30.8	1.16	236.2	2637.1
T5	T+ K (t=4 mm)	4790	206.5	163	1.27	11423.78	2.7	5.0	3.0	3240.5	0.42	4.0	29.4	1.27	139.7	1774.1
T6	T+ K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	6695	281.6	206	1.22	11549.64	2.9	5.4	4.1	5272.3	0.58	5.5	32.5	1.37	221.8	2308.6
T7	T+ K (t=4 mm) + PP (t=6.5 mm)	8475	346	232	1.18	11577.32	3.8	7.0	5.2	6948.6	0.73	6.8	36.5	1.49	283.7	2230.3
T8	T+K (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	9564	392	240	1.45	11580.62	3.9	7.2	5.9	8120.9	0.83	7.7	39.9	1.63	332.9	2452.3

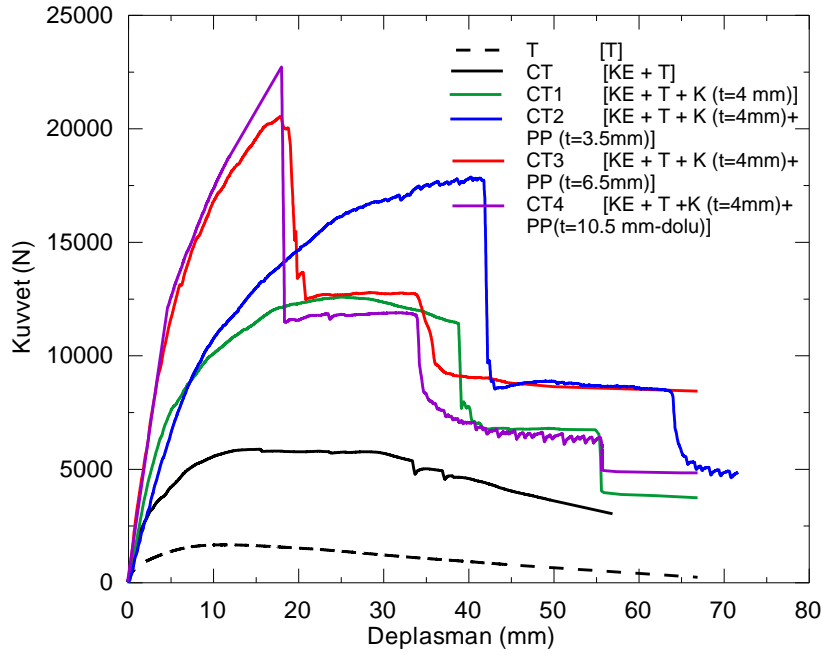
T: Alüminyum tüp kırımlar, K: Kestamid, P: Polyamid, PP: Polipropilen. *50 mm'lik deplasmana kadar hesaplanmıştır

İçten ve dıştan yapılan takviyeli kompozit kirişlerin eğme deney sonuçları;

Dıştan beş katmanlı $[0_290_3]$ yönlenebilir cam ve karbon elyaf, içten farklı polimerik malzemelerin, farklı cidar kalınlıklarıyla oluşturulan hibrid kompozit yapıların eğme deney sonuçları Şekil 6.35-6.36'da toplu olarak verilmiştir. Şekil 6.35'de dıştan cam elyafın içten polimerik takviyenin kombine durumunda YTK büyük miktarda artış gözlenmiştir. Maksimum eğme yükü GT4 kodlu kompozit yapıda elde edilmiştir. Takviyesiz tüpün maksimum yük değerinin 1620 N olduğu dikkate alınır, GT4 koduna sahip numunede elde edilen 16420 N ile 10 katı aşan bir iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 6.35. İçten ve dıştan (cam elyafın kullanıldığı) takviye edilmiş numunelere kuvvet- deplasman grafikleri
(T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamid, PP: Polipropilen)



Şekil 6.36. İçten ve dıştan (karbon elyafın kullanıldığı) takviye edilmiş numunelere kuvvet- deplasman grafikleri

Şekil 6.35’de GT1-GT4 numunelerin yük-deplasman eğrilerinin ortak davranışı olan basamak formunun oluşumu, sırasıyla elyaf tabakanın ve tüp cidarının hasarlanmasıyla ilişkilidir. Grafikte ilk olarak, tüpün alt cidarında dış kısmındaki (yüzey ve yüzeye yakın kısımlardaki) elyafların koparak kuvvette ani düşüş oluşmaktadır. Bu aşamada grafikte oluşan plato kısmında, deplasman ile parça üst yüzeyinde epoksi-metal ara yüzeyinde ayrılma ve yapının orta noktasında bükülme birlikte oluşmaktadır. Uygulanan kuvvetin seviyesi ve içerideki takviye unsurunun rijitliğine bağlı olarak, ilerleyen deplasmanlarda alüminyum tüp yırtılma göstererek hasarlanmaktadır. Örneğin, GT4 kodlu hibrit kompozit yapı, en yüksek kuvvet değerine ulaştıktan hemen sonra tüp alt yüzeyindeki cam elyaf yapının kısmi olarak hasarlanmasıyla kuvvet 10500 N’a düşmektedir. Bu yük değerinde yaklaşık 28 mm deplasmana kadar elyafta yapıda devam eden kopmalara bağlı olarak grafikte zig-zag oluşmakta ve tüpün yırtılmasıyla kuvvet 6000 N’nun hemen altına düşmektedir.

Cam elyaf yerine karbonun kullanıldığı, hibrit kompozit yapılara ait eğme eğrilerinin verildiği Şekil 6.36 incelendiğinde, genel olarak eğri karakterlerinin değişmediği, tüm kombinasyonlar için YTK ve basamak gerilme seviyelerinin orantılı olarak bir miktar yükseldiği dikkat çekmektedir.

Elyafın hasarlanmasıyla yük değerinde görülen ani düşüş miktarının karbon takviyeli kompozitlerde daha yüksek olduğu CT4 kodlu kompozit numunede maksimum yük değeri 22680 N'a ulaşmış ve böylece takviyesiz tüpe 14 kat artış sağlanmıştır. Üretilen kompozit yapıların her biri için kuvvet ve enerji değerleri ve bunlardan hesaplanan ÖYTK ve ÖEAK büyüklükleri Tablo 6.4'de toplu olarak verilmiştir. Tablo 6.4'den, takviye bileşen sayısı ile F_{maks} oranı ve bunun paralelinde YTK tüm kompozit kombinasyonları için arttığı görülmektedir. ÖYTK takviyesiz yapıda 23 N/gr mertebelerinde iken, sadece içten takviye ile yaklaşık 40 (T4), cam elyafın dahil edilmesi durumunda (GT4) 46, cam elyaf yerine karbon elyafın kullanılmasıyla 61 N/gr (CT4) değerini aştığı anlaşılmaktadır. Buna göre CT4 için kabaca ÖYTK değeri 2.65 kat artış sağlanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalardan [42-46] dıştan yapılan takviyenin sınırlı kaldığı dikkate alınır, hibrid yapının bu açıdan önemli bir üstünlük sağladığı anlaşılmaktadır.

Enerji absorbe etme kabiliyeti açısından, durum bir miktar farklıdır. Tablo 6.3'ten T kodlu kompozit parçalarda, T1'den T8'e kadar bileşen sayısı ile birlikte enerji değeri de artmış olmasına rağmen, dıştan elyaf takviye edilen parçalarda (GT ve CT serilerinde) (Tablo 6.4) ise GT2 ve CT2 grubu parçalar en yüksek enerji değerine sahiptir. Şekil 6.35-36'dan açık bir şekilde görüleceği gibi, elyaf ve tüpün hasarlanması bu iki numunelerde daha yüksek deplasman değerlerinde oluşmuştur. ÖEAK değeri bakımından da aynı kodlu numunelerin tercih edilebilecek performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır.

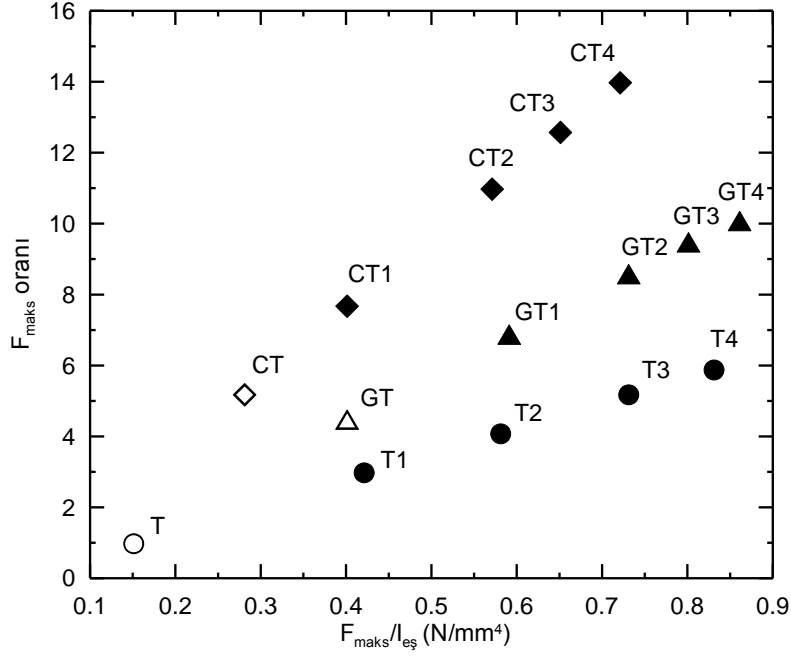
$F_{maks}/I_{eş}$ oranı açısından GT4 kodlu numune en yüksek değere sahiptir. $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ oranına göre bir seçim yapılması durumunda CT4 kodlu kompozit kiriş, enerji/yoğunluk oranına göre CT3 kodlu kompozit kiriş tercih edilebilir.

Tablo 6.4. Dıştan ve içten takviye edilmiş kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon	F _{maks} (N)	Enerji* (J)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	Maliyet /parça (TL)	Maliyet oranı	F _{maks} oranı	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji oranı	F _{maks} /ağırlık -ÖYTK- (N/g)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (J/g)	Enerji/ yoğunluk (kJcm ³ /gr)	F _{maks} /Maliyet (N/TL)
T	T	1620	51	69	2.7	10614.68	0.54	1.0	1.0	600.0	0.15	1.0	23.5	0.74	18.9	3000.0
GT	CE+T	7240	239	210	1.88	18239.48	6.77	12.5	4.5	3860.2	0.40	4.7	34.5	1.14	127.4	1069.4
GT1	CE+T + K (t=4 mm)	11160	353	270	1.37	19048.58	9.02	16.7	6.9	8134.0	0.59	6.9	41.3	1.31	257.3	1237.3
GT2	CE+T + K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	13950	447	320	1.29	19174.44	9.19	17.0	8.6	10843.7	0.73	8.8	43.6	1.40	347.5	1518.0
GT3	CE+T + K (t=4 mm) + PP (t=6.5 mm)	15430	452	350	1.26	19202.12	10.03	18.6	9.5	12200.1	0.80	8.9	44.1	1.29	357.4	1538.4
GT4	CE+T+ K (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	16425	405	360	1.24	19205.42	10.20	18.9	10.1	13245.3	0.86	7.9	45.6	1.13	326.6	1610.3
CT	KE+T	8500	342	170	1.52	30507.87	13.74	25.4	5.2	5598.3	0.28	6.7	50.0	2.01	225.3	618.6
CT1	KE+T+K (t=4mm)	12540	484	280	1.42	31316.97	15.99	29.6	7.7	8813.4	0.40	9.5	44.8	1.73	340.2	784.2
CT2	KE+T+K (t=4 mm) + PP (t=3.5 mm)	17830	637	340	1.37	31442.83	16.16	29.9	11.0	13044.4	0.57	12.5	52.4	1.87	466.0	1103.3
CT3	KE+T+K (t=4mm)+PP (t=6.5mm)	20490	585	360	1.30	31470.5	17.00	31.5	12.6	15750.9	0.65	11.5	56.9	1.63	449.7	1205.3
CT4	KE+T+ K (t=4 mm) + PP (t=10.5 mm-dolu)	22680	570	370	1.27	31473.81	17.17	31.80	14.0	17795.1	0.72	11.2	61.3	1.54	447.2	1320.9

T: Alüminyum tüp kiriş, *50 mm'lik deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: Cam elyaf takviyeli polimer [0₂90₃], KE: Karbon elyaf takviyeli polimer [0₂90₃], K: Kestamit, PP: Polipropilen

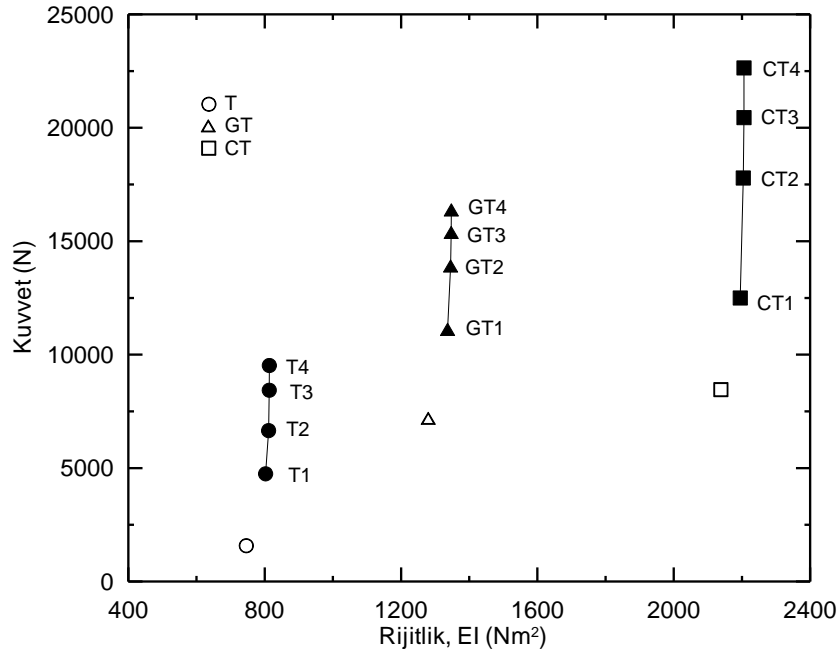
Kompozit kirişlerin $F_{maks}/I_{eş}$ oranına bağlı F_{maks} oranının değişimi Şekil 6.37’de verilmiştir.



Şekil 6.37. Kompozit kirişlerin $F_{maks}/I_{eş}$ oranına bağlı F_{maks} oranının değişimi

Şekil 6.37’de F_{maks} oranıyla $F_{maks}/I_{eş}$ oranı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmektedir. İçten ve dıştan takviye miktarının artmasıyla $I_{eş}$ değerleri artmış, buna bağlı olarak YTK’de de artış görülmüştür.

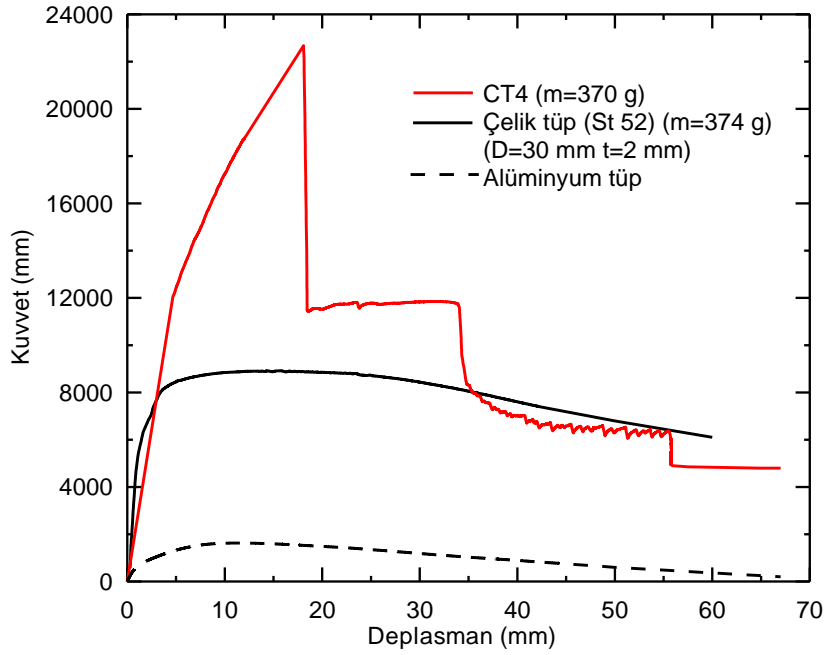
Kompozit kirişlerden elde edilen maksimum eğme yükünün eğilme rijitliği (EI) ile değişimi Şekil 6.38’te verilmiştir.



Şekil 6.38. Kompozit numunelerin farklı takviye kombinasyonları için eğme kuvvetinin rijitlikle değişimi

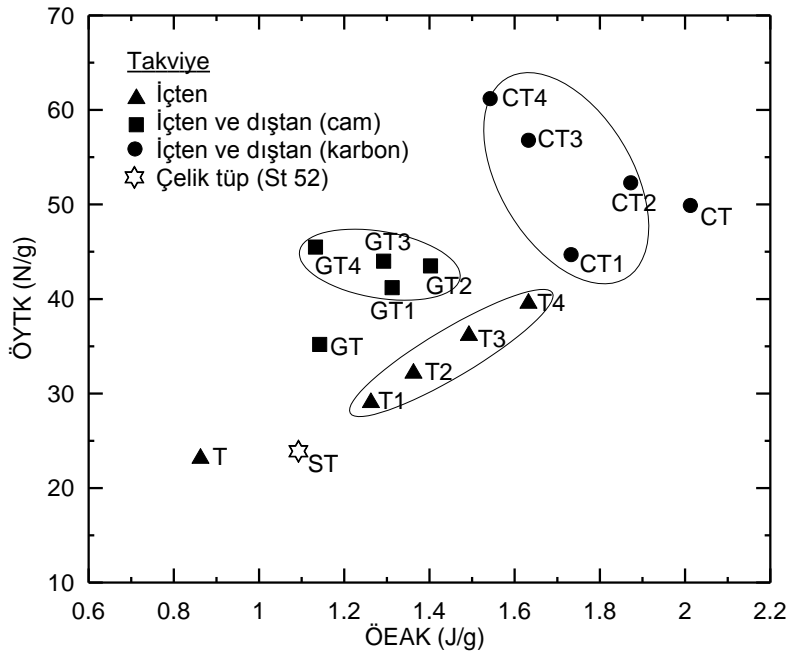
Şekil 6.38 incelendiğinde rijitlikle eğme yükü arasında bir ilişkinin olduğunu söylemek mümkündür. İçten takviyenin, kompozitin eğme rijitliğine ciddi bir katkısı olmamasına rağmen, lokal burkulmayı engelleyerek eğme kuvvetini önemli oranda arttırdığı tespit edilmiştir. Dıştan takviye, eğilme direncini artırarak eğme kuvvetini artırmış ve rijitlik değerlerinin artmasında içten takviyeye göre daha etkili olmuştur. Karbon elyaf takviye yük taşıma kabiliyeti ve rijitliğin artışı açısından cam elyafa göre daha iyi performans sergilemiştir.

Üretilen kompozit kirişlerden en yüksek YTK sahip olan CT4 numunesi ve bu numuneyle aynı ağırlığa sahip D=30 mm t=2 mm olan çelik tüp kiriş ve takviyesiz alüminyum tüp kirişe ait kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.39'da verilmiştir.



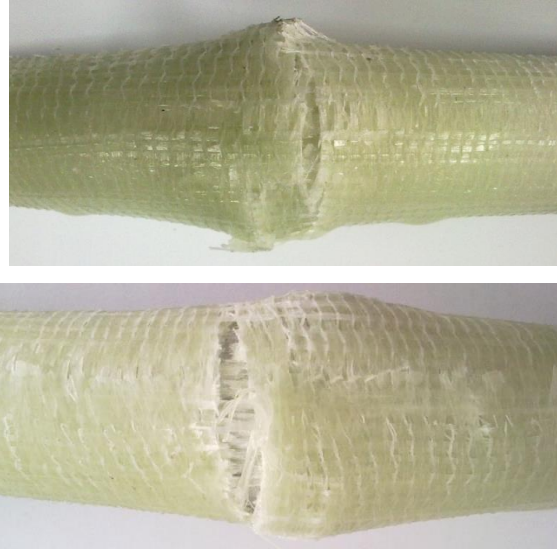
Şekil 6.39. CT4 numunesi ve çelik tüp kirişin kuvvet-deplasman eğrileri

Aynı ağırlıkta olmalarına rağmen, CT4 numunesinin YTK çelik tüp kirişe göre 2.5 kat daha fazladır. Şekil 6.40'da içten, içten ve dıştan takviyeli kompozitlerin ÖYTK'ndeki değişimleri ÖEAK'ne göre verilmiştir.

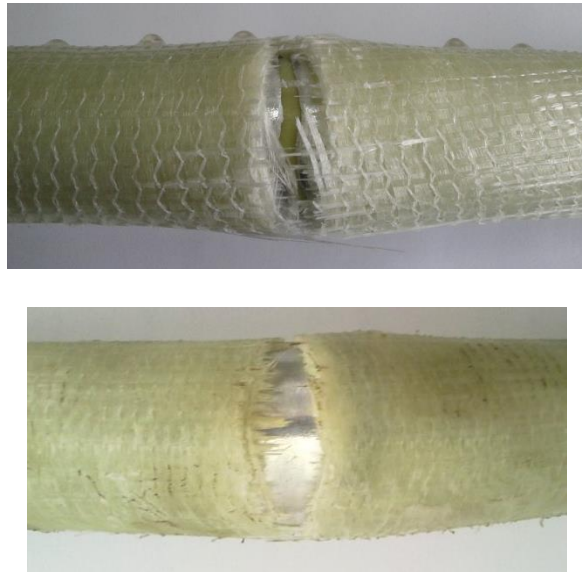


Şekil 6.40. İçten ve dıştan takviyeli kompozitlerin (takviyesiz alüminyum tüp kiriş ve çelik tüp kiriş ile birlikte) özgül enerji absorbe etme kabiliyetine bağlı özgül yük taşıma kabiliyetindeki değişimleri

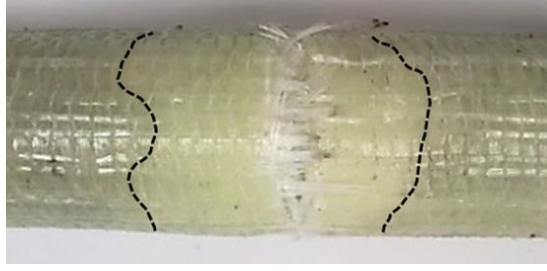
İçten takviyeli kompozitlerde takviye miktarının artmasıyla ÖYTK, ÖEAK ile orantılı bir şekilde artmıştır. Dıştan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit kirişlerde ise ÖYTK takviye miktarıyla orantılı, ÖEAK'nde ise kompozit kirişlerdeki erken kırılmalardan dolayı oran bozulmuştur. ÖYTK açısından en iyi performansı gösteren yapı CT4 kodlu kompozit, ÖEAK açısından ise CT kodlu numunedir. Dıştan (cam elyaf) ve içten takviye edilmiş kompozit kirişlerin deney sonrasına ait görüntüleri Şekil 6.41-43'da verilmiştir.



Şekil 6.41. CE+T ve CE+T+K kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri



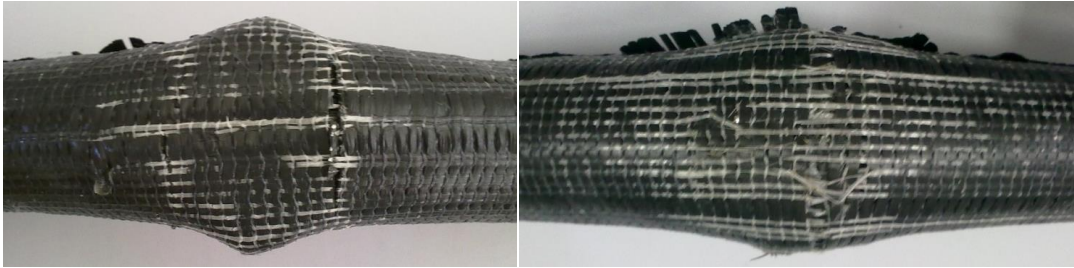
Şekil 6.42. CE+T+K+PP (t=3.5 mm) ve CE+T+K+PP (t=6.5 mm) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri



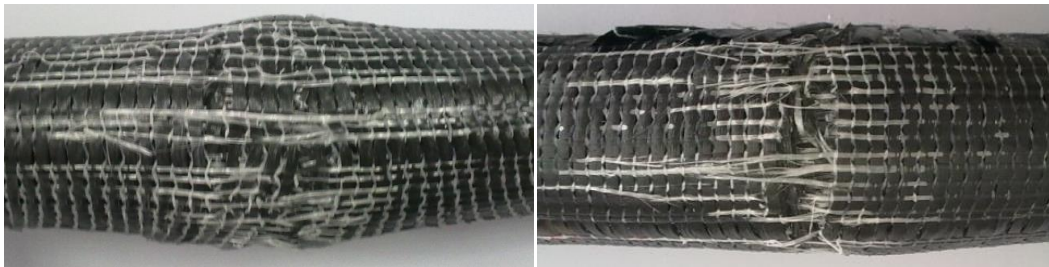
Şekil 6.43. CE+T+K+PP (dolu) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri

Hasarlanan parçalardan, eğme esnasında kompozit kirişin alt cidarında çatlağın oluştuğu ve artan deplasmanla da büyüdüğü görülmüştür. Elyaf tabakasının tamamen ayrılmasıyla kuvvet-deplasman eğrisinde ani bir düşüş oluşmaktadır (Şekil 6.35). Dıştan takviyeli numunelerdeki, epoksi-metal ara yüzündeki delaminasyon özellikle mandrelin temasıyla başlayıp, hızla ilerlemektedir. Bu ayrılmanın oluştuğu kısım daha açık tonda görülmesi nedeniyle genelde gerilme beyazlığı olarak adlandırılır. Gerilme beyazlığı elyaf takviyeli kompozit numunelerde görülen karakteristik bir hasar görüntüsüdür.

Dıştan (karbon elyaf) ve içten takviye edilmiş kompozit kirişlerin deney sonrasına ait görüntüleri Şekil 6.44-46'da verilmiştir.



Şekil 6.44. KE+T ve KE+T+K kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri



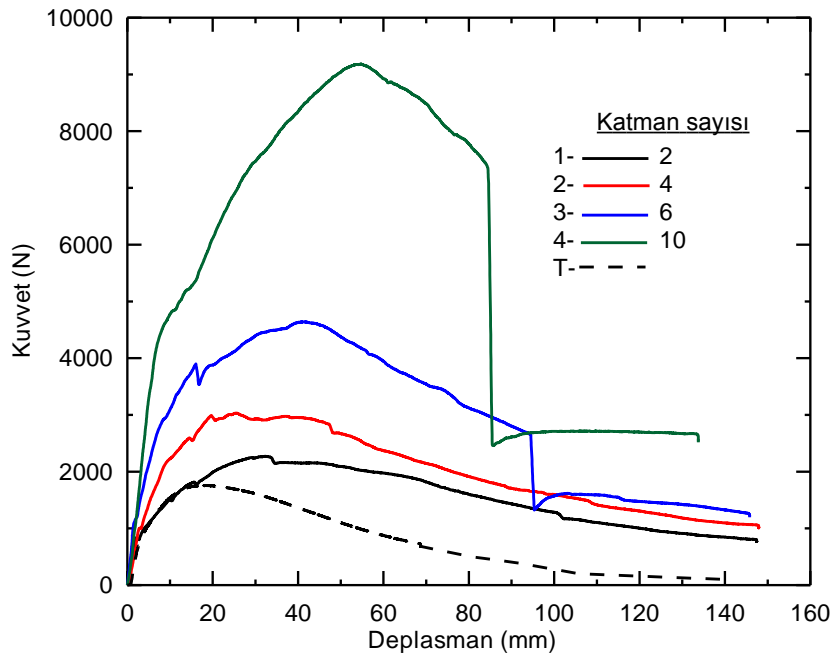
Şekil 6.45. KE+T+K+PP (t=3.5 mm) ve KE+T+K+PP (t=6.5 mm) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri



Şekil 6.46. KE+T+K+PP (dolu) ve kombinasyonuna ait numunelerin eğme deney sonrası görüntüleri

6.1.3.6. 30 mm çaplı alüminyum tüpün farklı elyaflar kullanılarak oluşturulan hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları

Bu kısımda öncelikle tek tür elyaf katmanının artırılmasıyla farklı katman sayılarında, sadece dokuma cam elyaf kullanılarak hazırlanan kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.47’de verilmiştir.



Şekil 6.47. Farklı cam elyaf katman sayısına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri

Şekil incelendiğinde, artan katman sayısı ile, tüp yapının yük taşıma kabiliyeti ve rijitliğinin arttığı görülmektedir. Bu grup kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.5’de listelenmiştir.

Dokuma cam elyafın katman sayısı artırılarak oluşturulan kompozit kirişlerde en yüksek yük taşıma kabiliyeti 4 nolu kombinasyonda 5.2 kat artış ile katman sayısının 4 kat olduğu cam elyaf takviyeli yapıda görülmüştür. Enerji absorbe etme kabiliyeti yine aynı numunede olmak üzere artış oranı 6.4 kat olarak tespit edilmiştir. 4 nolu kombinasyon, ÖYTK ve ÖEAK açısından da ilk sırada yer almaktadır.

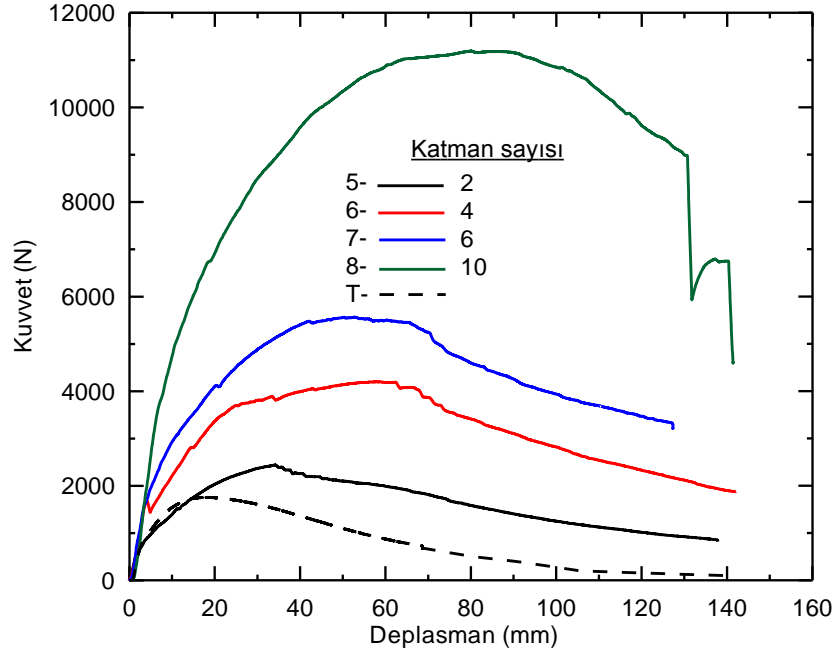
$F_{maks}/I_{eş}$, $F_{maks}/yoğunluk$ ve enerji/yoğunluk oranlarına göre bir seçim yapılması durumunda yine 4 nolu kombinasyon tercih edilebilir.

Tablo 6.5. Dıştan dokuma cam elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F_{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F_{maks} oranı	Enerji oranı	F_{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
1	CE (2 kat)	T	2271	177.2	98	2.22	11364.78	1.8	1.3	1.7	23.2	1023.4	0.20	1.8	79.9
2	CE (4 kat)	T	3032	230	131	2.03	13413.27	3.0	1.7	2.2	23.1	1497.0	0.23	1.8	113.6
3	CE (6 kat)	T	4639	351	160	1.86	15760.98	4.2	2.6	3.4	29.0	2497.8	0.29	2.2	189.0
4	CE (10 kat)	T	9181	654	229	1.74	21466.56	6.6	5.2	6.4	40.1	5290.2	0.43	2.9	376.8

* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: cam elyaf

Farklı katman sayılarında, sadece dokuma aramid elyaf kullanılarak hazırlanan kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.48’de verilmiştir.



Şekil 6.48. Farklı aramid elyaf katman sayılarına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri

Şekil incelendiğinde, artan aramid elyaf katman sayısı ile tüp yapının yük taşıma kabiliyeti ve rijitliğinin cam elyafta olduğu gibi belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu grup kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri aşağıda (Tablo 6.6) listelenmiştir.

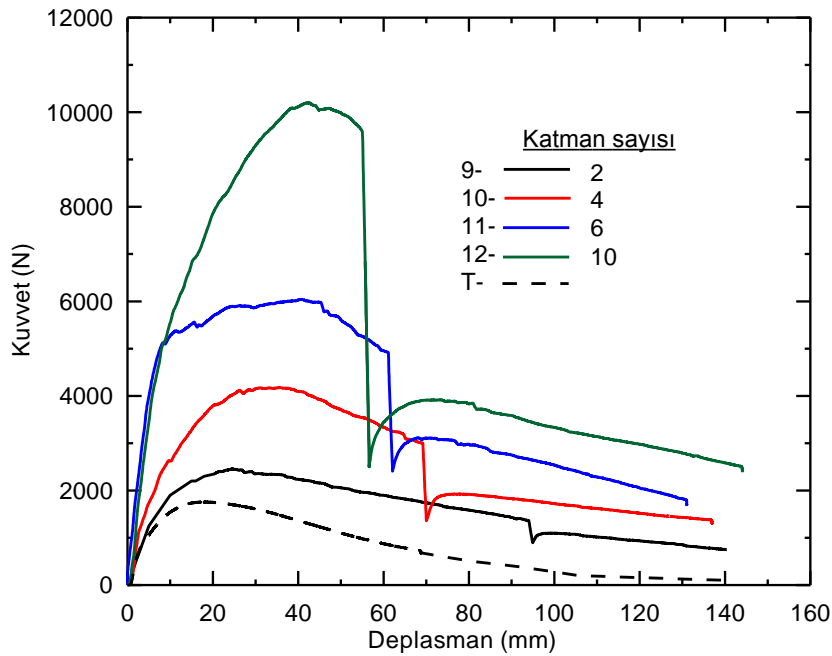
Tablo 6.6. Dıştan dokuma aramid elyaf ile takviye edilmiş kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F _{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F _{maks} oranı	Enerji oranı	F _{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
5	AE (2 kat)	T	2441	179	96	2.17	11948.45	4.8	1.4	1.7	25.4	1122.9	0.20	1.9	82.3
6	AE (4 kat)	T	4200	339	117	1.81	14670.22	9.0	2.4	3.3	35.9	2321.8	0.29	2.9	187.4
7	AE (6 kat)	T	5569	447	143	1.66	17789.55	13.2	3.2	4.4	38.9	3355.0	0.31	3.1	269.3
8	AE (10 kat)	T	11196	901	200	1.52	25370.4	21.6	6.4	8.8	56.0	7386.7	0.44	4.5	594.4

* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. AE: Aramid elyaf

Dokuma aramid elyafın katman sayısı artırılarak oluşturulan kompozit kirişlerde en yüksek yük taşıma kabiliyeti 8 nolu kombinasyonda 6.4 kat artış ile katman sayısı 10 olan elyaf takviyeli yapıda görülmüştür. Enerji absorbe etme kabiliyeti 8.8 kat ile yine aynı numune için elde edilmiştir. ÖYTK ve ÖEAK açısından yine aynı numunenin birinci sırada aldığı anlaşılmaktadır. $F_{maks}/I_{eş}$, $F_{maks} / \text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda yine 8 nolu kombinasyon tercih edilebilir (Tablo 6.6).

Farklı katman sayılarında, sadece dokuma karbon elyaf kullanılarak hazırlanan kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.49'da verilmiştir.



Şekil 6.49. Farklı karbon elyaf katman sayılarına sahip kompozit numunelerin kuvvet deplasman eğrileri

Şekil incelendiğinde, artan karbon elyaf katman sayısı ile tüp yapının yük taşıma kabiliyetinin ve rijitliğinin arttığı görülmektedir. Bu grup kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.7'de listelenmiştir.

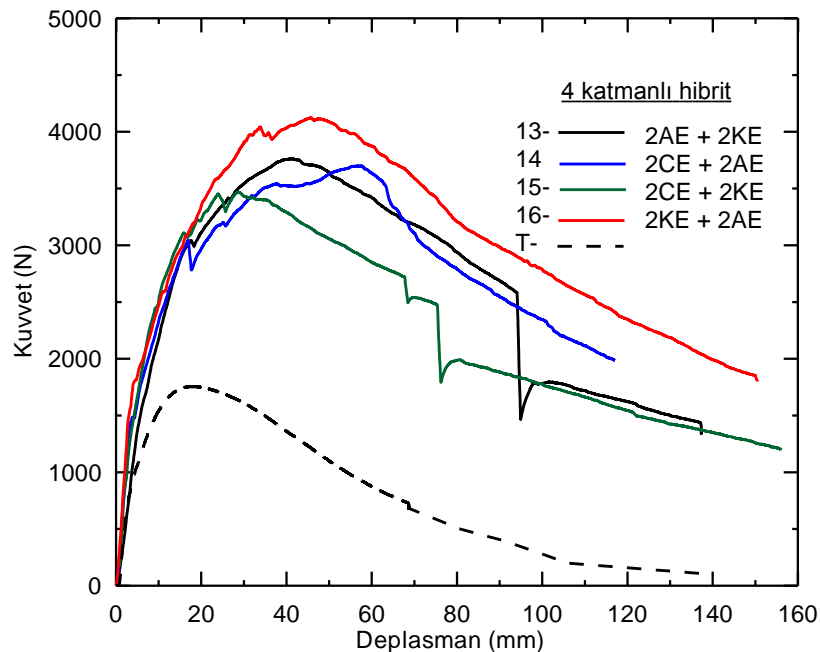
Tablo 6.7. Dıştan dokuma karbon elyaf ile takviye edilmiş hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F_{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F_{maks} oranı	Enerji oranı	F_{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
9	KE (2 kat)	T	2453	177	92	2.08	14804.69	6.3	1.4	1.7	26.7	1177.5	0.17	1.9	85.0
10	KE (4 kat)	T	4176	290	120	1.86	20821.22	12	2.4	2.8	34.8	2250.8	0.20	2.4	156.3
11	KE (6 kat)	T	6042	438	145	1.68	27716.6	17.7	3.4	4.3	41.7	3589.7	0.22	3.0	260.2
12	KE (10 kat)	T	10197	600.7	191	1.45	44474.25	29.1	5.8	5.9	53.4	7044.6	0.23	3.1	415.0
* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. KE: Karbon elyaf															

Dokuma karbon elyaf katman sayısı artırılarak oluşturulan hibrit kompozit kirişlerde en yüksek yük taşıma kabiliyeti 12 nolu kombinasyonda 5.8 kat (katman sayısı 10) görülmüştür. En yüksek enerji absorbe etme kabiliyeti 5.8 kat artışla yine aynı numunede elde edilmiştir. Tablo incelendiğinde, ÖYTK ve ÖEAK açısından da bu grup numunenin ilk sırada yer aldığı anlaşılmaktadır. F_{maks}/I , $F_{maks} /yoğunluk$ ve enerji/yoğunluk oranlarına göre bir seçim yapılması durumunda yine 12 nolu kombinasyon en yüksek sonucu vermektedir.

Buraya kadar tek tip elyaf türünün kullanıldığı ve katman sayısının 10 kata kadar arttırıldığı kompozitlerin sergilemiş olduğu eğme davranışı hakkında genel olarak (a) artan katman sayısı ile kiriş görevi gören yapının eğme direnci artmış, (b) katman sayısı ile elyaf katmanında hasarlanmanın başladığı deplasman değeri genelde azalmıştır. (c) çekme deneyinde nispeten gevrek davranış sergileyen karbon-epoksinin kullanıldığı tüp yapının diğerlerine göre daha erken hasarlandığı belirlenmiştir.

Toplam katman sayısının 4 ile sınırlandırıldığı dokuma halindeki cam, aramid ve karbon elyafın farklı sırada yer aldığı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.50'de verilmiştir. Çekme deneylerinden, cam-epoksi tabakasının yoğunluğunun diğerlerine göre daha yüksek olmasına karşın dayanım değerlerinin daha düşük olması nedeniyle, cam elyafın tüp kirişin yüzeyinde kullanılma durumu dikkate alınmamıştır.



Şekil 6.50. Farklı dokuma elyaf türleri (cam, aramid ve karbon) kullanılarak takviye edilmiş 4 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf)

Şekil incelendiğinde 4 katmandan oluşan tüp kirişlerde en yüksek yük taşıma kabiliyetini 16 nolu kombinasyon vermiştir.

Tüp yapının dış kısmında aramid yer alacak şekilde üretilen kompozit numunede hasarın nispeten daha büyük deplasman değerlerinde gerçekleştiği ve genel olarak yapının daha tok davranış sergilediğini söylemek mümkündür. Bunun nedeni, aramid elyafın çekme dayanımı yanı sıra kopma birim şekil değişiminin diğer elyaf malzemelere göre daha yüksek olması ile açıklanabilir (Tablo 6.1).

Hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.8'de listelenmiştir.

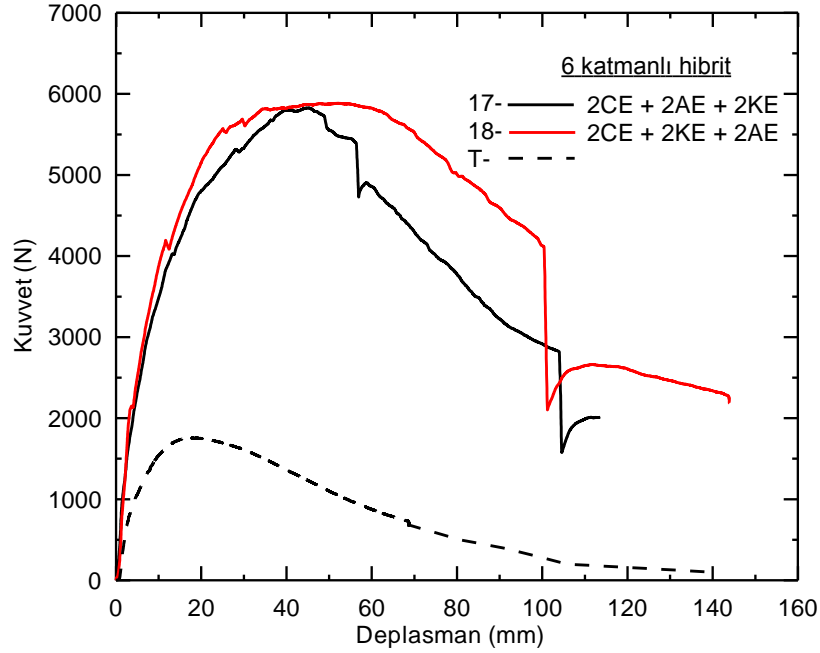
Tablo incelendiğinde 16 nolu (2KE+2AE) kombinasyonunda YTK 2.3 kat, EAK ise 3.3 kat arttığı anlaşılmaktadır. ÖYTK ve ÖEAK açısından ise aynı kombinasyonda 1.2 ve 1.6 kat artış görülmüştür.

F_{maks}/I , $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ ve $\text{enerji}/\text{yoğunluk}$ parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda 14 ve 16 nolu kombinasyonlar tercih edilebilir.

Tablo 6.8. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 4 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F_{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F_{maks} oranı	Enerji oranı	F_{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
13	2AE+2KE (4 kat)	T	3763	295	120	1.86	17964.98	10.5	2.1	2.9	31.4	2028.2	0.21	2.5	159.0
14	2CE+2AE (4 kat)	T	3698	296	126	1.95	14086.55	6.0	2.1	2.9	29.3	1898.2	0.26	2.3	151.9
15	2CE+2KE (4 kat)	T	3468	262	124	1.92	17381.32	7.5	2.0	2.6	28.0	1808.9	0.20	2.1	136.7
16	2KE+2AE (4 kat)	T	4126	334	120	1.86	17526.45	10.5	2.3	3.3	34.4	2223.8	0.24	2.8	180.0
* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf															

Hibrit yapının 6 katmandan oluştuğu kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.51’de verilmiştir.



Şekil 6.51. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 6 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri
(CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf)

6 katmandan oluşan kombinasyonlara ait eğriler incelendiğinde, y¼k taşıma kabiliyeti açısından 18 nolu kombinasyonun çok farklı olmamasına karşın, nispeten daha rijit ve tok davranış g¼sterdiđini s¼ylemek m¼mk¼nd¼r. Bu grup numunelerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.9’da listelenmiştir.

Tablo 6.9. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 6 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri

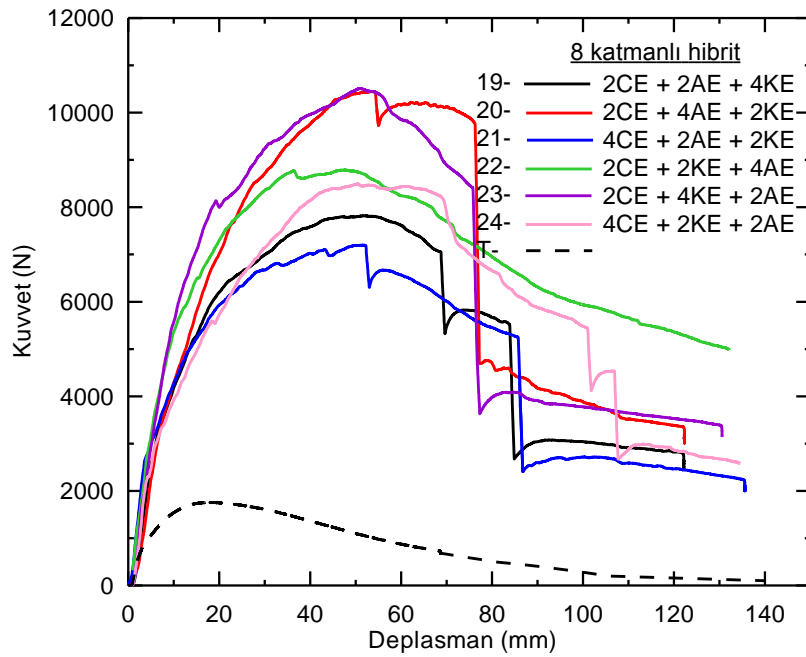
No	Kombinasyon		F_{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F_{maks} oranı	Enerji oranı	F_{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
-		T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
17	2CE+2AE+2KE (6 kat)	T	5828	432	151	1.75	20981.93	11.7	3.3	4.2	38.6	3325.0	0.28	2.9	246.5
18	2CE+2KE+2AE (6 kat)	T	5885	499	151	1.75	20500.66	11.7	3.4	4.9	39.0	3357.5	0.29	3.3	284.7

* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf

Tablo incelendiğinde 18 nolu kombinasyonda YTK 3.4 kat artmıştır. EAK ise 4.8 kat artmıştır. ÖYTK ve ÖEAK açısından ise aynı kombinasyon 1.35 ve 1.94 kat artış göstermiştir. F_{maks}/I , $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda yine 18 nolu kombinasyon tercih edilebilir.

Hibrit yapının 8 katmandan oluştuğu kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.52’de verilmiştir.

8 katmandan oluşan kombinasyonların kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde, 23 nolu kombinasyon yük taşıma kabiliyeti açısından 6 kat ile en iyi kombinasyon olduğu anlaşılmaktadır. Bu grup hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.10’da listelenmiştir.



Şekil 6.52. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 8 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri

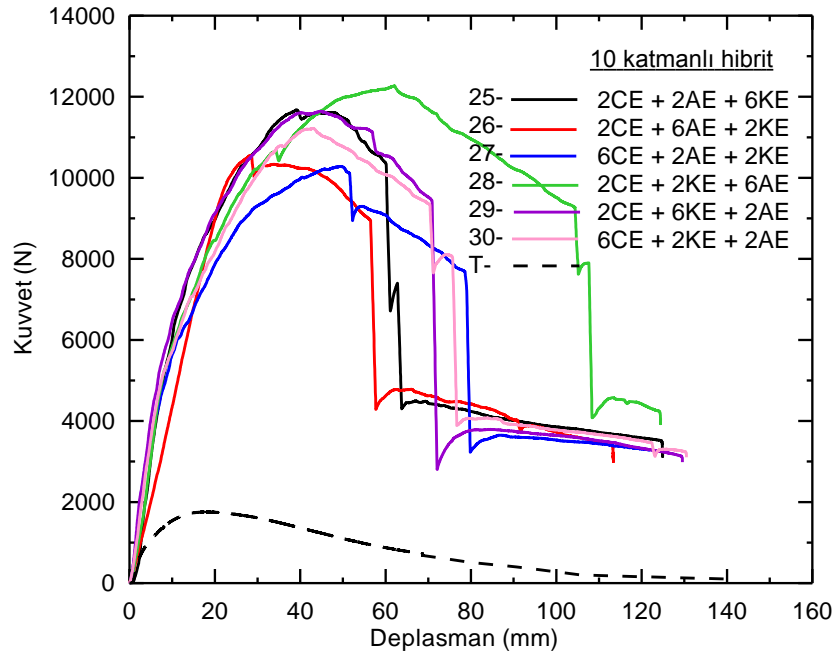
(CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf)

Tablo 6.10. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 8 katmanlı hibrit kompozit kırımlerin eğme deneyinden elde edilen sonuçlar ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F _{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F _{maks} oranı	Enerji oranı	F _{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık - ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
19	2CE+2AE+4KE	T	7818	570	175	1.61	28837.83	17.5	4.5	5.6	44.7	4850.5	0.27	3.3	353.6
20	2CE+4AE+2KE	T	10446	724	192	1.77	25061.79	15.9	5.9	7.1	54.4	5907.1	0.42	3.8	409.4
21	4CE+2AE+2KE	T	7198	538	176	1.62	24388.51	12.9	4.1	5.2	40.9	4440.4	0.30	3.1	331.9
22	2CE+2KE+4AE	T	8788	711	192	1.77	24054.52	15.9	5.0	6.9	45.8	4969.5	0.37	3.7	402.1
23	2CE+4KE+2AE	T	10509	728	175	1.61	27830.56	17.5	6.0	7.1	60.1	6520.0	0.38	4.2	451.7
24	4CE+2KE+2AE	T	8491	654	176	1.62	23862.51	12.9	4.8	6.4	48.2	5238.1	0.36	3.7	403.4

* 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf

Tablo incelendiğinde 23 nolu kombinasyon ÖYTK ve ÖEAK açısından 2.08 ve 2.47 kat artış göstermiştir. F_{maks}/I , $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda 20 ve 23 nolu kombinasyon tercih edilebilir. Hibrit yapının 10 katmandan oluştuğu kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları Şekil 6.53’de verilmiştir.



Şekil 6.53. Üç tip dokuma elyafın kullanıldığı, 10 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin kuvvet deplasman eğrileri (CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf)

Bu gruptaki numunelere ait eğriler incelendiğinde, takviyesiz yapıya göre en iyi YTK 28 nolu kombinasyonun gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu kombinasyonda aramid elyaf en dış tabakada ve katman sayısı diğerlerine göre daha fazla olduğundan yük taşıma kabiliyeti ve tokluğunun daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır.

Detaylı karşılaştırma yapmak amacıyla, katman sayısı 10 olan bu grup kompozit kirişlerin deney sonuçları ve değerlendirme parametreleri Tablo 6.11’de listelenmiştir. Buna göre, 28 nolu kombinasyonda takviyesiz yapıya göre, taşıma yükü 7 kat artmıştır. ÖYTK ve ÖEAK açısından ise artış oranları sırasıyla 2.2 ve 3 olarak hesaplanmaktadır. F_{maks}/I , $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk parametrelerine göre bir seçim yapılması durumunda yine 28 nolu kombinasyon tercih edilebilir.

Tablo 6.11. Dıştan dokuma cam, aramid ve karbon elyaf ile takviye edilmiş 10 katmanlı hibrit kompozit kirişlerin eğme deney sonuçlarından elde edilen değerler ve değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon		F _{maks} (kN)	Enerji* (kJ)	Ağırlık (kg)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	Maliyet/ parça	F _{maks} oranı	Enerji oranı	F _{maks} /ağırlık -ÖYTK- (kN/kg)	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
	-	T	1756	102.5	61	2.48	9588.949	0.54	1.0	1.0	28.8	708.1	0.18	1.7	41.3
25	2CE+2AE+6KE	T	11679	726	202	1.53	37739.58	23.2	6.7	7.1	57.8	7629.1	0.31	3.6	474.2
26	2CE+6AE+2KE	T	10551	645	192	1.46	29661.5	20.1	6.0	6.3	55.0	7251.2	0.36	3.4	443.3
27	6CE+2AE+2KE	T	10280	721	212	1.61	28216.59	14.8	5.9	7.0	48.5	6398.5	0.36	3.4	448.8
28	2CE+2KE+6AE	T	12268	986	192	1.46	28081.5	20.1	7.0	9.6	63.9	8431.3	0.44	5.1	677.6
29	2CE+6KE+2AE	T	11638	777	202	1.53	36159.58	23.2	6.6	7.6	57.6	7602.3	0.32	3.8	507.6
30	6CE+2KE+2AE	T	11219	765	212	1.61	27643.87	14.8	6.4	7.5	52.9	6982.9	0.41	3.6	476.2

* Enerjiler 100 mm deplasmana kadar hesaplanmıştır. CE: cam elyaf, AE: Aramid elyaf, KE: Karbon elyaf

Yük taşıma kabiliyeti ve maliyet göz önüne alınarak tüm tablolara göre bir inceleme yapıldığında; 2 katmanlı yapılarda aramid elyafın bulunduğu 1 nolu kombinasyonun daha uygun olduğu görülmektedir. 4 katmanlı yapılarda 6 nolu kombinasyon, 6 katmanlı yapılarda, 18 nolu kombinasyon, 8 katmanlı yapılarda ise 23 nolu kombinasyon, 10 katmanlı yapılarda ise 25 ve 28 nolu kombinasyonların tercih edilebilir olduğu anlaşılmaktadır.

30 mm çaplı alüminyum tüp kiriş ile oluşturulan hibrit kompozit kirişlerin eğme deneyi sonrasına ait görüntüleri Şekil 6.54'de verilmiştir.

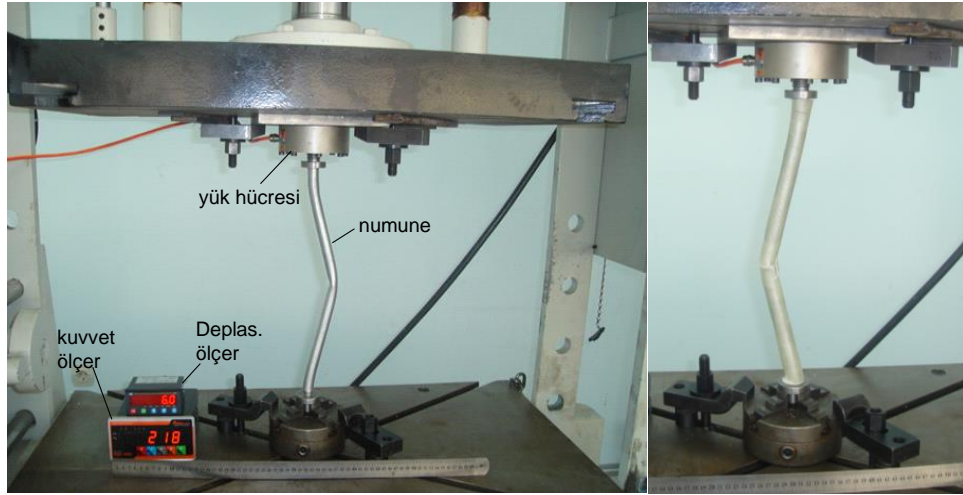


Şekil 6.54. 30 mm çaplı alüminyum tüp ile oluşturulan bir grup hibrit kompozit numunenin eğme deneyi sonrasına görüntüleri

6.1.3.7. Burkulma deney sonuçları

19 mm çaplı ($t=1$ mm) ve 400 mm boyundaki alüminyum tüp kirişlerin içten (kestamit) ve dıştan (cam veya karbon elyaf dokuma) takviye edilerek burkulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dıştan takviyede kumaş kalınlığı her iki elyaf için aynı olup, katman sayısı dört olarak sabit tutulmuştur. Deney sistematığı açısından her bir

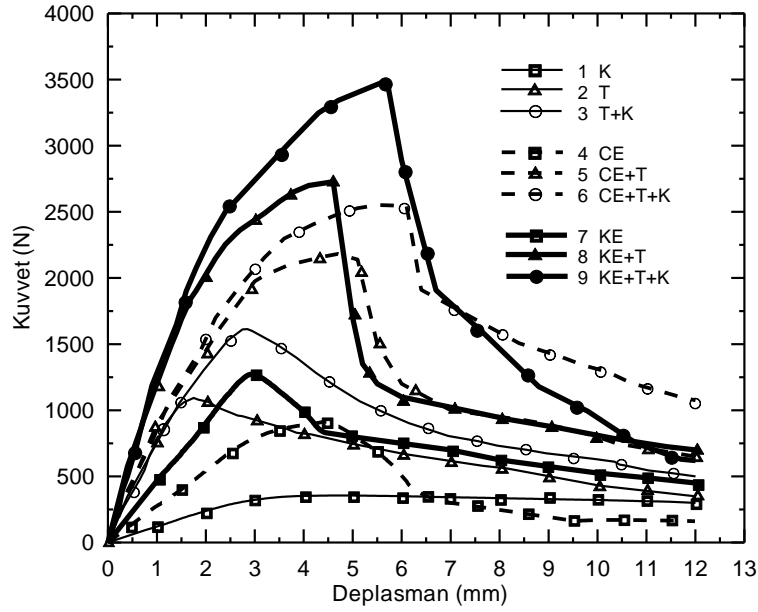
takviyenin etkisini ayrıca değerlendirebilmek için numuneler ayrı ayrı hazırlanmış ve son kademedeki her iki (hem iç, hem dış) takviye için deneyler tekrarlanmıştır. Deney başlangıçta numune şeklinde fark edilebilir bir değişiklik gözlenmezken, artan kuvvetin etkisiyle belirli bir deplasmanda parçanın orta bölgesinde bükülme kendini göstermiştir (Şekil 6.55).



Şekil 6.55. Deney sırasında (a) takviyesiz (b) elyaf takviyeli kompozit kirişin burkulması

Temel mekanik bilgilerinden, iki ucundan ankastre bağlantılı numunelerde bükülmenin beklendiği aralık hesapla tahmin edilebilir ve numunenin orta kısmına karşılık gelir [67].

Elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri olarak Şekil 6.56'da verilmiştir. Görüldüğü gibi grafikler elastik zorlanma şartlarında kritik burkulma değerine ulaşıncaya dek doğrusal bir davranış göstermektedir. Takviyenin etkisiyle beklendiği üzere, takviye edilen yapının burkulma yükleri ve numune eğilme rijitliği yükselmiştir. Buna ilave olarak, burkulma deplasmanı değerleri de bütün numuneler için genel olarak artmıştır. Burkulma deplasmanı değeri, takviyesiz yapı için 1.8 mm iken, en yüksek burkulma kuvvetinin elde edildiği 6, durum (kestamit ve karbon elyaf) için bu değer 5.7 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.56. Burkulma deneyine tabi tutulmuş numunelerin kuvvet deplasman grafikleri

Burkulma deney sonuçları, numune ağırlıkları, hesaplanan özgül burkulma kuvveti değerleri ve burkulmanın başladığı noktaya kadar olan enerji değerleri Tablo 6.12'de toplu olarak verilmiştir. Buna göre; takviyesiz tüp kiriş için 1093 N olan burkulma yükü, içten kestamid ile takviye edilmesi durumunda 1610 N'a yükselmiştir. Sadece dıştan cam ve karbon elyaf takviye katmanlarının ayrı ayrı kullanılması durumlarında, burkulma yükü sırasıyla 2182 N ve 2730 N değerlerine ulaşmıştır. İçeriden kestamid ve dıştan elyaf takviyeler birlikte kullanıldığında ise, burkulma yükü cam elyaf için 2552 N ve karbon elyaf için 3490 N değerlerine ulaşmıştır. Tablo 6.12'den de görüleceği gibi, en yüksek burkulma yükü 9 nolu kombinasyonla elde edilmekle beraber, yüksek burkulma yükünün yanı sıra aynı zamanda hafifliğin de istendiği durumlarda tercih edilebilecek en iyi kombinasyonun 8 nolu kombinasyon olduğu görülmektedir. F_{maks}/I açısından 6 nolu kombinasyon, $F_{maks} / \text{yoğunluk}$ ve enerji/yoğunluk açısından ise 8 nolu kombinasyon tercih edilebilir.

Burkulma deney sonuçlarını gösteren grafiklerde (Şek. 6.56), cam elyaf ve karbon elyaf sarılmış deney numunesi grupları birbirleriyle karşılaştırıldığında, karbon elyaf numunelerde burkulma kuvveti daha yüksek olmakla birlikte, grafikteki düşüşün daha kısa aralıkta ve hızlı bir şekilde olduğu, buna karşılık cam elyaf numunelerde bunun nispeten daha geniş bir deplasman aralığında gerçekleştiği görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni karbon-epoksi tabakasının nispeten daha gevrek özellikte olmasıdır.

Bir grup deney numunesinin deney sonrası hasarlanmış durumu Şekil 6.57’de verilmiştir. Bu numunelerin bükülme bölgesi farklılık göstermektedir. Dıştan elyaf takviye edilen parçalarda bükülme noktası, yine beklenen aralık içerisinde kalmakla birlikte, bükülmenin elyafın parça boyunca karşılaşılan en zayıf noktasından başlaması nedeniyle, bir miktar yer değiştirebilmektedir. Bükülme yönü için ise bir öngörude bulunmak söz konusu değildir.

Tablo 6.12. Farklı kombinasyonlar için elde edilen burkulma kuvveti ve F_{maks} /ağırlık oranı değerleri

No	Kombinasyon ^a	F_{maks} (N)	Enerji ^b (J)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti ($I_{eş}$) (mm ⁴)	Rijitlik (N.m ²)	F_{maks} oranı -	Enerji oranı -	$F_{maks}/$ ağırlık (N/g)	F_{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F_{maks} / $I_{eş}$ (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk
1	K	355.6	1.1	100	4.42	4099.8	9	0.32	1.0	3.6	80.4	0.09	11	0.25
2	T	1093	1.12	64	0.56	2297.3	159	1.00	1.0	17.08	1936.9	0.48	17.5	1.98
3	T+K	1610	2.7	150	2.45	2431.0	168	1.47	2.4	10.73	657.5	0.66	18.0	1.10
4	CE	914.3	2.5	57	0.93	5101.9	72	0.84	2.2	16	982.7	0.18	43.9	2.69
5	CE+T	2182	7.0	120	1.32	3354.6	231	1.99	6.3	18.18	1650.9	0.65	58.3	5.30
6	CE+T+K	2552	9.4	210	5.43	3488.3	241	2.33	8.4	12.15	469.6	0.73	44.8	1.73
7	KE	1272.4	1.95	52	1.35	5101.9	214	1.16	1.7	24.5	945.5	0.25	37.5	1.45
8	KE+T	2730	7.7	110	0.72	5402.8	373	2.5	6.9	24.82	3773.7	0.51	70.0	10.64
9	KE+T+K	3490	13.6	200	1.32	5536.5	382	3.19	12.1	17.45	2653.3	0.63	68.0	10.34

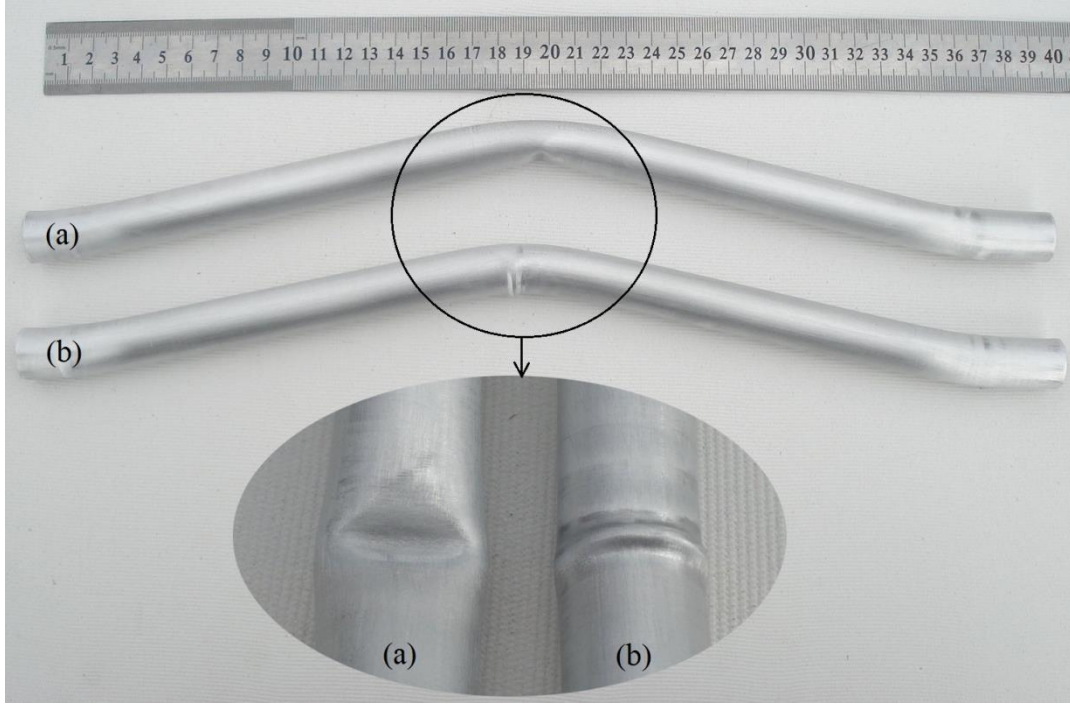
^aT: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, CE: cam elyaf takviyeli epoksi, KE: karbon elyaf takviyeli epoksi, ^bEnerji değerleri bükülme deplasmanına kadar hesaplanmıştır



Şekil 6.57. Burkulma deneyine tabi tutulmuş bir grup deney parçası

Genel olarak, yapılan takviye yapının stabilesini iyileştirmiş ve böylece burkulma yükü de kirişin artan eğilme rijitliği ile orantılı olarak artmıştır. Diğer taraftan, kirişteki plastik şekil değişimi, dolayısıyla da hasar başlangıç mekanizmasının yapılan takviye ile geciktirilmiş olması burkulma performansını iyileştirici bir diğer önemli faktörü oluşturmaktadır.

Takviyesiz tüp kirişin burkulma davranışı Şekil 6.58-a'da verilmiştir. Buna göre, bükülme hareketi burkulma bölgesindeki tüp kiriş cidarının içeriye doğru katlanmasıyla başlamakta ve burkulma yönünde ilerlemektedir. Ancak, içten kestamit ile takviye edilmesi durumunda tüp kirişin burkulma davranışı değişmektedir (Şekil 6.58-b). Şekilden de görüldüğü gibi, tüp kiriş içinde polimerik malzemenin bulunması nedeniyle katlanma içeriye doğru değil, tersine lokal olarak dışarıya doğru olmaktadır. Bu davranış, içten yapılan takviyenin tüp kirişe kazandırdığı dikkat çekici karakteristik bir özelliktir. İçeriden takviyede kullanılan polimerik malzemenin zayıflığına rağmen burkulma yükündeki artış miktarı dikkate alındığında, kiriş performansındaki artışın hasar mekanizmasındaki değişiklikten kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 6.58. (a) Takviyesiz tüp kirişin burkulma davranışı, (b) İçeriden kestamid takviyeli tüp kirişin burkulma davranışı

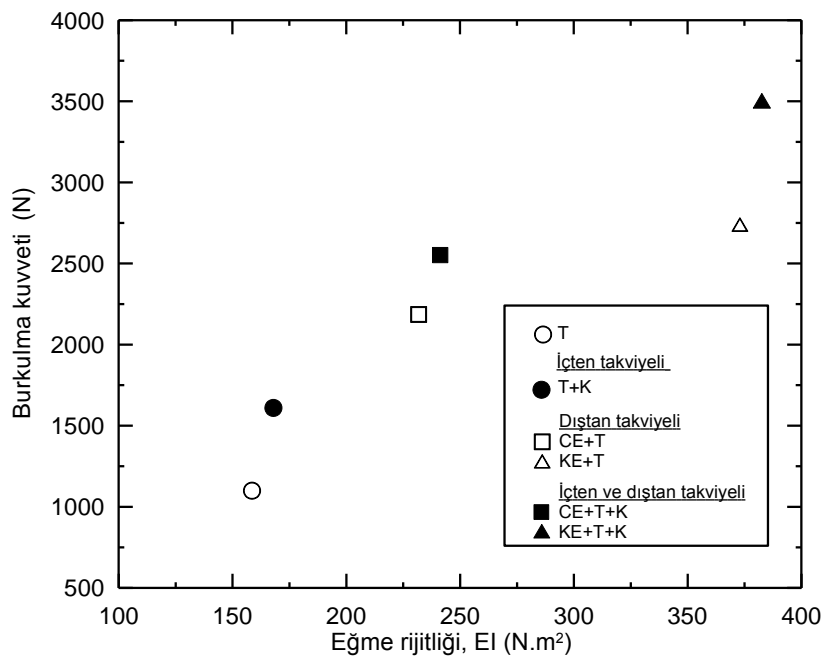
Elyaf ile dıştan yapılan takviyede, kullanılan elyafının mukavemet değerlerine bağlı olarak burkulma yükünde artış beklenmelidir. Nitekim elyaf takviyenin uygulandığı tüm kombinasyonlarda burkulma yükünün devamlı arttığı, karbon elyaf ve kestamitin birlikte kullanıldığı 9 nolu kombinasyonda maksimum burkulma yükü değerine ulaşıldığı görülmektedir. Dıştan yapılan elyaf takviye, sadece kesitin atalet momentini arttırarak burkulma açısından yapının stabilitesini iyileştirmesi nedeniyle değil, aynı zamanda, yukarıda da ifade edilen, içten takviye edilen numunelerde görülen dışa katlanmayı engellemesi nedeniyle de burkulma yükünü ciddi oranda arttırmaktadır. Burkulma yükünü doğrudan etkileyen en önemli büyüklüğün kesitin eğilme rijitliği olması dikkate alındığında, yapılan takviyelerle burkulma yükünün artması deney sonuçlarının kendi içinde tutarlı olduğunu göstermektedir.

Belirli bir kompozit kiriş için eğme rijitliği aşağıdaki formülasyon ile hesaplanabilir;

$$ER = \sum_i^n E_i I_i \quad (6.1)$$

Burada n bileşen sayısı, E (MPa) elastiklik modülü, I (mm⁴) atalet momentidir.

Kompozit kirişlerin hesaplanan eğme rijitlikleri Tablo 12’de verilmiştir. Kompozit kirişlerin eğme rijitliğinin burkulma kuvvetine göre değişimi Şekil 6.59’da verilmiştir. Grafiğe göre rijitlikle burkulma kuvveti arasında bir ilişkinin olduğunu söylemek mümkündür. Tüp yapıya yapılan içten takviye lokal deformasyonu engelleyerek burkulma kuvvetini artırmasına karşılık rijitlik değerlerindeki artış önemsenmeyecek miktardadır.

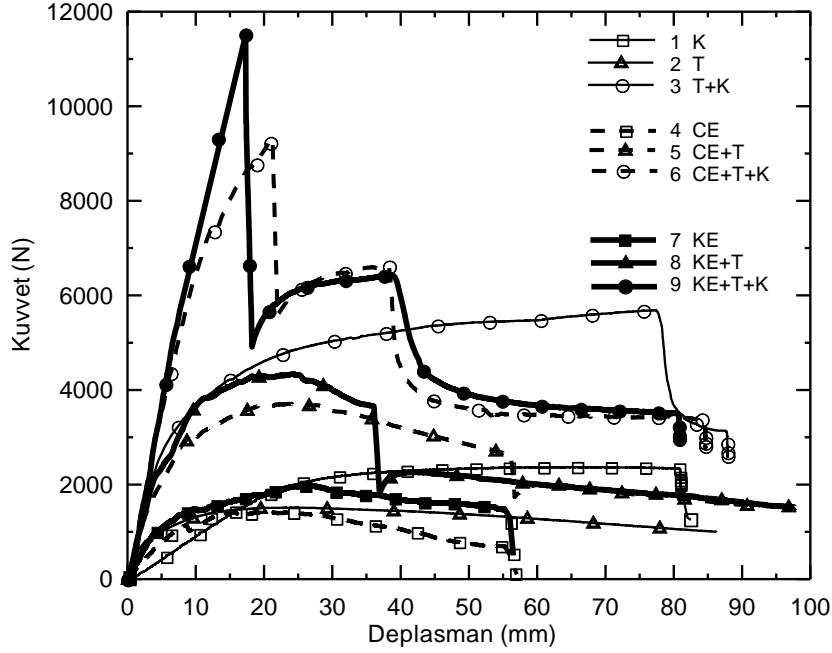


Şekil 6.59. Farklı kombinasyonlardaki kompozit kirişlerin rijitliğinin burkulma kuvvetine göre değişimi (T: Tüp kiriş, K: Kestamid, CE: Cam elyaf takviyeli polimer, KE: Karbon elyaf takviyeli polimer)

Çapı 19 mm olan alüminyum tüp ile oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçları;

Altı farklı kombinasyonda hazırlanan deney numunelerine uygulanan eğme testlerinin sonuçları kuvvet-deplasman grafikleri olarak Şekil 6.60’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre; takviyesiz tüp kiriş için 1512 N olan eğme yükü, içten kestamid ile takviye edilmesi durumunda 5686 N’a yükselmiştir. Sadece dıştan cam ve karbon elyaf takviye katmanlarının ayrı ayrı kullanılması durumlarında, eğme yükü sırasıyla 3710 N ve 4335 N değerlerine ulaşmıştır. İçeriden kestamid ve dıştan elyaf takviyeler birlikte

kullanıldığında ise, eğme yükü cam elyaf için 9332 N ve karbon elyaf için 11500 N değerlerine ulaşmıştır. Şekil 6.60'dan da görüleceği gibi, en yüksek eğme yükü 9 nolu kombinasyonla elde edilmiştir. Bu kombinasyon aynı zamanda, yüksek eğme yükünün yanı sıra hafifliğin de istendiği durumlarda tercih edilebilecek bir seçenek sunmaktadır.



Şekil 6.60. Çapı 19 mm olan alüminyum tüp kiriş ile oluşturulan kombinasyonların eğme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

İçten yapılan takviyenin kiriş performansına yalnız başına yapmış olduğu katkı, bu numuneler için sırasıyla 3.76, 2.51 ve 2.65 olarak ortaya çıkmıştır. Bu kazanımlar sadece tüp içine konulan kestamitin teknik özellikleriyle açıklanması mümkün değildir. Bu durum geliştirilen metal-plastik hibrit-kompozit yapıda kullanılan elemanların arasındaki sinerjinin bir sonucudur.

Dıştan yapılan takviyenin kiriş performansına yalnız başına yapmış olduğu katkı, cam elyaf ve karbon elyaf takviye katmanlarının boş tüpe sarılmaları durumunda sırasıyla 2.45 ve 2.87; içten kestamit ile takviye edilmiş tüpe sarılmaları durumunda ise sırasıyla 1.64 ve 2.02 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek mukavemet değerleri nedeniyle, her durumda karbon elyafın katkısının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Grafik incelendiğinde, sadece içten yapılan takviyede sağlanan kuvvet artışının (3.76 kat) sadece dıştan yapılan takviyelere (2.45 ve 2.87 kat) göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni eğme zorlanması sırasında mandrel altında gelişen burkulmanın, dıştan yapılan takviyeye göre daha fazla engellemesidir. Kirişin maksimum eğme yükünün, mandrel etkisi altında burkulma oluşumu ve kiriş cidarındaki akmayla yakından ilişkili olduğu daha önce yapılan simülasyon çalışmalarından anlaşılmıştır [12]. Bu fiziksel olarak beklenen bir durum olup, içerideki takviye unsurunun rijitliği ile ilişkilidir. Numunelerin eğme testleri sırasındaki hasarlanma durumlarına bakıldığında, sadece içten kestamit takviyeli numunede, 78 mm deplasman değerinden sonra tüpün 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 6 ve 9 nolu numunelerde kuvvetin iki kademe oluşturarak düşmesi ise, yukarıdaki sözü edilen iki hasarın peşi sıra meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu numunelerden, karbon elyaflı altıncı numunenin, cam elyaflı dördüncü numuneye göre daha düşük deplasmanda hasarlanması, karbon elyafın kopma uzaması değerinin cam elyafa göre daha düşük olmasıyla açıklanabilir.

Ayrıca, deney sonuçlarından elde edilen özgül yük taşıma ve özgül enerji absorbe etme değerleri Tablo 6.13’de verilmiştir.

En yüksek enerji absorbe etme kapasitesi, içten kestamit ve dıştan KE ile takviye edilmiş 9 nolu numunede ortaya çıkmıştır. Özgül enerji açısından ise dıştan KE ile takviye edilmiş 8 nolu numune daha iyi bir seçenek sunmaktadır.

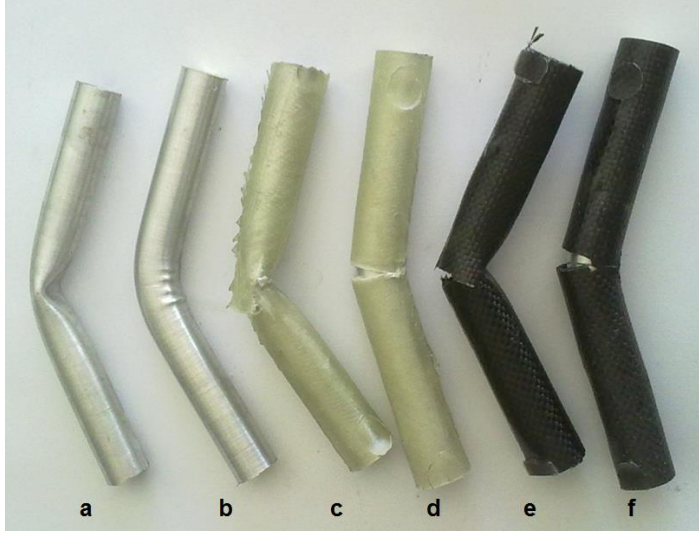
$F_{maks}/I_{eş}$ açısından 6 nolu kombinasyon, $F_{maks}/\text{yoğunluk}$ açısından 8 nolu kombinasyon ve enerji/yoğunluk açısından ise 8 nolu kombinasyon tercih edilebilir.

Deney sonrası hasarlanmış numunelere ait görüntüler Şekil 6.61’de verilmiştir.

Tablo 6.13. Çapı 19 mm olan alüminyum tüp ile oluşturulan kompozit kirişlerin eğme deneyi sonuçlarından elde edilen değerlendirme parametreleri

No	Kombinasyon	F _{maks} (N)	Enerji * (J)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Eşdeğer atalet momenti (I _{eş}) (mm ⁴)	F _{maks} oranı	Enerji oranı	F _{maks} / Ağırlık -ÖYTK- (N/g)	F _{maks} /yoğunluk (Ncm ³ /gr)	F _{maks} /I _{eş} (N/mm ⁴)	Enerji /ağırlık -ÖEAK- (kJ/kg)	Enerji/ yoğunluk (kJ cm ³ /gr)
1	K	2370	59.9	46	4.42	4099.8	1.57	1.1	51.5	536.1	0.58	1.3	13.5
2	T	1512	53.5	28	0.56	2297.3	1.0	1.0	54.0	2679.4	0.66	1.91	94.8
3	T+K	5686	165	74	2.45	2431.0	3.76	3.1	76.84	2322.2	2.34	2.23	67.4
4	CE	1422	46	24	0.93	5101.9	0.94	0.9	59.25	1528.3	0.28	1.91	49.4
5	CE+T	3710	124	52	1.32	3354.6	2.45	2.3	71.37	2807.0	1.11	2.38	93.8
6	CE+T+K	9332	243	100	5.43	3488.3	6.17	4.5	93.32	1717.2	2.68	2.43	44.7
7	KE	1979	63	20	1.35	5101.9	1.30	1.2	98.95	1470.6	0.39	3.15	46.8
8	KE+T	4335	136.4	48	0.72	5402.8	2.87	2.5	90.31	5992.3	0.80	2.84	188.5
9	KE+T+K	11500	244.2	96	1.32	5536.5	7.61	4.6	119.8	8743.1	2.08	2.54	185.7

T: Alüminyum tüp kiriş, K: Kestamit, CE: Cam elyaf takviyeli kompozit, KE: Karbon elyaf kompozit, * 40 mm deplasman esas alınarak hesaplanmıştır.



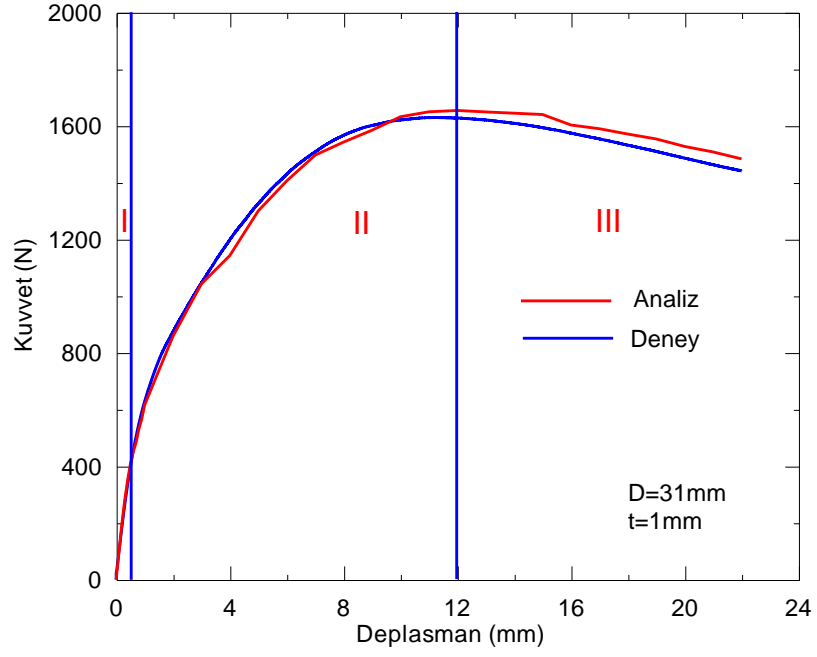
Şekil 6.61. Çapı 19 mm olan alüminyum tüp kiriş ile oluşturulan kombinasyonların eğme deneyi sonrası görüntüleri (a) T (b) T+K (c) CE+T (d) CE+T+K (e) KE (f) KE+TK

İçten ve dıştan takviyeli kompozit kirişlerin yük taşıma ve enerji absorbe etme kabiliyetindeki artış miktarları takviyesiz tüp kiriş ile karşılaştırılmıştır. Kıyaslama yapılacak ana yapıyı cam elyaf olarak seçtiğimizde, içten alüminyum tüp kiriş takviyesiyle YTK'de 2.6 kat, tüp kiriş ve kestamit takviyesiyle 6.6. kat artış elde edilmiştir. EAK'de ise sırasıyla 2.7 ve 5.3 kat artış görülmüştür.

6.2. Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

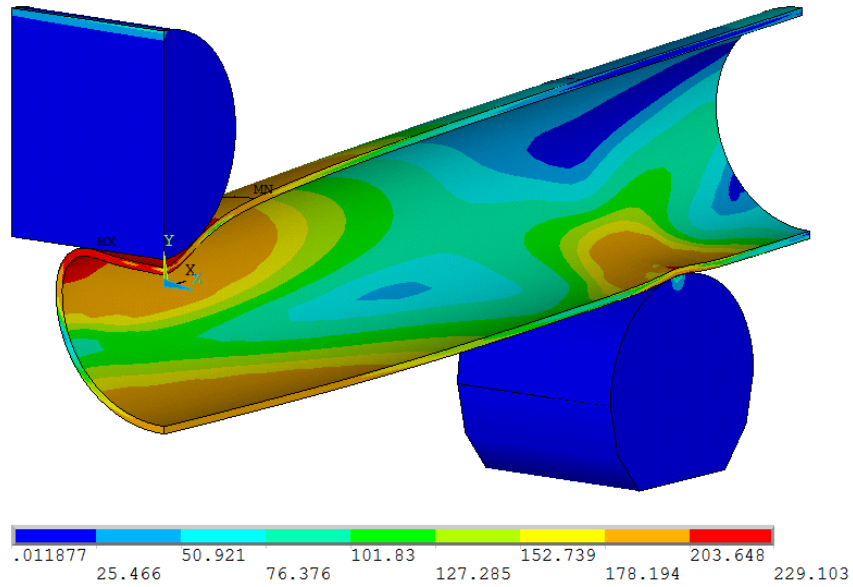
6.2.1. Takviyesiz tüp kirişin sonlu eleman analiz sonuçları

Şekil 6.62'de $D=31\text{mm}$ ($D/t=31$) olan tüpün deney ve analize ait kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Modellemede kullanılan malzemeye ait verilerin belirlenmesindeki hassasiyet analizin başarısını doğrudan etkilemiştir. Şekil 6.62'de kuvvet-deplasman grafiğinin bölgelere ayrıldığı görülmektedir.



Şekil 6.62. D=31 mm (D/t=31) tütün kuvvet-deplasman grafiği

Şekil 6.63'de tüp kirişin 12 mm deplasman için von-mises gerilme dağılımını gösteren analize ait perspektif görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.63. Takviyesiz tüp kirişin 12 mm deplasman değerindeki von-mises gerilme dağılımını gösteren analize ait görüntüsü

Şekil 6.64’de ise farklı deplasman değerlerinde (6, 9 ve 12 mm) deneyi yapılan parçaların ortasından kesilerek elde edilen kesite ait fotoğraflar ve aynı deplasman için analize ait görüntüler verilmiştir.

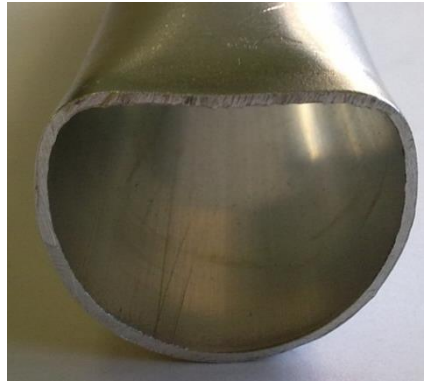
Her iki kesit deformasyon görüntüsünden analizin plastik deformasyonun belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

İnce cidarlı yapıların eğme zorlanması altındaki plastik deformasyon davranışlarında üç farklı rejim görülmektedir. Şekil 6.62’de 31 mm çaplı ve 1 mm cidar kalınlığındaki tüp için kuvvet-deplasman grafiğine incelendiğinde; başlangıçta kuvvetin deplasmanla orantılı bir şekilde arttığı ve 0.5 mm’lik deplasmana kadar tam elastik davranış gösterdiği dikkati çekmektedir. Bu deplasman değerine kadar ki 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 azalmıştır. Bu bölgenin sonunda yapının erişebileceği en büyük kuvvet değerine ulaşılmaktadır. Şekilden de anlaşıldığı gibi, 12 mm II. Bölgenin sona erdiği deplasman değeridir. 12 mm’den 22 mm’ye kadar olan kısım ise III. Bölgeye ait olup, maksimum yükten hemen sonra kiriş plastik mafsallık etrafında bükülerek, çökmenin (kuvvetin aşırı miktarda düşmesi) belirgin bir şekilde kendini gösterdiği bölgedir. İlerleyen deplasmanlarda, tüpün büküldüğü bölgede aşırı şekil değişimi nedeniyle tüp cidarları birbirlerine daha da yaklaşmaktadır.



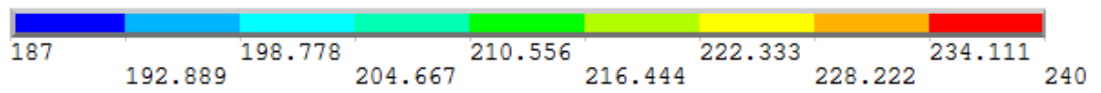
(a) 6 mm



(b) 9 mm



(c) 12 mm



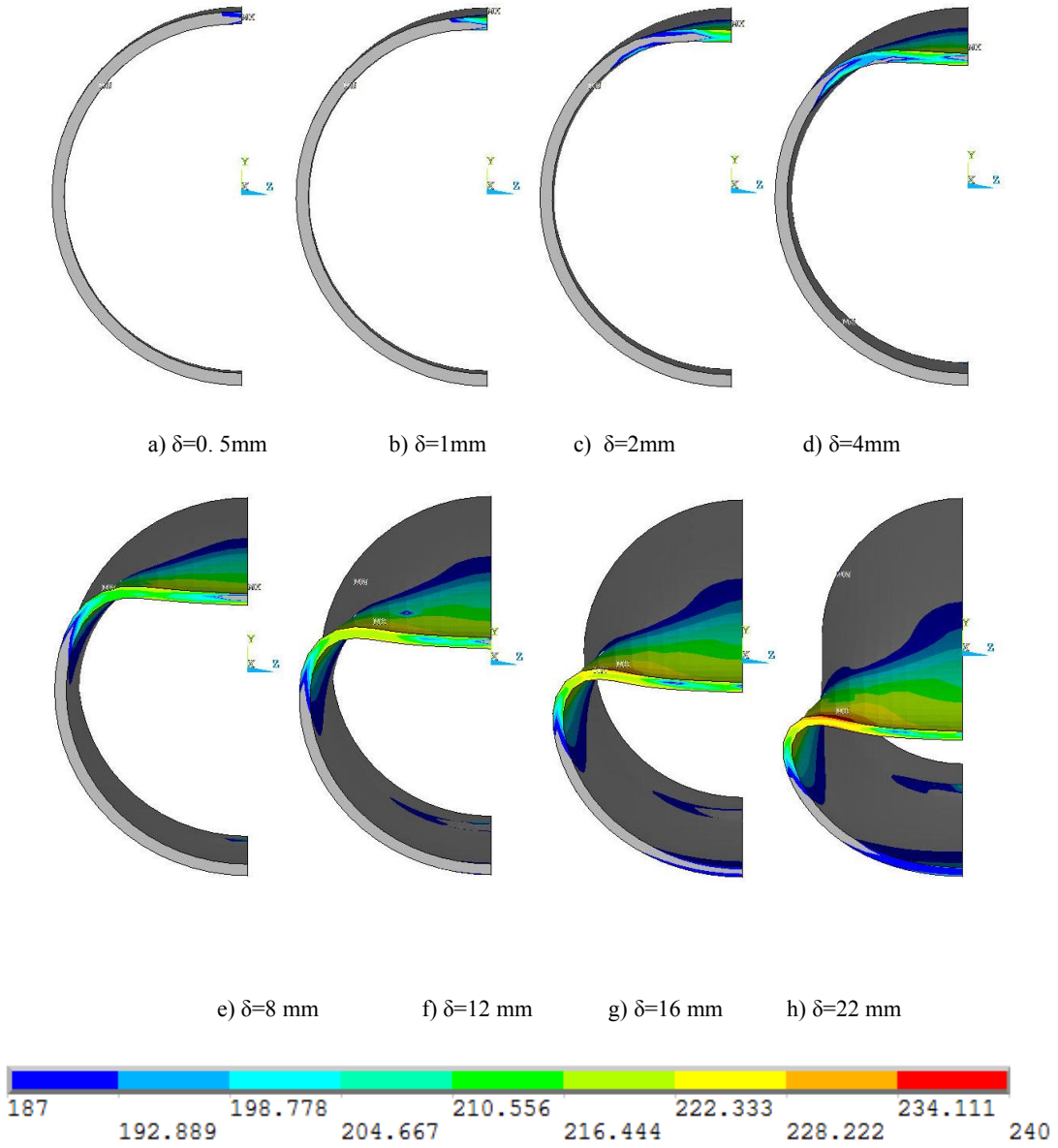
Şekil 6.64. Farklı deplasman değerlerinde tüp kirişin orta noktasındaki von-mises gerilme dağılımının gösteren deney ve analize ait sonuçlar

Görüldüğü gibi eğrinin deneysel kuvvet-deplasman grafiğine benzer şekilde, küçük deplasmanlarda belirli bir kuvvet değerine kadar kuvvetin yükseldiği daha sonra düşme eğilimine girdiği görülmektedir. Tüpün plastik davranışını detaylı bir şekilde incelenmek için elastik bölgede ve eğrinin karakteristik noktası olan en büyük kuvvet değerinin görülmesi muhtemel deplasman değerleri için analizler tekrarlanmış ve daha küçük deplasman aralıklarında çözümlenmeler yapılmıştır. En büyük kuvvet değeri için sonlu eleman sonucu ($F_{maks}=sonlu$) ile deneysel çalışmaya ait sonuç ($F_{maks}=deneysel$) karşılaştırıldığında aralarındaki farkın maksimum %1.5 olduğu anlaşılmaktadır. Modellemenin büyük deformasyonlar ile temas içermesi ve ayrıca doğrusal olmayan malzeme davranışını gerektirmesi nedenlerinden dolayı yukarıdaki farkın (%1.5) makul olduğu düşünülmektedir.

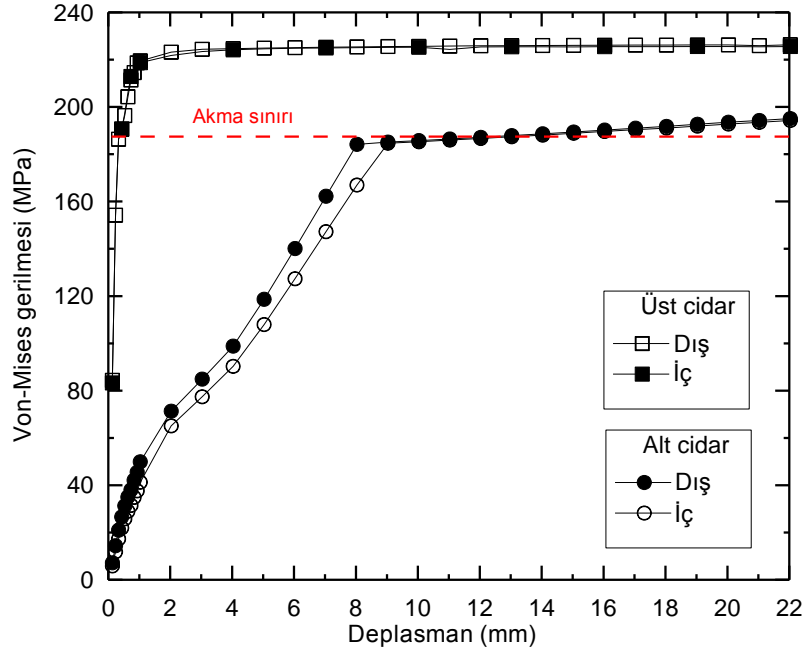
Yukarıda verilen modelin doğrulanması amaçlı analiz çalışmalarından sonra parça kesitindeki gerilme dağılımının ve şekil değişiminin incelenmesi, hangi aşamada kuvvetin en büyük değerini aldığı deplasmana ulaşıldığı ve de bükülme oluşumunun nasıl meydana geldiği sorularını cevaplamak üzere tüp yapı üzerinde analiz sonuçlarının incelenmesine devam edilmiştir.

Şekil 6.64'de tüp kirişte, efektif gerilmenin tüp malzemesinin akma sınırına ulaştığı (ve/veya aştığı) deplasmanlar değerleri için analiz sonuçları verilmiştir. Burada 0.3 mm'nin altındaki deplasman değerlerinde parçanın kesitinde akmanın oluşmadığı tespit edilmiştir. Tüp kirişin ortasında alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilmenin dağılımı Şekil 6.66'da sunulmuştur. Şekil 6.65- 66 dikkate alınarak aşağıdaki irdelemeler yapılmıştır.

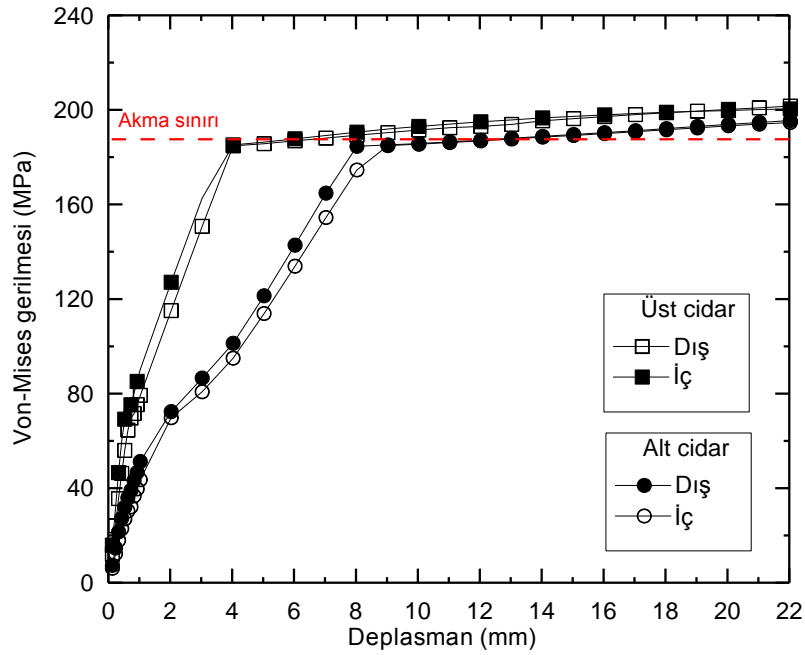
0.3 mm deplasmanda, mandrelin temas bölgesinde lokal deformasyon nedeniyle üst cidarın iç ve dış yüzeylerindeki gerilmeler akma sınırına ulaşmıştır (Şekil 6.66). Diğer taraftan, mandrel ile temas etmeyen kısımlardaki gerilme akma sınırından daha küçüktür (Şekil 6.65-a). Dolayısıyla plastik deformasyon sadece mandrel temas bölgesiyle sınırlıdır. Şekil 6.67'de mandrelin temas etmediği, parçanın orta kısmında üst ve alt cidarların dış ve iç yüzeylerindeki gerilmenin deplasmanla değişimi verilmiştir.



Şekil 6.65. Sonlu elemanlar analizi ile 3 nokta eğme simülasyonu yapılan $D=31\text{mm}$, $t=1\text{mm}$ olan alüminyum tüpün farklı deplasman değerlerindeki Von-mises gerilme dağılımı



Şekil 6.66 Tüp kirişin ortasında alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeylerine ait noktalarda deplasmana bağlı olarak gelişen efektif gerilme dağılımı



Şekil 6.67. 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

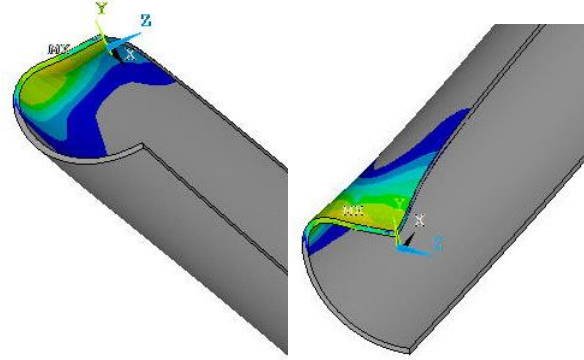
Yaklaşık 0.5 mm deplasmana kadar lokal plastik deformasyona rağmen, tüp yapının genel davranışı elastik türdedir. Hatırlanacağı üzere, Şekil 6.62’de I. Bölge elastik kısmı kapsamaktadır. 0.5 mm deplasmandan sonra genel olarak elastik davranış sona erdiğinden deplasmanla kuvvetteki artış hızı azalmaktadır. Bu deplasman değerinde, parça yüzeyinde ovalleşme kendini göstermeye başlamaktadır (Şekil 6.65-b), 2.4 ve 8 mm deplasman değerlerinde kirişin ovalleşen kısmı büyük miktarda artmış ve cidarda artan gerilmenin konumu kiriş orta noktasından yan cidarlara doğru kaymaya başlamıştır.

Şekil 6.68’de 11, 12 ve 13 mm deplasman değerlerinde alt cidarın iç ve dış yüzeyindeki gerilme dağılımları görülmektedir. Burada gerilme ölçeğinin alt sınırı olan 187 MPa, tüp malzemesinin akma sınırıdır. Dolayısıyla şekildeki gri bölgelerde akma olayı söz konusu değildir.

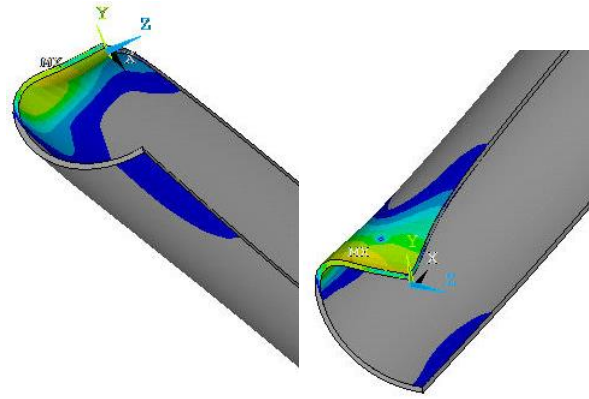
Şekil 6.68-a’da görüldüğü gibi 11 mm deplasmanda tüp kirişin alt cidarın iç ve dış yüzeyinde akma oluşmamakta, ancak 12 mm deplasmandan sonra hem iç, hem de dış yüzeyde akma belirgin olarak kendini göstermektedir. Eğme kuvvetinin 12 mm deplasmanda en büyük değerini almış olduğu göz önünde bulundurulur (Şekil 6.62) ve bu deplasman ve sonrasında akma alanlarının genişlemiş olduğu dikkat edilecek olursa, üç nokta eğme şartlarında zorlanan kiriş görevi gören bir tüp yapının yük taşıma kapasitesinin doğrudan alt cidarının akmasıyla ilişkili olduğu söylemek mümkündür. Daha önce de sözü edildiği gibi deneysel verilerde de en büyük kuvvet yaklaşık olarak 12 mm deplasman değeri için tespit edilmiştir. Buradan, deplasman miktarı kiriş çapının % 40’ına ulaştığında kuvvetin en büyük değerini aldığı sonucu çıkarılabilir.

Şekil 6.69-a’da, 12 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 oluşmamıştır. Şekil 6.62’deki kuvvet deplasman eğrisindeki görüldüğü gibi, 10-14 mm deplasman aralığında kuvvet sabit kalmakta, ancak akma alanı alt cidar kalınlığının yaklaşık % 40’ına yayıldığında (14 mm deplasman) kuvvet düşmeye başlamaktadır. Şekil 6.69-a’da 12 ve 14 mm deplasmanlarda akma alanının cidar kalınlığı boyunca genişlediği görülmektedir. Bu

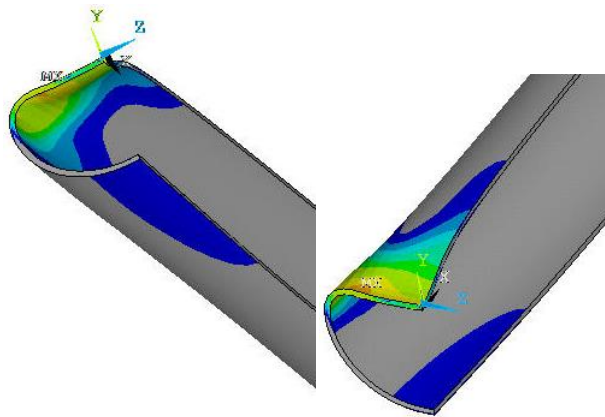
sonuçlardan; bükülme olayının kirişin alt cidarındaki akma miktarıyla yakından ilişkili olduğunu ispatlamaktadır.



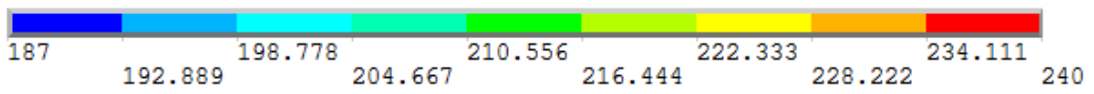
a) $\Delta=11\text{mm}$



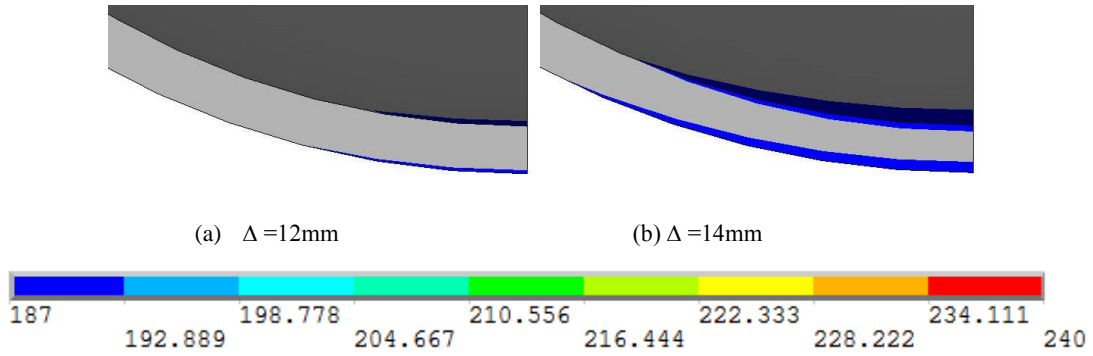
b) $\Delta=12\text{mm}$



c) $\Delta=13\text{mm}$



Şekil 6.68. Farklı deplasman değerleri için alt ve üst cidarın iç ve dış yüzeyindeki von-mises gerilme dağılımları

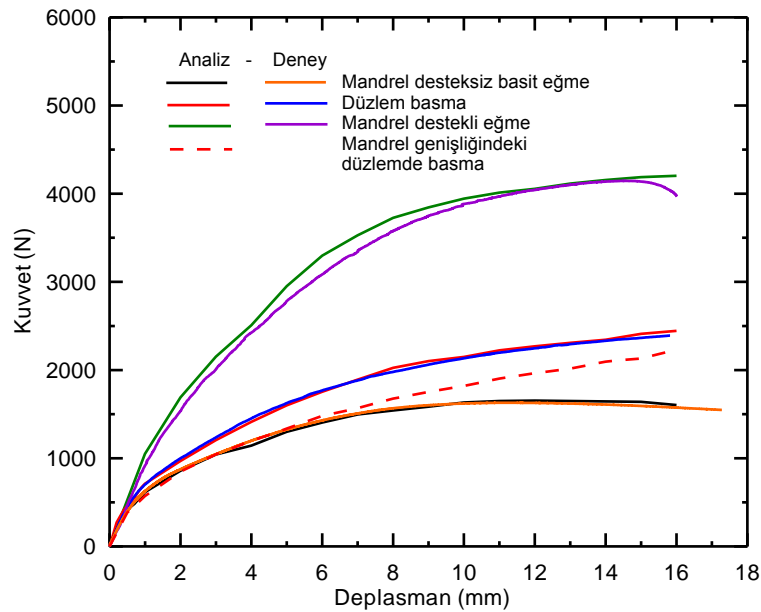


Şekil 6.69. Tüp kirişin alt cidarındaki akma alanlarını gösteren gerilme dağılımı (Not: gerilme ölçeğinin alt sınır değeri olan 187 MPa, tüp malzemesinin akma sınırıdır)

Şekil 6.65-f-h'de ilerleyen deplasmanlarda tüp kirişin öncelikli olarak üst cidar, sonrada alt cidarlarda akma alanları genişlemekte, $\Delta=22$ mm için üst cidarın, hem dış hem iç kısımlarda akma alanı genişleyerek cidar kalınlık boyunca birleştiği, sadece lokal olarak yan cidarda akmayan bölgenin varlığı gözlenmektedir.

6.2.2. Üç nokta eğme deneyinde tüpteki eğilme ve lokal deformasyon etkisinin sonlu elemanlar analizleriyle araştırılması

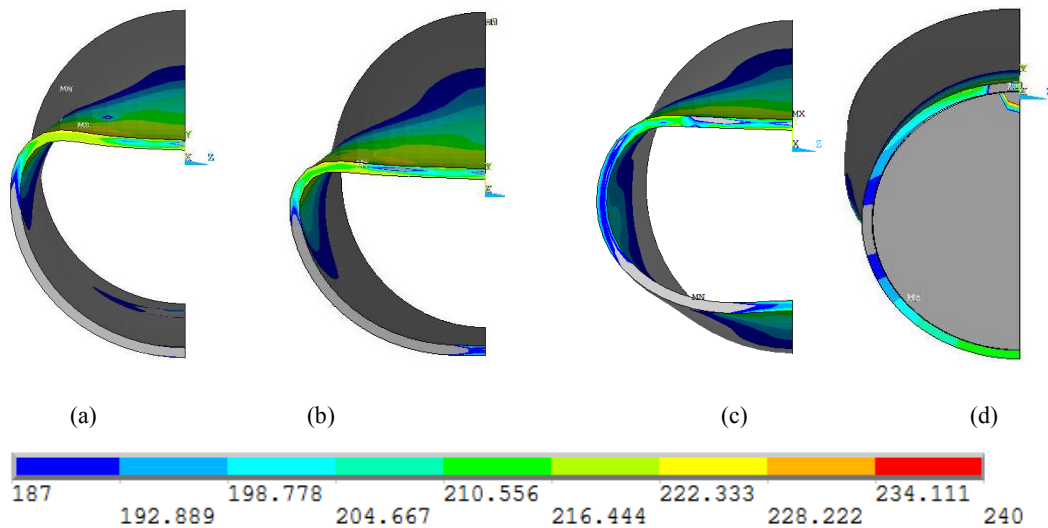
Analiz sonuçları Şekil 6.70'deki grafikte, deney sonuçlarıyla birlikte verilmiştir.



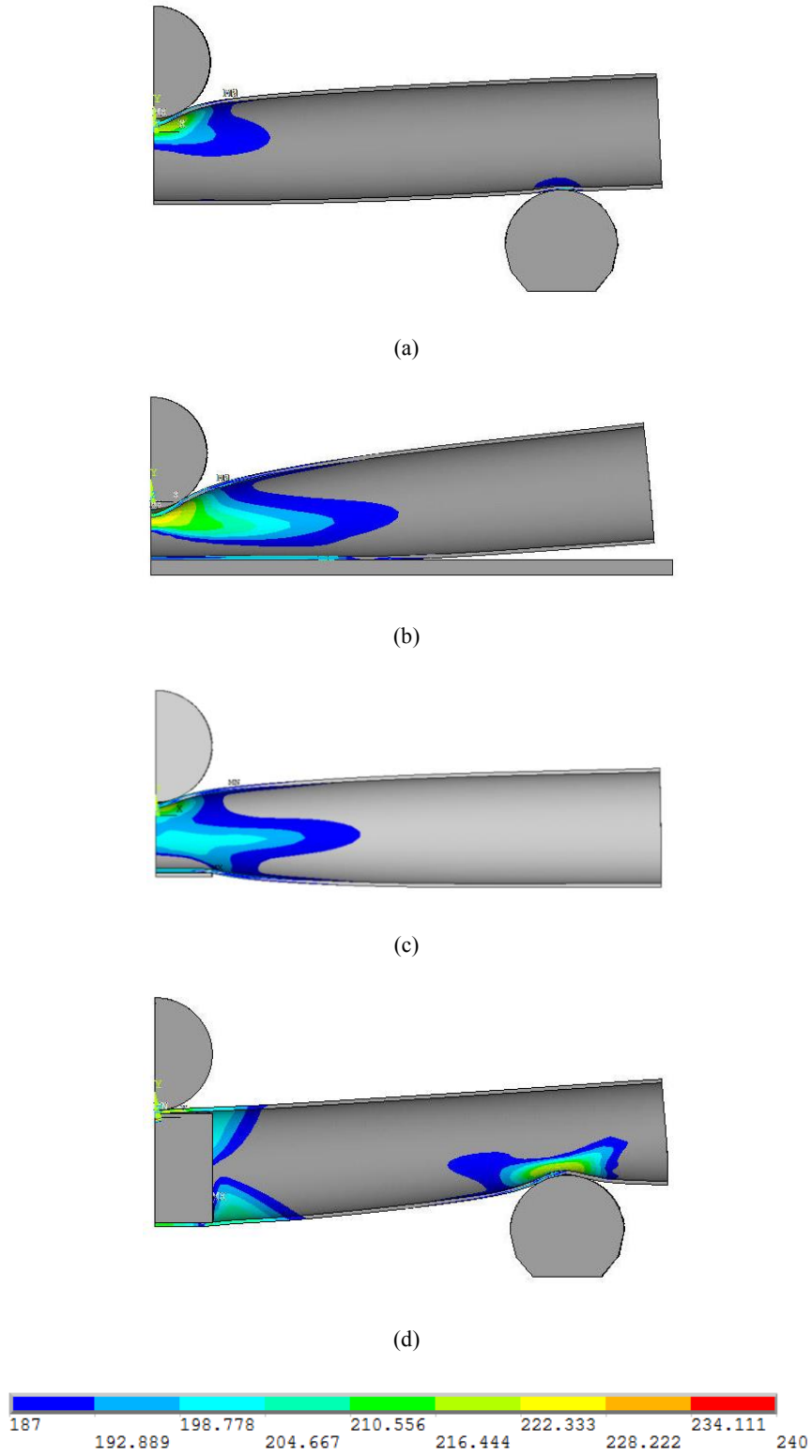
Şekil 6.70. Farklı yüklemeye koşulları için sonlu eleman analizi ve deneysel olarak elde edilen kuvvet- deplasman grafikleri

Analiz ve deney sonuçlarının birbiriyle büyük ölçüde uyumlu olduğu görülmektedir. Lokal burkulma davranışı kısıtlanarak elde edilen mandrel destekli eğme modelinde, hem eğme hem de burkulma mekanizmasının etkin olduğu mandrel desteksiz basit eğme modeline göre YTK 2.6 kat artmıştır. Eğilme davranışının kısıtlandığı düzlem basma modelinde ise artış oranı 1.5 kattır. Yine eğilme davranışının kısıtlandığı mandrel genişliğindeki düzlem basma modelinde YTK tüp yapıya göre 1.38 kat artış göstermiştir. Sabit bir kuvvet altında oluşan deformasyon incelendiğinde, oluşan deformasyon miktarı mandrel desteksiz basit eğme modelinde en yüksek, mandrel destekli eğme ise en düşüktür. Analiz ve deney sonuçlarından tüp yapının üç nokta eğme davranışında, lokal deformasyon davranışının eğilmeden daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Şekil 6.71’de boş tüpün maksimum kuvvetin görüldüğü deplasmanda (12 mm de) diğer üç model ile birlikte mandrelin temas bölgesinde orta noktadaki tüp kesit görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.72’de ise üç modelin 12 mm deplasmanda yandan görünüşleri verilmiştir. Şekil 6.71-72’deki 12 mm deplasman değeri için elde edilen analiz görüntüleri, gerilme ölçeğinin alt sınır değeri olan 187 MPa tüp malzemesinin akma sınırı olacak şekilde alınmıştır.



Şekil 6.71. Dört modelde (a: Mandrel desteksiz basit eğme, b: düzlem basma, c: mandrel genişliğindeki düzlemde basma modeli, d: mandrel destekli eğme) basit eğmede bükülmenin oluştuğu kuvvetin en büyük değerini aldığı deplasman (12 mm de) değeri için tüp yapının ortasında (mandrel temas bölgesi) kesitte oluşan von-mises gerilmelerinin dağılımı



Şekil 6.72. Dört modelde (a: Mandrel desteksiz basit eğme, b: düzlem basma, c: mandrel genişliğindeki düzlemde basma modeli, d: mandrel destekli eğme) maksimum kuvvetin görüldüğü deplasman (12 mm de) değerinde von-mises gerilme dağılımını gösteren tüp kesitin yandan görüntüleri

Şekil 6.71-72 incelendiğinde, en yüksek yük taşıma kabiliyeti sergileyen mandrelin destekliği eğme modelinde, akmaya uğrayan bölgenin miktarı üç nokta eğme modeline göre daha fazladır. Düzlem basma modelinde akmaya uğrayan bölge tüp yapının bir düzlem boyunca temas etmesi nedeniyle daha fazladır. Üç nokta eğme modelinde ise yük taşıma kabiliyetini en düşük seviyede olup, yapının bükülmesine teşvik eden burkulma nedeniyle parça daha az deformasyona uğramaktadır.

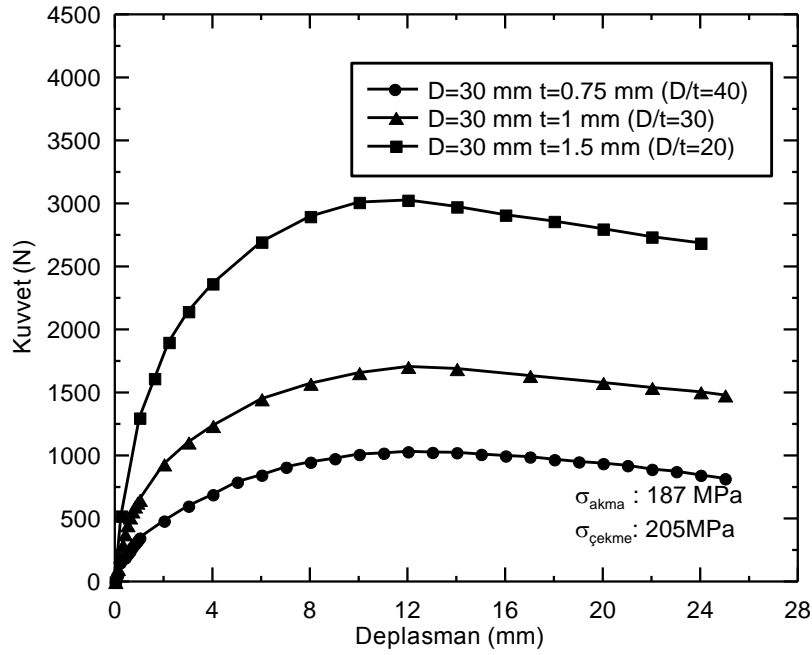
6.2.3. Tüp yapının bükülme davranışına etki eden etmenlerin sonlu eleman analiz sonuçları

Önceki bölümde, deneysel veriler kullanılarak tüp yapının üç nokta eğme davranışı sonlu eleman analizi ile simüle edilmiş ve mandrelin etkisinde oluşan lokal deformasyonun, tüp yapının eğilme davranışında etkin bir rol oynadığı anlaşılmıştır. Bu bölümde, geometrik ve malzemeye bağlı özelliklerin bu davranışa olan etkisi incelenecektir.

6.2.3.1. Cidar kalınlığının etkisi

İlk olarak, 30 mm çapında farklı cidar kalınlıklarındaki tüplerin eğme analizleri yapılarak kuvvet deplasman grafikleri elde edilmiş (Şekil 6.73), bükülme deplasmanı ve kuvvetinin cidar kalınlığı ile olan ilişkisi aynı çap için belirlenmeye çalışılmıştır.

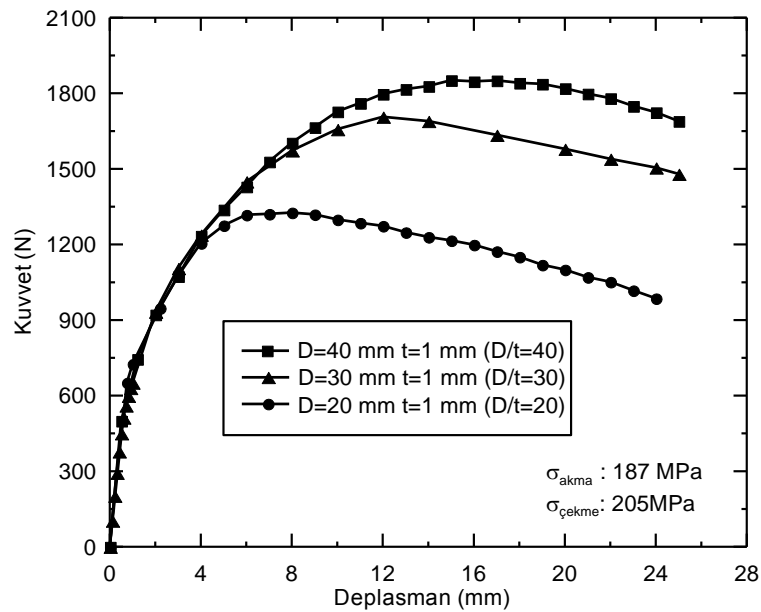
Şekil 6.73’de görüldüğü gibi azalan cidar kalınlığıyla yük taşıma kabiliyeti ve kirişin rijitliği düşmekte, bükülme deplasman değeri ise değişmemektedir. Cidar kalınlığının ince olduğu yüksek D/t oranları için taşınan kuvvetin azalması beklenen bir durumdur.



Şekil 6.73. 30 mm çaplı farklı cidar kalınlıklarındaki tüp yapının kuvvet deplasman grafikleri

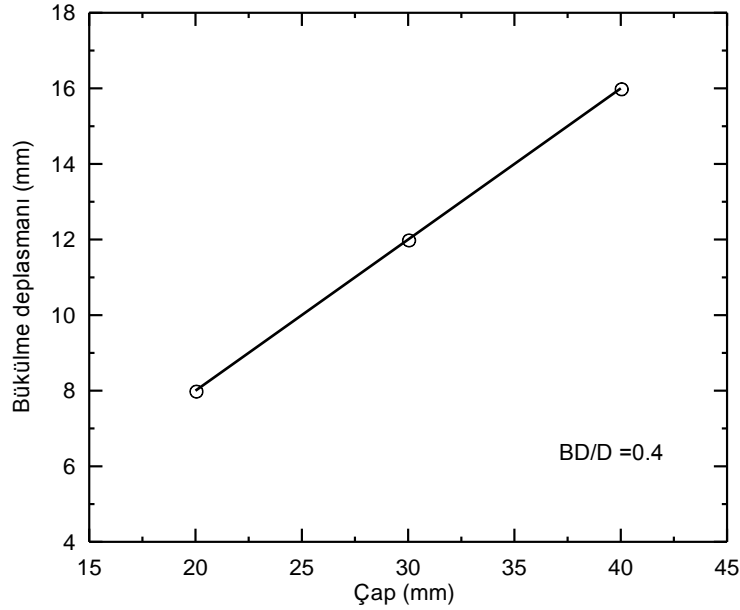
6.2.3.2. Tüp çapının etkisi

Şekil 6.74'de aynı cidar kalınlığında ancak farklı çaplardaki tüp girişin sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri görülmektedir.



Şekil 6.74. Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp girişlerin kuvvet-deplasman eğrileri

Şekilden, bükülme deplasmanın tüp kirişin çapıyla ilişkili olduğu, büyük çaplar için bükülme deplasmanı değerinin de arttığı sonucuna varılmaktadır. Diğer bir bulgu, yük taşıma kabiliyetinin tüp çapıyla orantılı olarak artmasıdır ki bu, artan çapla kesit atalet momentinin artmasının bir sonucudur. Şekil 6.74'deki üç farklı çapa ait bükülme deplasmanlarının, çapla (D) değişimi Şekil 6.75'de verilmiştir.

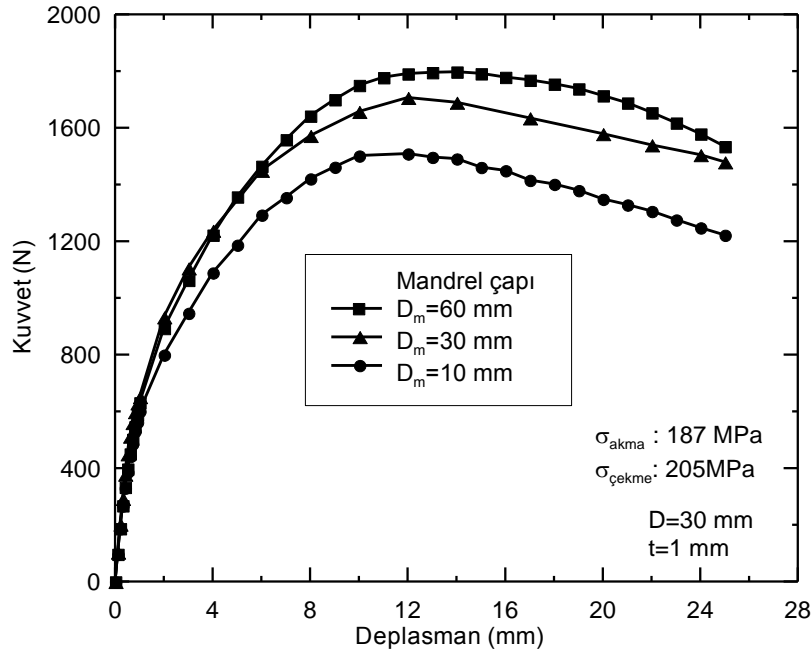


Şekil 6.75. Aynı cidar kalınlığında farklı çaplardaki tüp kirişlerin çapa bağlı bükülme deplasmanı eğrisi (BD: Bükülme deplasmanı, D: Çap)

Değişim incelendiğinde aralarında doğrusal karakterde bir ilişkinin bulunduğu görülmektedir. Ayrıca, deneysel sonuçlara ilave olarak sayısal çözümler de bükülme deplasmanının çapın % 40'ına karşılık geldiğini göstermektedir. Bu oran mekanik özellikleri aynı, D/t oranı 20 ile 40 mm aralığındaki tüpler için geçerli olduğu unutulmamalıdır.

6.2.3.3. Mandrel çapının etkisi

Şekil 6.76'da çapı 30 mm olan tüp yapı için farklı mandrel çapları kullanılarak elde edilen eğme analiz sonuçları verilmiştir.



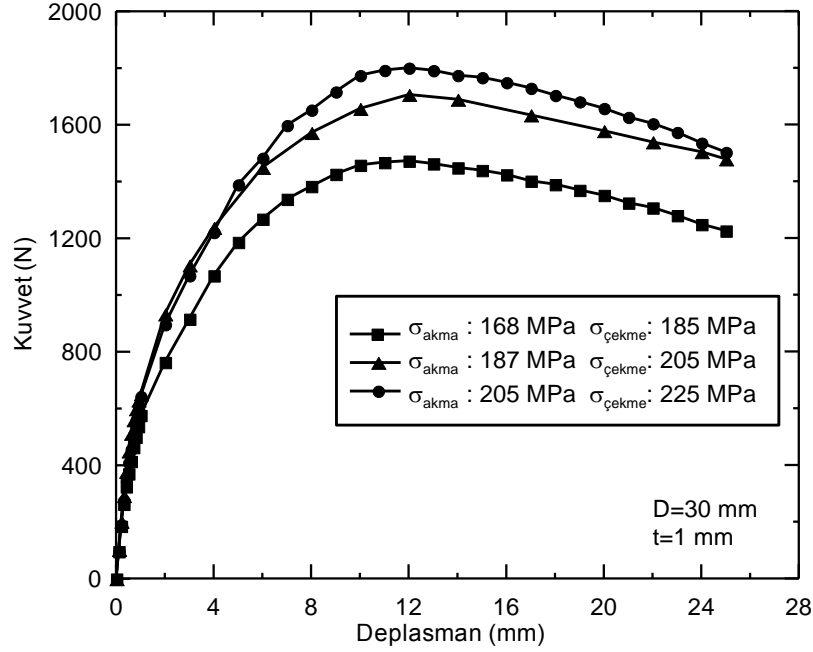
Şekil 6.76. Çapı 30 mm olan tüp kirişin farklı mandrel çaplarıyla analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri

Şekil incelendiğinde, mandrel çapı tüp çapından daha küçük seçildiğinde tüp yapının yük taşıma kabiliyeti daha küçük bulunmuştur. Bunun yanı sıra, bükülme deplasmanı azalmıştır. Mandrel çapının küçük seçilmesi durumunda tüp yüzeyinde daha etkin bir lokal deformasyon oluşmaktadır. Bükülmeyi tetikleyen bu deformasyon, bir anlamda mandrelin yüzeye daha kolay batmasına yol açmaktadır. Küçük çaplı mandrel kullanılması ya da zorlanmanın bu şekilde geliştiği uygulamalar için, bükülme olayı daha erken gerçekleşmekte ve aynı nedenle de tüp yapının yük taşıma kapasitesi ve de bükülme deplasmanının azalması söz konusudur. Tersisi durumda yani, mandrel çapının tüp çapından daha büyük seçilmesi durumunda, aynı etkileşimden dolayı yük taşıma kapasitesi ve bükülme deplasmanı artmaktadır. Bu durum literatürde verilen deneysel verilerle uyum göstermektedir [10].

6.2.3.4. Malzeme özelliklerinin etkisi

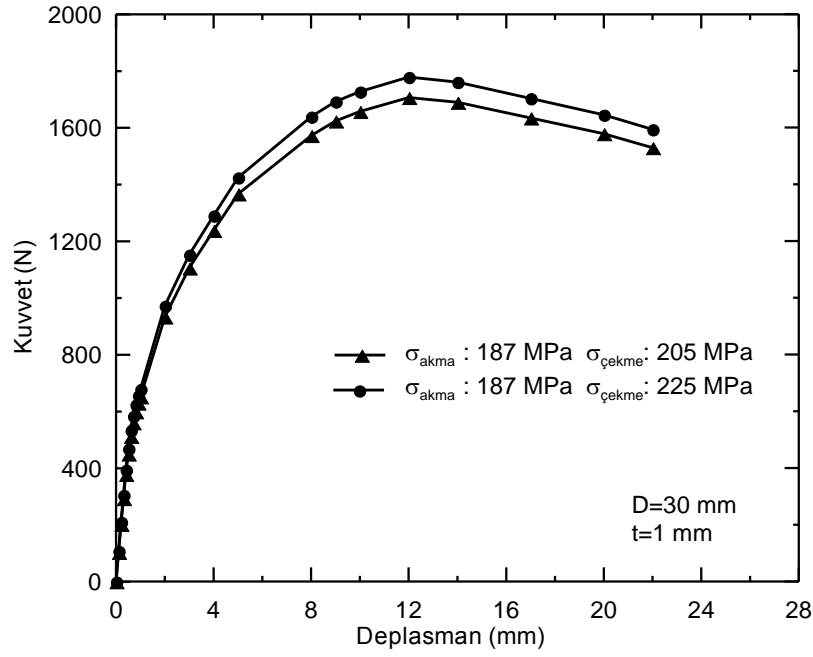
Tüp kiriş malzemesinin mekanik özelliklerinin kuvvet-deplasman eğrisine olan etkisini incelemek amacıyla, sırasıyla 187 ve 205 MPa olan akma ve çekme dayanım değerleri, % 10 azaltılmış ve % 10 arttırılmış durumları için sonlu eleman analizleri tekrarlanmıştır. Şekil 6.77'de verilen sonuçlardan, beklendiği üzere mekanik

özellikleri daha iyi olan malzemeden üretilmiş olan tüpün eğilmeye olan direnci artmıştır. Akma dayanımı aynı, çekme dayanımı %10 arttırılmış malzemenin kuvvet-deplasman eğrisinde (Şekil 6.78), malzemenin pekleşme oranındaki farklılığın tüp yapının akma sonrası davranışına doğrudan yansdığı görülmektedir.



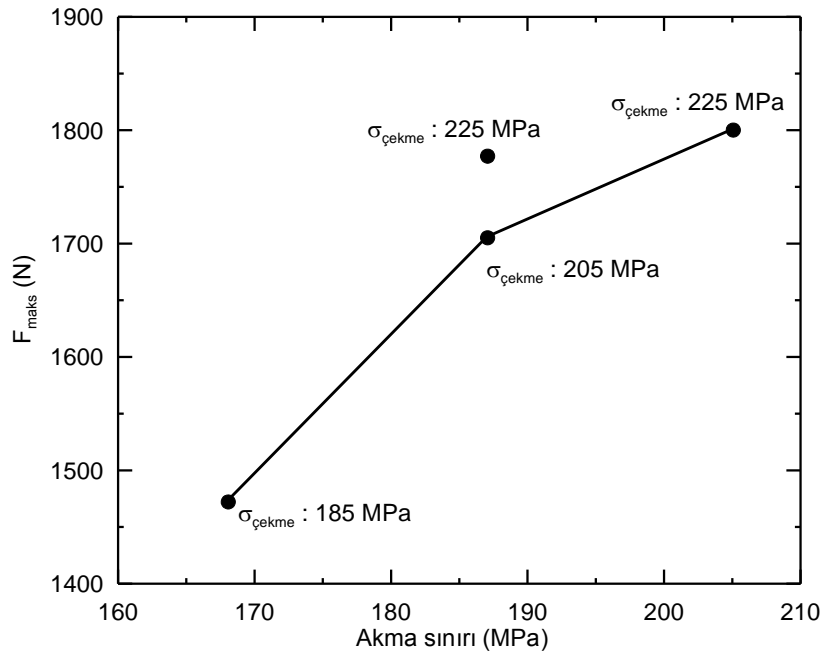
Şekil 6.77. Tüp kiriş malzemesinin akma ve çekme dayanım değerlerinin %10 oranında azaltılmış ve arttırılmış durumlarındaki kuvvet-deplasman eğrileri

Bu sonuçlardan; kiriş görevi gören bir tüp yapı için cidarda akma olayını geciktiren yüksek akma sınırına sahip malzeme kullanmak, ya da cidardaki akma sonrası deformasyonu kısıtlayan nispeten yüksek pekleşme oranına sahip malzeme tercih etmek veya yüzeyde lokal deformasyonun oluşumunu engelleyerek bükülme mekanizmasının geciktirilmesi veya engellenmesi yapının yük taşıma kabiliyetini iyileştireceğini söylemek mümkündür.



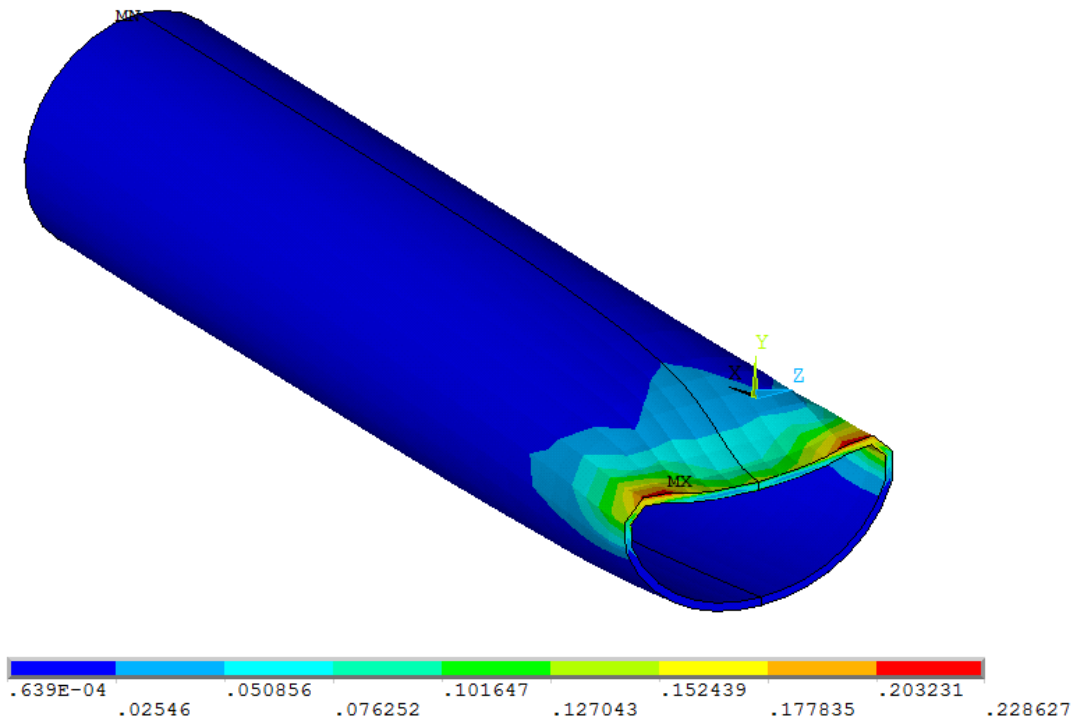
Şekil 6.78. Tüp kiriş malzemesinin akma dayanımı aynı çekme dayanımı %10 oranında durumundaki kuvvet-deplasman eğrisi

Tüp malzemesinin akma ve çekme dayanım değerlerinin, % 10 oranında azaltılmış ve arttırılmış durumları için elde edilen F_{maks} değerinin akma sınırıyla olan değişimi Şekil 6.79'da görülmektedir.



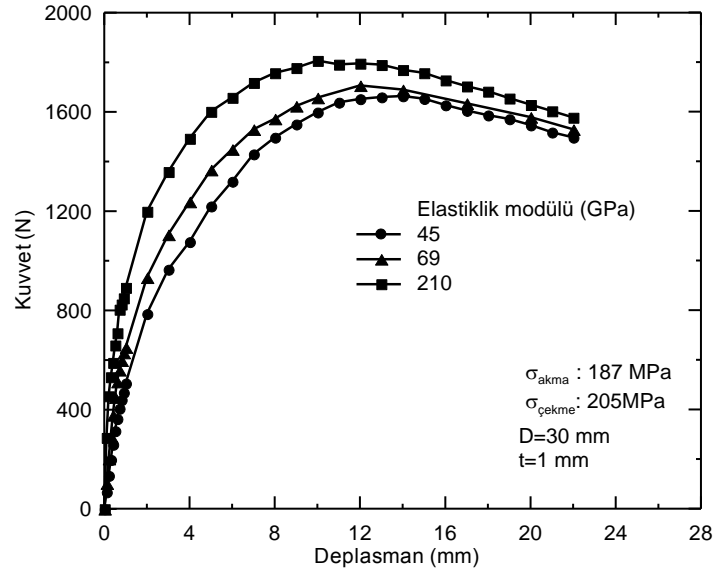
Şekil 6.79. Mekanik özellikleri farklı malzemelerde üretilmiş tüp kirişlerin akma dayanımına bağlı F_{maks} değişimi

Tüp yapıda artan deplasmanla mandrelin temas bölgesi ve civarında, malzemenin deformasyon kabiliyeti izin verdiği sürece şekil değişimi artmaktadır. Özellikle sünekliği sınırlı sert malzemeden üretilmiş tüp numunelerde deney esnasında-tüp yapının yan kısımlarda yırtılmalar oluşabilmektedir. Bu tür hasar oluşumları literatürde araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir [10]. Şekil 6.80’de 30 mm çaplı 1 mm cidar kalınlıklı tüp yapıya ait von mises birim şekil değişimi dağılımı cidarda yırtılma açısından riskli olan kısımları belirtmektedir.



Şekil 6.80. 30 mm çaplı 1 mm cidar kalınlıklı tüp yapıya ait von mises birim şekil değişimi dağılımı

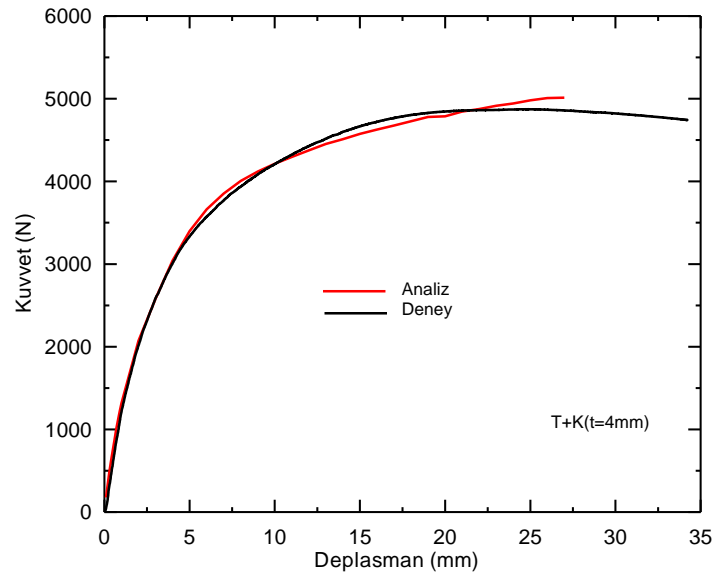
Tüp giriş malzemesinin akma ve çekme dayanım değerleri aynı yalnızca elastik modülleri farklı olan analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.81’de verilmiştir. Beklendiği gibi, elastiklik modülünün tüp yapının rijitliği üzerine doğrudan etkisi görülmüştür. Artan elastiklik modülü ile yük taşıma kabiliyeti ve rijitlik değerlerinde artış göze çarpmaktadır. Ayrıca artan elastiklik modülü ile bükülme deplasman değerlerinde azalma bir diğer bulgudur.



Şekil 6.81. Tüp kiriş malzemesinin akma ve aynı çekme dayanımı aynı, elastik modülleri farklı olması durumunda kuvvet-deplasman eğrileri

6.2.4. 31 mm çaplı tüp kirişe ait içten takviyeli numunelerin sonlu eleman analiz sonuçları

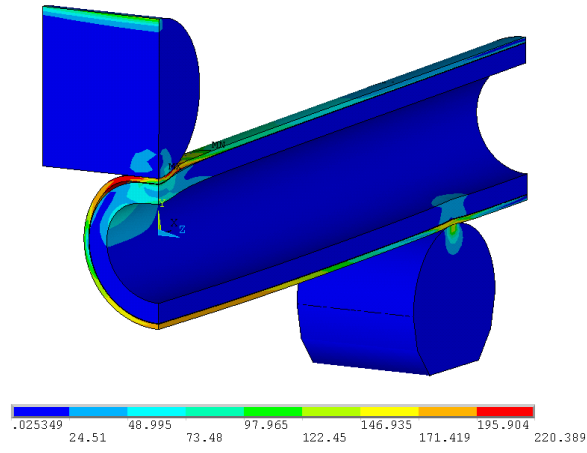
T+K (t=4 mm) modeline ait sonlu eleman analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.82'de deney verileriyle birlikte verilmiştir.



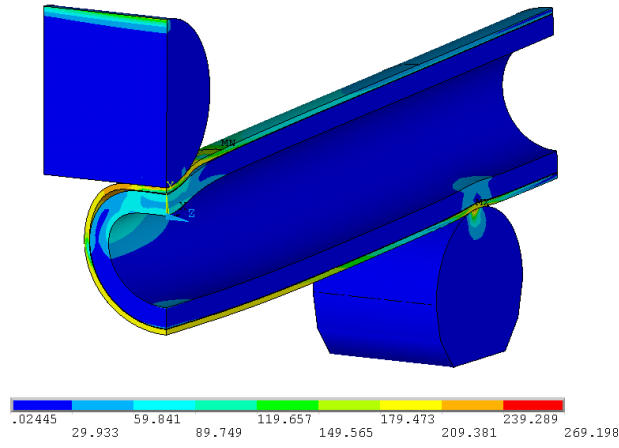
Şekil 6.82. T+K (t=4 mm) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

Grafikten de görüleceği üzere, analiz ve deney sonuçları birbiriyle oldukça uyumludur. Analiz plastik deformasyonun yoğunlaştığı bükülme noktasına kadar oldukça iyi bir yakınsama göstermiştir. Grafikler arasındaki kuvvet farkının maksimum olduğu (15 mm deplasman) noktada sapma % 3 civarındadır, Şekil 6.83'de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir.

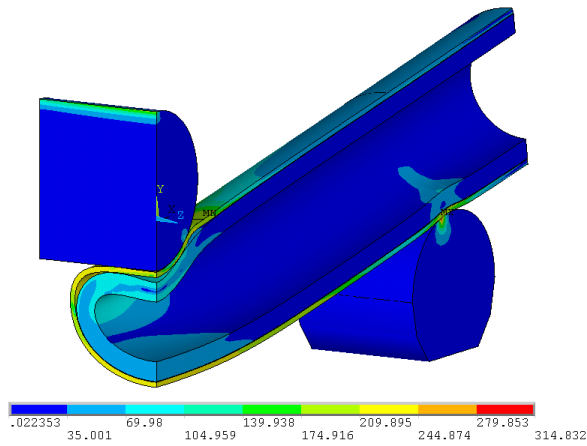
5 mm deplasman değeri için elde edilen analiz görüntülerinden, yük değerinin nispeten düşük olduğu küçük deplasmanlarda, polimer malzeme büyük ölçüde metalik malzemeyle birlikte hareket etmektedir. İçten yapılan takviye, lokal deformasyona kısıtlamış olması nedeniyle yapının performansını etkileyen en önemli etken olmasının yanında, polimer esaslı parça genel olarak kompozit yapının eğme direncini katkı sağlamaktadır. Bu katkı malzemenin elastiklik modülü ve parçanın cidar kalınlığı ile orantılıdır. Şekil 6.83'de görüldüğü gibi tüp ve kestamid boru arasında ayrılmalar gözlenmektedir. Bu ayrılmaların oluşmasıyla kompozit yapıda yük taşıma kabiliyeti azalmaya başlamaktadır. Analizin ilerleyen safhalarında (25 mm) bükülme deplasmanını belirleyen alt cidardaki akma alanı artmaktadır. 25 mm deplasmanda tüp eksenini doğrultusunda gerilmenin şiddetini arttırdığı açıkça görülmektedir (Şekil 6.83-c).



a) 5mm deplasman



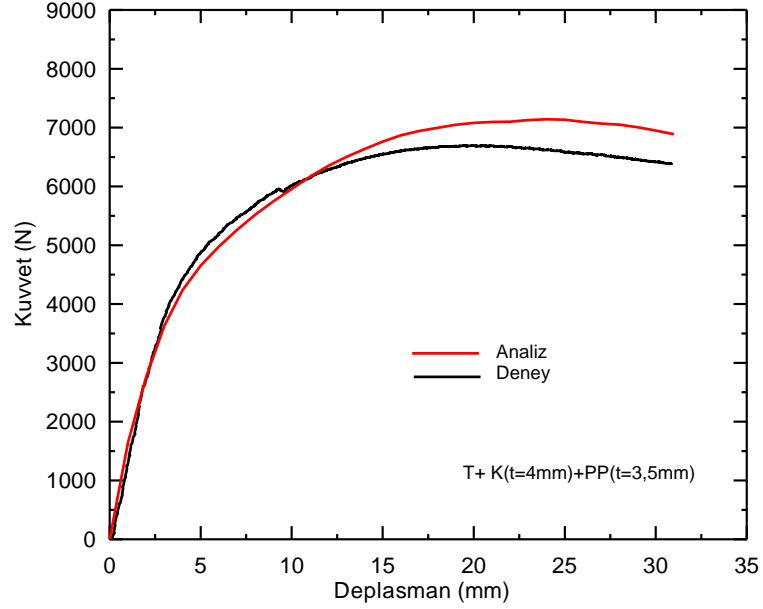
b) 10 mm deplasman



c) 25 mm deplasman

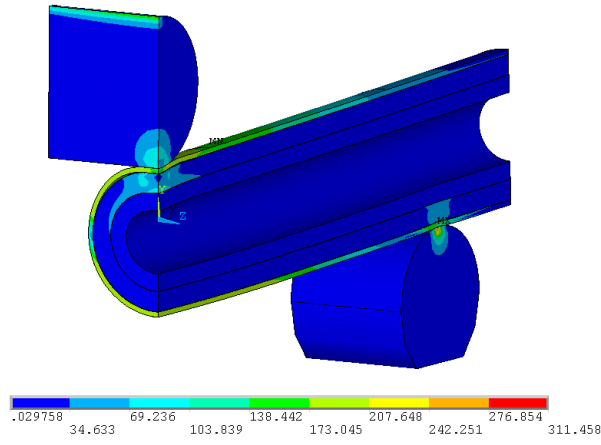
Şekil 6.83. 5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı

T+K (t=4mm)+ PP (t=3.5 mm) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.84’de deney verileriyle birlikte verilmiştir.

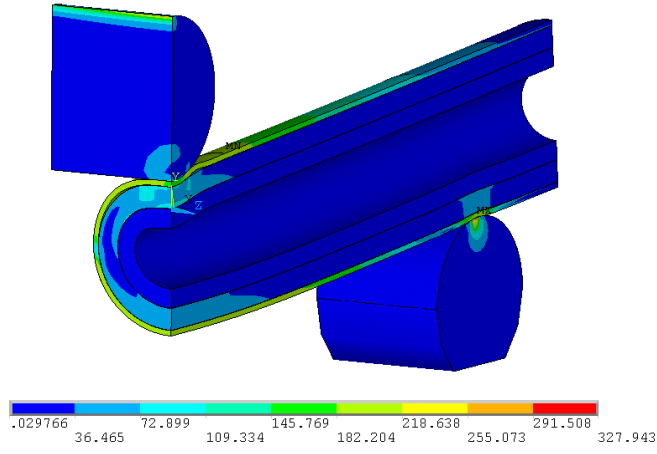


Şekil 6.84. T+K (t=4mm)+ PP (t=3.5 mm) numunesine ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

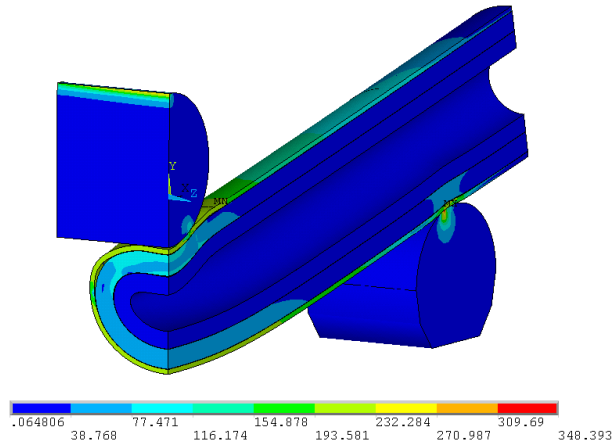
Grafikten, maksimum kuvvetin görüldüğü 20 mm deplasmanda sapmanın % 5’den civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.85’de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait gerilme dağılımı görüntüsü verilmiştir.



a) 5 mm deplasman



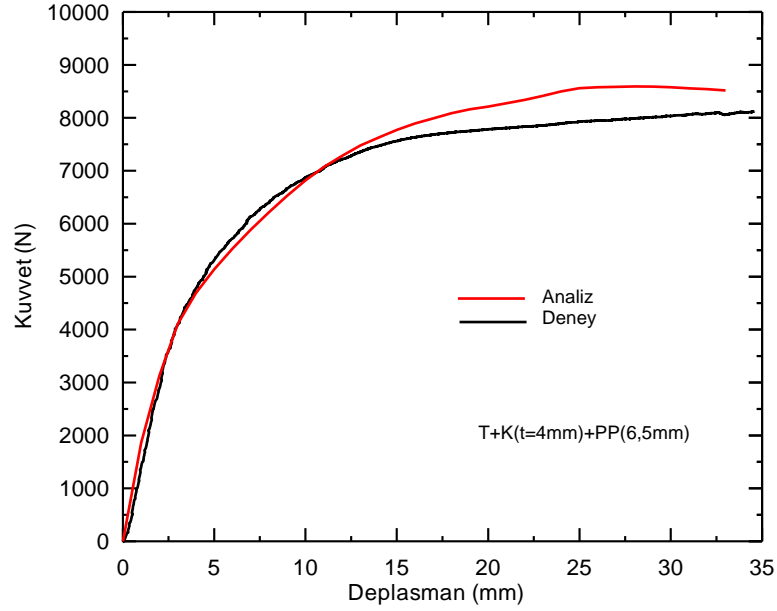
b) 10 mm deplasman



c) 25 mm deplasman

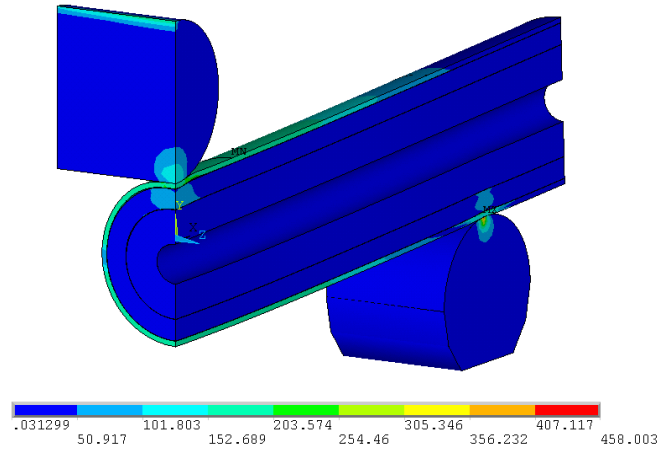
Şekil 6.85. T+K (t=4 mm)+ PP (t=3.5 mm) numunesinin 5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlardaki von-mises gerilme dağılımı

T+K (t=4 mm)+ PP (t=6.5 mm) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 6.86’da verilmiştir.

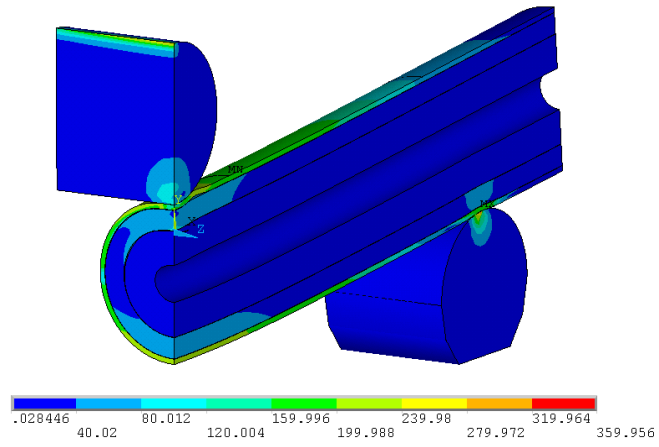


Şekil 6.86. T+K (t=4 mm)+ PP (t=6.5 mm) yapısına ait sonlu eleman analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

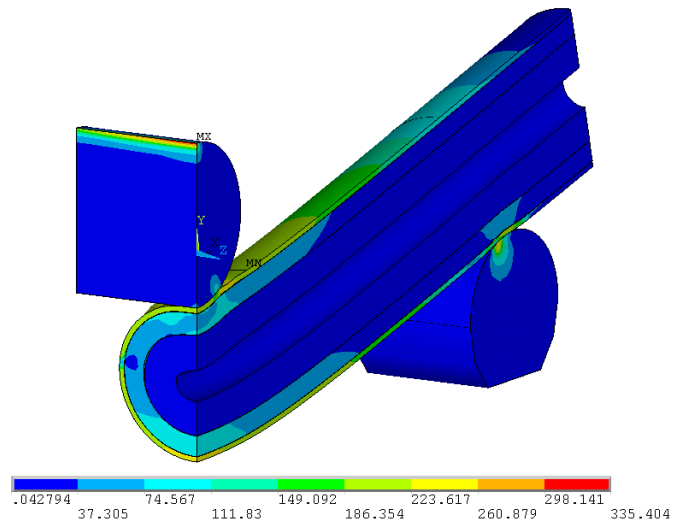
Grafikten maksimum kuvvetin görüldüğü 25 mm deplasmanda sapmanın %5.3 civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.87’de kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir.



a) 5mm deplasman



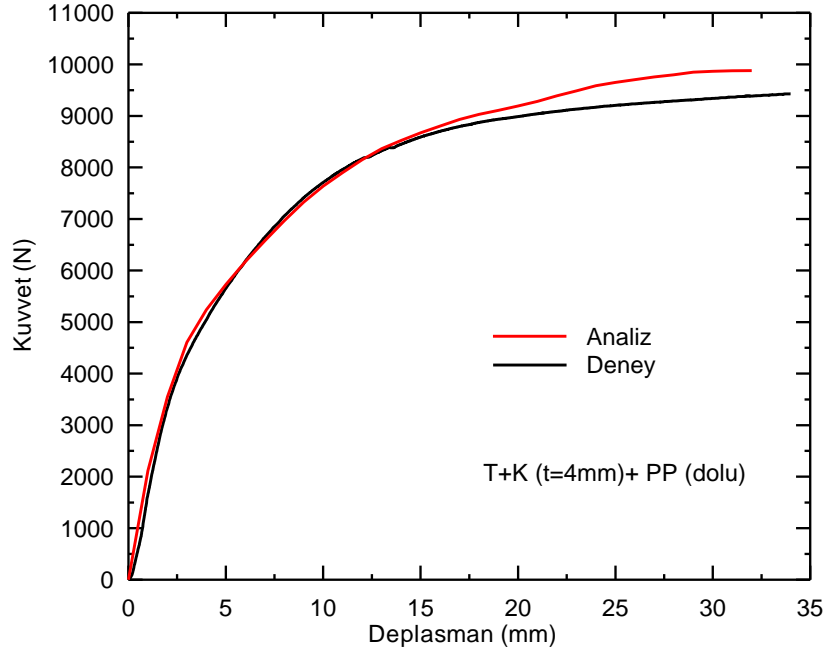
b) 10 mm deplasman



c) 25 mm deplasman

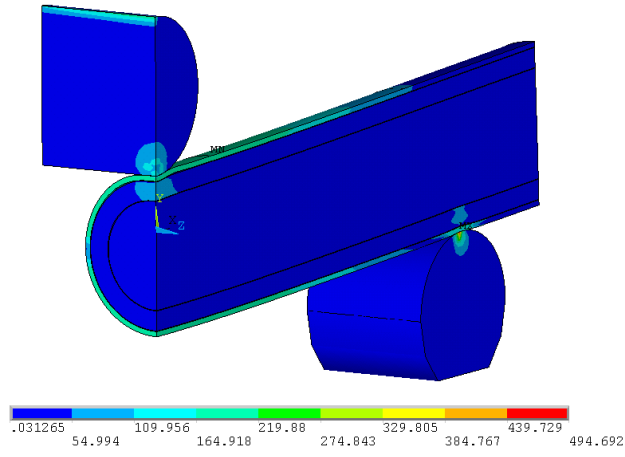
Şekil 6.87. 5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı

T+K (t=4mm)+ PP (t=10.5 mm-dolu) modeline ait sonlu elemanlar analiz sonucu elde edilmiş kuvvet-deplasman eğrileri deney verileriyle birlikte Şekil 6.88’de verilmiştir.

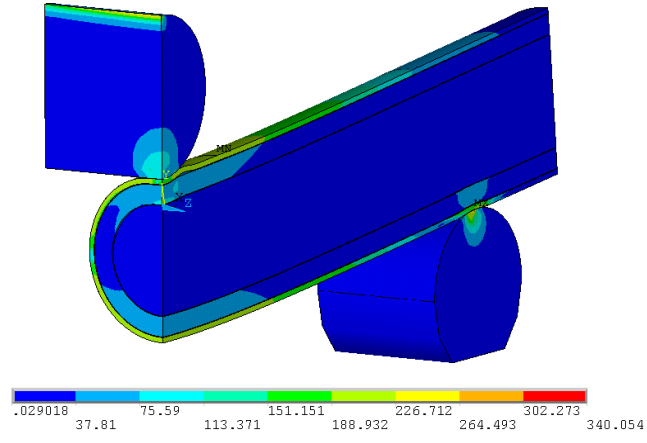


Şekil 6.88. T+K (t=4mm)+ PP (t=10.5 mm-dolu) yapısına ait sonlu elemanlar analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri

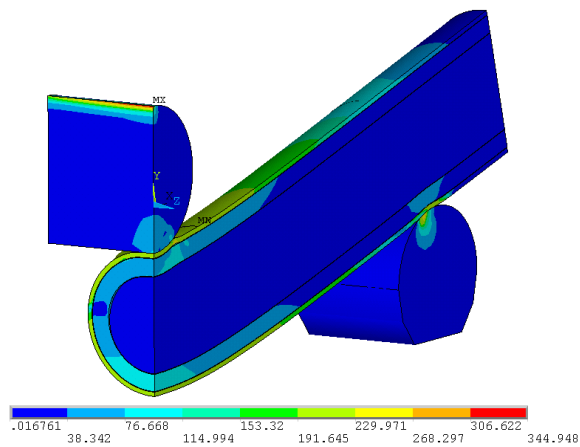
Grafikten maksimum kuvvetin görüldüğü 30 mm deplasmanda sapmanın % 5.6 civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.89’da kompozit yapının 3 farklı deplasmana ait Von-Mises gerilme değişimine bağlı analiz görüntüsü verilmiştir.



a) 5mm deplasman



b) 10 mm deplasman



c) 25 mm deplasman

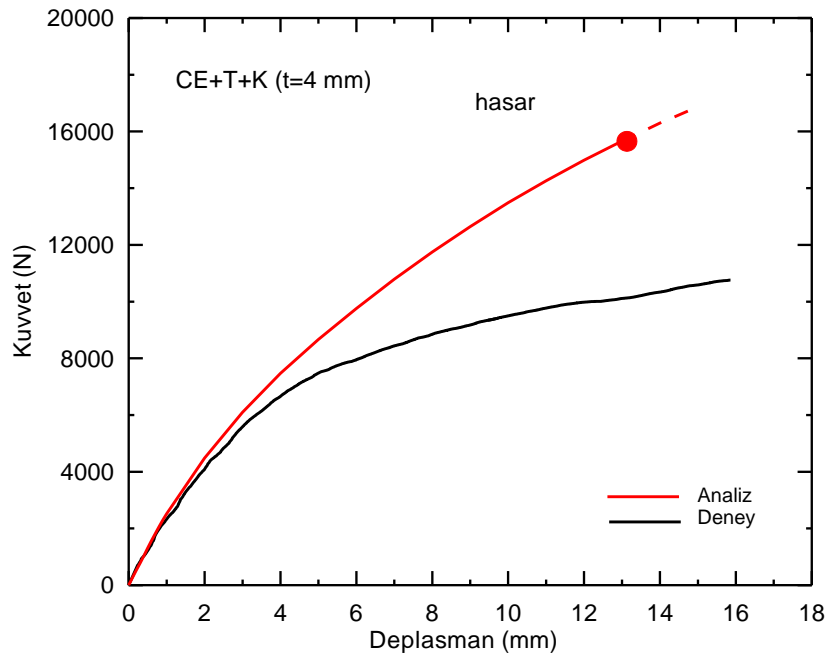
Şekil 6.89. 5 mm, 10 mm ve 25 mm deplasmanlar için yapıdaki von-mises gerilme dağılımı

İçten takviyeli kompozitlerin analiz görüntüleri incelendiğinde artan deplasmanla beraber tüp ve kestamit yapının deformasyona karşı direnç göstermiş olduğu özellikle parça orta noktası ve alt kısmındaki gerilme dağılımından anlaşılmaktadır.

6.2.5. 31 mm çaplı tüp kirişe ait dıştan ve içten takviyeli numunelerin sonlu eleman analiz sonuçları

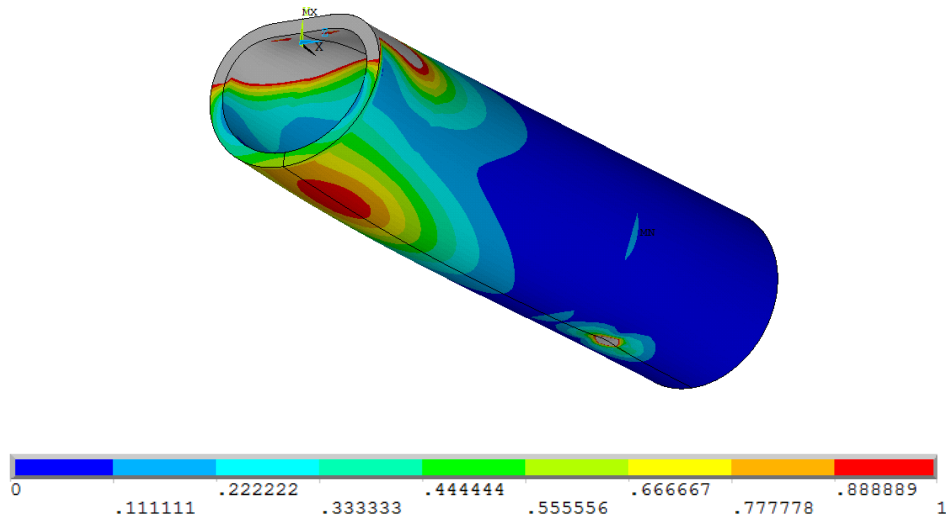
Bu kısımda dıştan cam elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sonlu eleman analizleri ANSYS programında Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak yapılmıştır. Cam elyaf takviyeli epoksi malzemenin özellikleri lineer ortotropik malzeme olarak girilmiştir. Analiz girdileri arasında Tsai-Wu kriterinin içerdiği çekme, basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklere ait değerler yer almaktadır.

CE+T+K (t=4 mm) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.90'da verilmiştir.



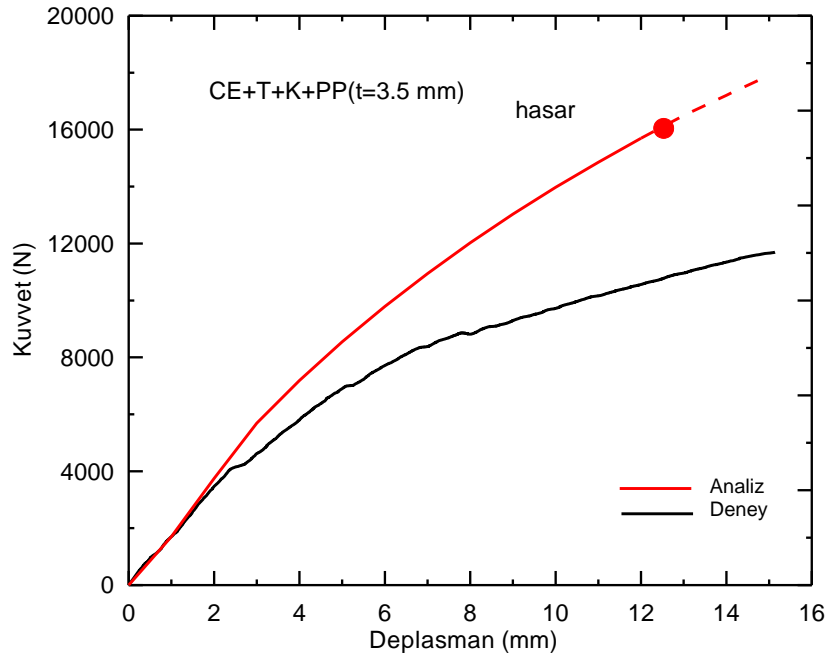
Şekil 6.90. CE+T+K (t=4 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

Kuvvet-deplasman eğrisinde görüldüğü gibi, grafiğin elastik kısmında küçük deplasmanlarda analiz ve deney sonucu uyumlu olduğu görülmektedir. Deney şartları göz önüne alındığında, bazı olumsuz etkilerin (elyaf katmanları arasında boşluk, süreksizlik, epoksinin homojen yayılamaması v.b.) deney verilerini doğrudan etkilemektedir. Numunede, analizdeki kadar ideal şartlar sağlanamadığından eğriler arasında fark ilerleyen deplasmanlarda arttığı görülmüştür. Literatürde bu tür kompozit parçalarda irdelemelerin daha çok nispeten küçük deplasmanlar için daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [49]. Sonlu eleman analizi Tsai-Wu hasar kriterini esas alarak elyaf takviyenin hasar durumu hakkında bilgi vermektedir. Bu kritere göre Tsai-Wu hasar parametresi 1 değerini aşınca elyaf tabakasında hasar oluşmaktadır. Analiz resimlerindeki parametreye ait ölçek aralığı tüm resimlerde aynı tutularak (0-1 arasında) karşılaştırma olanağı sağlanmıştır. Parametrenin 1'i aştığı gri renkte gözükmektedir. CE+T+K (t=4 mm) yapısı 13 mm deplasmanda alt dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır. Hasar olduğu deplasman grafikte kırmızı daire işaretiyle belirtilmiştir. 13 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.91'de verilmiştir.



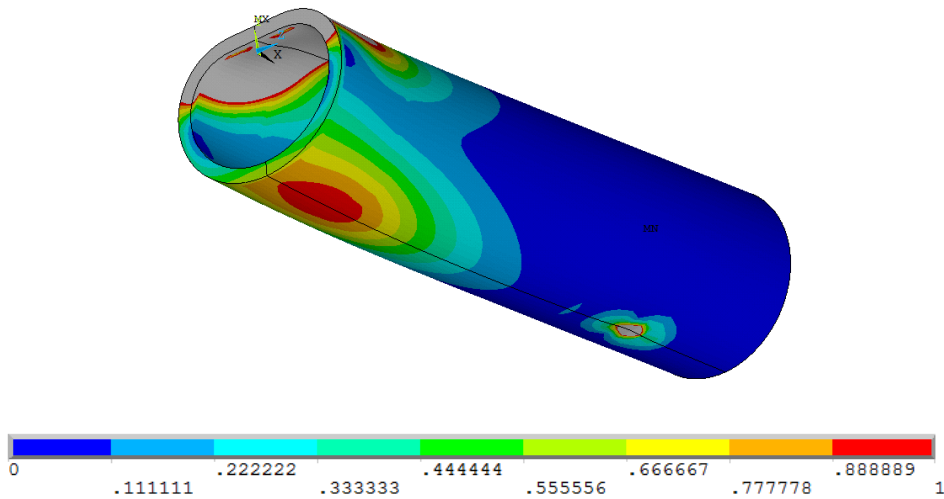
Şekil 6.91. CE+T+K (t=4mm) yapısında 13 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

CE+T+K (t=4 mm)+ PP (t=3.5 mm) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.92'de verilmiştir.



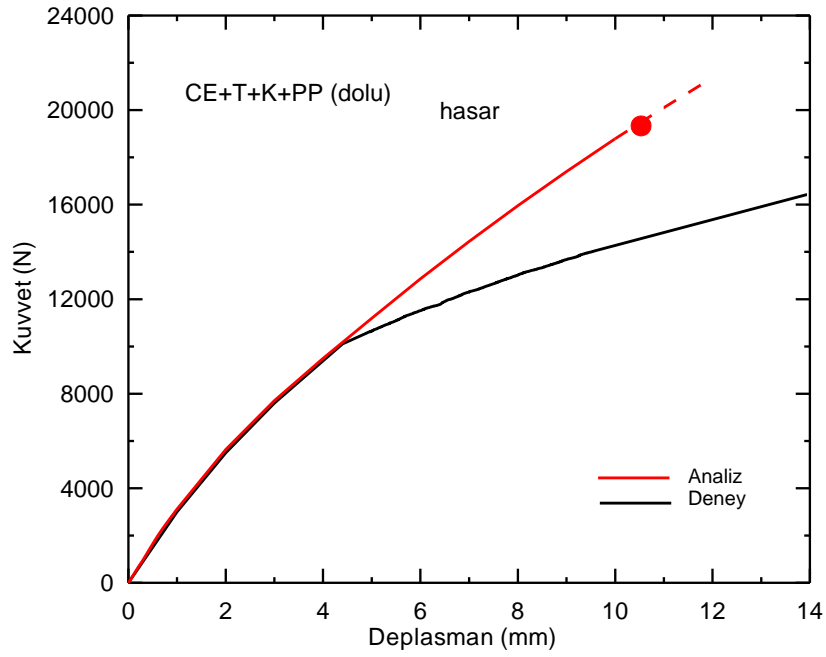
Şekil 6.92. CE+T+K+PP($t=3.5$ mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

CE+T+K ($t=4$ mm)+ PP ($t=3.5$ mm) yapının 12.5 mm deplasmanda alt-dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmaktadır. Bu deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.93’de verilmiştir.



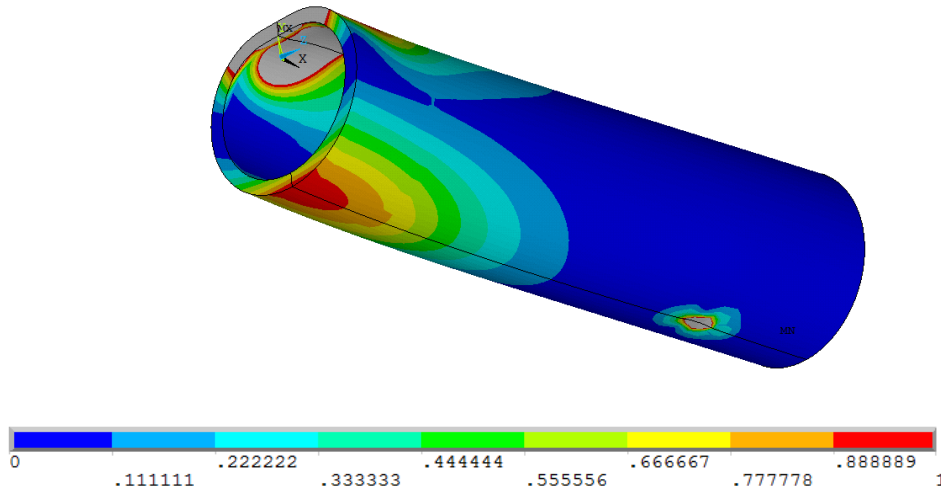
Şekil 6.93. CE+T+K ($t=4$ mm)+ PP ($t=3.5$ mm) yapısında 12.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

CE+T+K ($t=4$ mm)+ PP (dolu) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.94’de verilmiştir.



Şekil 6.94. CE+T+K+PP(dolu) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

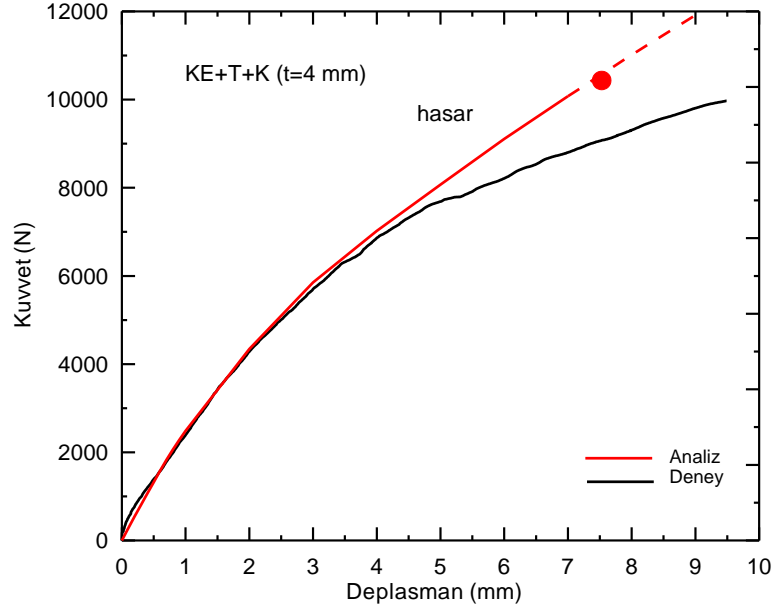
CE+T+K (t=4mm)+ PP (dolu) yapısı 10.5 mm deplasmanda alt dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmaktadır. Bu deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.95'de verilmiştir.



Şekil 6.95. CE+T+K (t=4mm)+ PP(dolu) yapısında 10.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

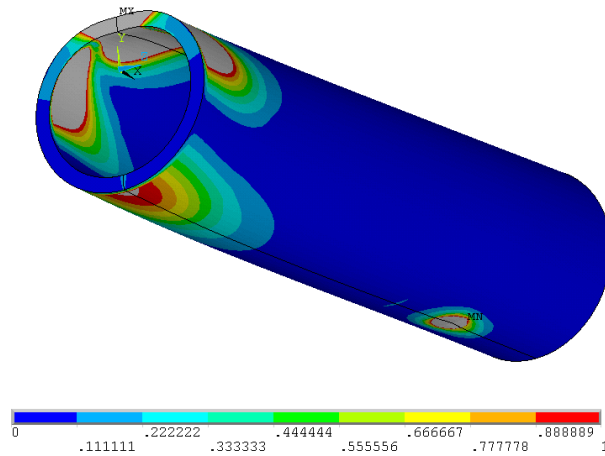
Cam elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi kalınlığı artarken yapının rijitliği ve yük taşıma kabiliyeti artarken alt dış cidarda hasarın oluştuğu deplasman

değerinin azaldığı görülmektedir. KE+T+K ($t=4$ mm) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.96’da verilmiştir.



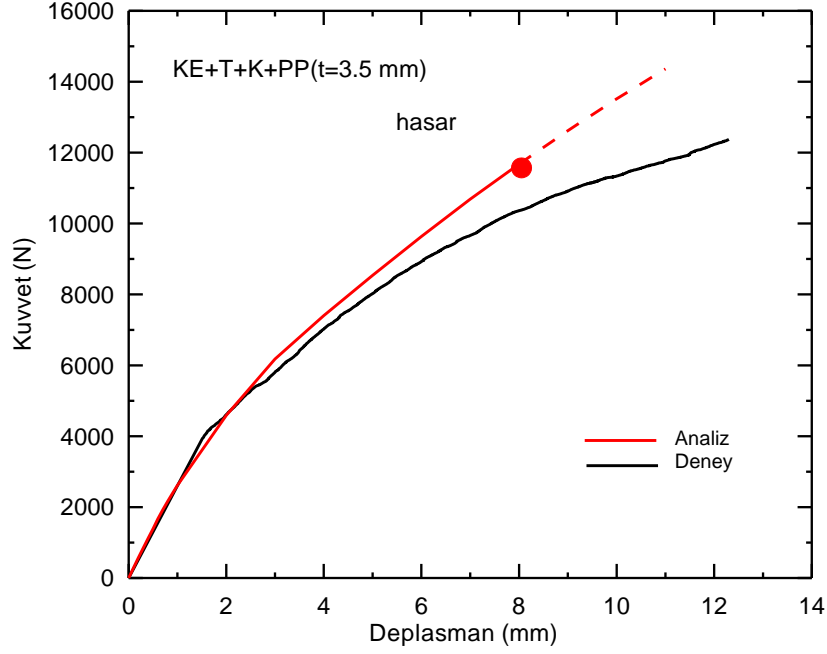
Şekil 6.96. KE+T+K ($t=4$ mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

KE+T+K ($t=4$ mm) yapısı 7.5 mm deplasmanda alt dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır. Bu deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.97’de verilmiştir.



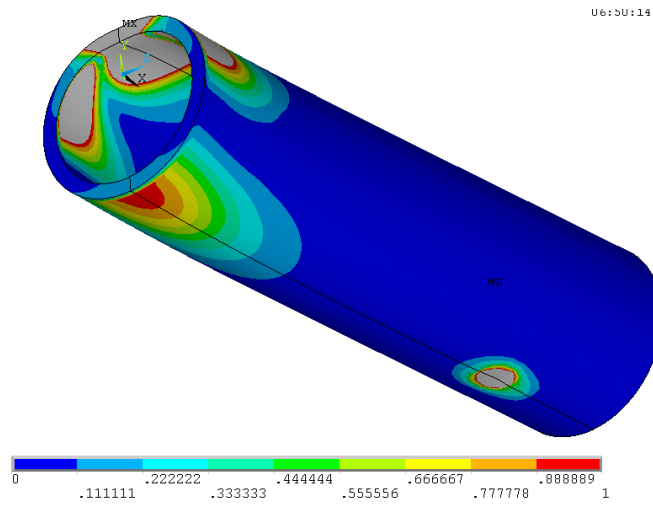
Şekil 6.97. KE+T+K ($t=4$ mm) yapısında 7.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

KE+T+K (t=4 mm)+ PP (t=3.5 mm) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.98’de verilmiştir.



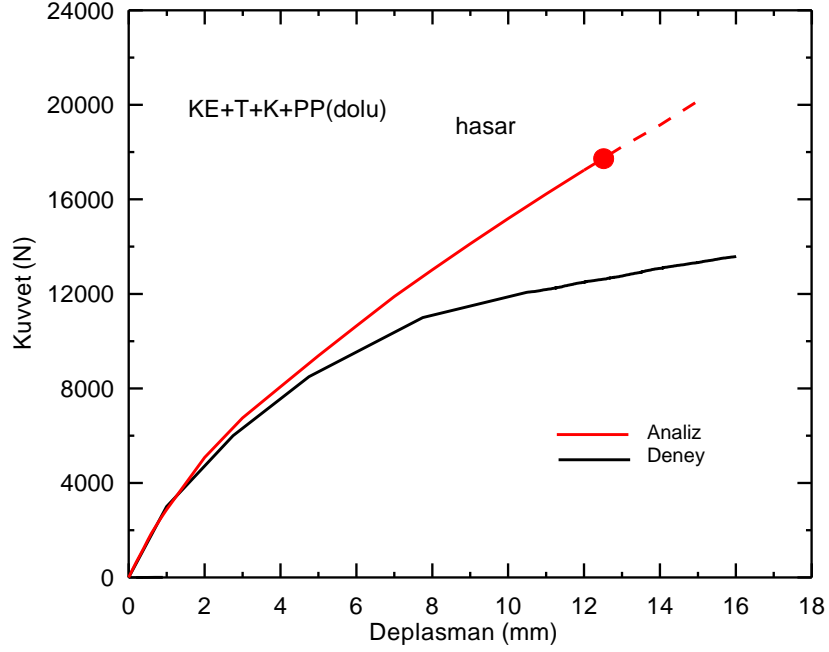
Şekil 6.98. KE+T+K+PP (t=3.5 mm) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

KE+T+K (t=4 mm)+ PP (t=3.5 mm) yapısı 8 mm deplasmanda alt dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır. 8 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.99’da verilmiştir.



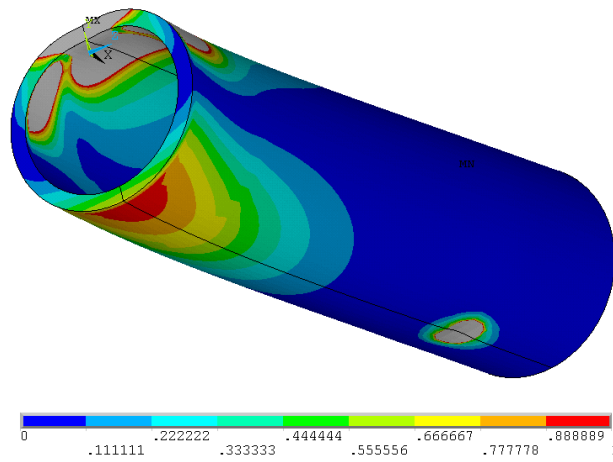
Şekil 6.99. KE+T+K (t=4mm)+ PP (t=3.5 mm) yapısında 8 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

KE+T+K (t=4 mm)+ PP (dolu) yapısına ait deney ve analiz sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrileri Şekil 6.100' de verilmiştir.



Şekil 6.100. KE+T+K+PP (dolu) yapısına ait analiz ve deney sonucu elde edilen kuvvet-deplasman eğrisi

KE+T+K (t=4mm)+ PP (dolu) yapısı 12.5 mm deplasmanda alt dış cidarında hasar parametresi 1 değerine ulaşmakta ve hasar başlamaktadır. 12.5 mm deplasmana ait analiz görüntüsü Şekil 6.101'de verilmiştir.



Şekil 6.101. KE+T+K (t=4mm)+ PP (dolu) yapısında 12.5 mm deplasmana ait Tsai-Wu hasar parametresi

Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi kalınlığının artmasıyla yapının rijitliği ve yük taşıma kabiliyeti artarken, alt dış cidarda hasarın oluştuğu deplasman değerinin de arttığı görölmektedir.

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Genel Sonuçlar

Tüp yapının üç nokta eğme zorlanma şartları için elde edilen kuvvet-deplasman eğrisinde, bükülme deplasmanının tüpün çapıyla ilişkili olduğu deneysel olarak ortaya konmuş, çap/cidar kalınlığı (D/t) oranıyla ise aralarında herhangi bir ilişkinin bulunmadığı görülmüştür. Mandrel temasıyla üst cidarda gelişen lokal burkulmanın bükülme olayının tetiklenmesi üzerinde önemli etkisi bulunduğu anlaşılmıştır. Sonlu eleman analizlerinden, yükleme esnasında üst cidarda oluşan burkulma ve buna takiben alt cidarın önemli ölçüde akmasıyla, kuvvet-deplasman eğrisinde kuvvetin en büyük değerini aldığı deplasman değerinden sonra kuvvetin hızlıca düşme eğilimine girdiği, yani bükülmenin meydana geldiği tespit edilmiştir. Analizlerden ayrıca bükülme deplasmanının tüp çapının yaklaşık olarak % 40'ına karşılık geldiği belirlenmiş, bu sonucun deney sonuçlarının da desteklediği görülmüştür. Yapılan analizlerden, tüp yapının yük taşıma kapasitesinin imal edildiği malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olduğu ancak artan dayanımla bükülme deplasmanı değerinin değişmediği anlaşılmıştır.

Tüp kirişe farklı polimerik malzemelerle içten uygulanan takviye işlemi yük taşıma kapasitesini (F_{maks} değeri) 5.9 kat arttırdığı, bu grup kompozit numune için özgül yük taşıma kabiliyetindeki artışın 39.9 N/gr değeriyle 1.7 kat olduğu belirlenmiştir. Enerji absorbe davranışı açısından elde edilen artış oranı 7.7 kat olup, bu özgül enerji absorbe etme kabiliyeti değerinde 2.2 kat artışa karşılık gelmektedir.

Hem deneysel, hem de simülasyon çalışmalarından, içten takviye edilmiş kompozit yapıda, üst cidarda oluşan lokal burkulmanın geciktirilmiş olması bu grup kompozit yapının yük taşıma davranışındaki iyileşmenin en önemli nedenini oluşturduğu belirlenmiştir.

Yük taşıma kabiliyeti (YTK) açısından 5 katmanla dıştan uygulanacak takviye işleminde en uygun elyaf yönlennesinin $[0_2/90_3]$ olduğu tespit edilmiştir. Bu elyaf yönlennesi esas kabul edilerek dıştan cam veya karbon elyaf kullanılarak, içten polimerik malzeme kullanmak suretiyle takviye neticesinde, cam elyafın (CE) elyafın kullanılması durumunda F_{maks} değerinde artış oranı 10.1 kattır. Karbon elyafın (KE) kullanılması durumunda bu oran 14 kata ulaşmıştır. Absorbe edilen enerji açısından artış oranları sırasıyla CE için 8.9 kat, KE için ise 12.5 olarak belirlenmiştir.

Dıştan üç farklı dokuma elyafın kullanıldığı hibrit kompozit kirişlerde en yüksek YTK ve EAK değeri elyaf dokuma sırasının cam, aramid ve karbon şeklinde bulunduğu hibrit kompozitte elde edilmiştir. Bu kompozitte YTK 7 kat, EAK ise 9,6 kat artış göstermiştir.

Narinlik derecesi yüksek, uzun ve ince kiriş uygulamaları için, 19 m çaplı tüp kirişler üzerinde yapılan çalışmalardan, dıştan KE, içten kestamit kullanılması durumunda burkulma yükünün 3.2 kat arttığı belirlenmiştir. En yüksek özgül burkulma kuvveti 1.45 kat ile dışarıdan KE'in kullanıldığı numunede elde edilmiştir. İçten yapılan takviyenin, lokal burkulma cidarını radyal yönde (dışarıya) yönlendirmesi, dıştan elyaf kullanılarak yapılan takviyenin de bu hareketi geciktirilmiş olması sağlanan iyileşmenin gerekçesini oluşturmaktadır.

İçten 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. Dıştan elyaf takviyeli kompozit kirişlerin sonlu eleman analiz sonuçları elastik bölgede oldukça başarılı olduğu, elasto-plastik bölgede ise sapma miktarının deneysel sonuçlara göre arttığı görülmüştür. Elyaf takviyeli epoksi bölgesi için uygulanan hasar kriterinin (Tsai-Wu), deney eğrisi ile simülasyon eğrilerinin yorumlanmasına önemli katkı sağladığı görülmüştür.

7.2. Öneriler

Bu çalışmada dairesel kesitli alüminyum tüp kirişe içten ve dıştan takviye yaparak eğme davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Dıştan elyaf malzemeler ile içten ise polimerik malzemelerde kirişin genel olarak eğme performansı arttırılmıştır.

Bundan sonraki yapılacak farklı araştırmalar için yapılan deneylerin öncesinde bir optimizasyon çalışması yaparak kombinasyonları belirlemek ve deney sayılarını azaltmak mümkün olabilir. Eğme ve burkulma davranışı dışında kompozit kirişlerin aksenal doğrultuda darbe yükleri altındaki davranışları incelenebilir.

Dıştan takviyeli kirişlerin sonlu elaman analizlerindeki sapma miktarını azaltmak amacıyla gerçek şartlara (modeldeki elyaf tabakasını boşluklu gözenekli tanımlayarak) daha uygun modeller hazırlayarak gerçeğe biraz daha yakınsama sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ASHBY, M., SHERCLIFF H., CEBON D., *Materials Engineering, Science, Processing and Design*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [2] ASM HANDBOOK, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. 2, Metals Park, OH, 1990.
- [3] KECMAN, D., Bending collapse of rectangular and square section tubes. *Int. J. Mech. Sci.*, 25 (9-10):623-636, 1983.
- [4] ELCHALAKANI, M., ZHAO, X.L., GRZEBIETA, R.H., Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending. *Int. J. Mech. Sci.*, 44:1117–1143, 2002.
- [5] WADEE, M.K., WADEE, M.A., BASSOM, A.P., AIGNER, A.A., Longitudinally inhomogeneous deformation patterns in isotropic tubes under pure bending. *Proc. R. Soc. A*, 462:817-838, 2006.
- [6] MAMAMLIS, A.G., MANOLAKOS, D.E., IOANNIDIS, M.B., KOSTAZOS, P.K., Bending of cylindrical steel tubes: numerical modeling. *Int. J. Crashworthiness*, 11(1):37-47, 2006.
- [7] Kim, C.S., Lee Y.R., Chung T.E., Song Y.J., King S.Y., Chima E.C., A study on large deflection of thin-walled tubes under pure bending. *Int. J. Crashworthiness*, 2(3):273-286, 1997.
- [8] LIU, Y., DAY, M.L., Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application. *Thin-Walled Struct.*, 46:442-450, 2008.
- [9] POONAYA, S., TEEBOONMA, U., THINVONGPITUK, C., Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Thin-Walled Struct.*, 47:637-645, 2009.
- [10] HILDITCH, T., ATWELL, D., EASTON, M., BARNETT, M., Performance of wrought aluminium and magnesium alloy tubes in three-point bending. *Mater. Des.*, 30:2316–2322, 2009.

- [11] EASTON, M., SONG, W.Q., ABBOTT, T., A comparison of the deformation of magnesium alloys with aluminium and steel in tension, bending and buckling. *Mater. Des.*, 27:935–946, 2006
- [12] AYHAN, A.O., GENEL, K., EKSI, S., Simulation of nonlinear bending behavior and geometric sensitivities for tubular beams with fixed supports. *Thin-Walled Struct.*, 51:1-9, 2012.
- [13] SHADMEDRI, F., DERISI, B., HOA, S.V., On bending stiffness of composite tubes. *Compos. Struct.*, 93(9):2173-2179, 2011
- [14] DERISI, B., HOA, S., XU, D., HOJJATI, M., FEWS, R., Composite Tube Exhibiting Large Deformation under Bending, *J. of Compos. Mater.*, 44(16):2005-2020, 2010.
- [15] DERISI, B., HOA, S., HOJJATI, M., Similitude study on bending stiffness and behavior of composite tubes. *J. Compos. Mater.*, 46(21):2695–2710, 2012.
- [16] LEE, S.H., CHOI, N. S., An Analysis of the Local Buckling Collapse Behavior of an Aluminum Square Tube under Concentrated Bending Moment Loads. *Key Eng. Mater.*, 261-263:633-638,2004.
- [17] LIU, Y.C., DAY, M.L., Bending collapse of thin-walled beams with channel cross-section. *Int. J. Crashworthiness*, 11(3):251-262, 2006.
- [18] LI, L.Y., KETTLE, R., Nonlinear bending response and buckling of ring-stiffened cylindrical shells under pure bending. *Int. J. Sol. and Struct.*, 39:765–781, 2002.
- [19] GUARRACINO, F., On the analysis of cylindrical tubes under flexure: theoretical formulations, experimental data and numerically by using finite element method. *Thin-Walled Struct.*, 41:127–147, 2003.
- [20] HAUCH, S., BAI, Y., Bending moment capacity of pipes. *Offshore Mech. and Arc. Eng.*, July 11–16, ASME 1999.
- [21] KOTELKO, M., Load-capacity estimation and collapse analysis of thin-walled beams and columns-recent advances. *Thin-Walled Struct.*, 42:153–175, 2004.
- [22] KIM, T.H., REID, S.R., Bending collapse of thin-walled rectangular section columns. *Comp. and Struct.*,79:1897–1911, 2001.
- [23] CIMPOERU, S.J., MURRAY, N.W., A large-deflection design technique for modeling the collapse of bus frames constructed from thin walled roll-over accidents. *Defence Sci. Tech. Organi.*, February 9-11, Australia,

- [24] CHEON, S.S., LEE, D.G., JEONG, K.S., Composite side-door impact beams for passenger cars. *Compos. Struct.*, 38(1-4):229-239, 1997.
- [25] HUR, B.Y., KIM, S.Y., UM, Y.S., RYU, Y.M., Development of Metal Foam for Application of Automotive Part. *Mater. Sci. Forum*, 539-543:1851-1856, 2007.
- [26] GUO, L.W., YU, J. L., LI, Z.B., Experimental studies on the quasi-static bending behavior of double square tubes filled with aluminum foam. *Acta Mech.*, 213:349-358, 2010.
- [27] CHEN, W., Experimental and numerical study on bending collapse of aluminium foam filled hat profiles. *Int. J. Sol. Struct.*, 38:7919-7944, 2001.
- [28] SANTOSA, S., BANHART, J., WIERZBICKI, T., Experimental and numerical analyses of bending of foam-filled sections. *Acta Mech.*, 148:199-213, 2001.
- [29] SHAHBEYK, S., VAFAI, A., ESTEKANCHI, H.E., A parametric study of the bending crash performance of empty and metal foam-filled box-beams. *Int. J. Crashworthiness*, 9(6): 643-652, 2004.
- [30] CHEN, W., WIERZBICKI, T., SANTOSA, S., Bending collapse of thin-walled beams with ultralight filler: numerical simulation and weight optimization. *Acta Mech.*, 153:183-206, 2002.
- [31] SANTOSA, S., WIERZBICKI, T., Effect of an ultralight metal filler on the bending collapse behavior of thin-walled prismatic columns. *Int. J. Mech. Sci.*, 41:995-1019, 1999.
- [32] HANSSEN, A. G., HOPPERSTAD, O. S., LANGSETH, M., Bending of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *Acta Mech.*, 142: 13-31, 2000.
- [33] SANTOSA, S.P., WIERZBICKI, T., HANSSEN, A.G., LANGSETH, M., Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *Int. J. Impact Eng.*, 24:509-534, 2000.
- [34] HANSSEN, A.G., HOPPERSTAD, O.S., LANGSETH, M., Design of aluminium foam-filled crash boxes of square and circular cross-sections. *Int. J. Crashworthiness*, 6(2):177-188, 2001.
- [35] KIM, H.S., Analysis of crash response of aluminium foam-filled front side rail of a passenger car. *Int. J. Crashworthiness*, 6(2):189-208, 2001.

- [36] AKTAY, L., TOKSOY, A.K., GUDEN, M., Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis. *Mater. Des.*, 27:556–565, 2006.
- [37] ELCHALAKANI, M., ZHAO, X.L., GRZEBIETA, R.H., Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending. *J. Construc. Steel Res.*, 57:1141-1168, 2001.
- [38] SINGACE, A.A., Collapse behaviour of plastic tubes filled with wood sawdust. *Thin-Walled Struct.*, 37:163-187, 2000.
- [39] JUNG, D.W., KIM, H.J., CHOI, N.S., Aluminum–GFRP hybrid square tube beam reinforced by a thin composite skin layer. *Compos. Part A*, 40:1558-1565, 2009.
- [40] LEE, S.H., KIM, H.J., CHOI, N.S., Bending Performance Analysis of Aluminum-composite Hybrid Tube Beams. *Key Eng. Mater.*, 306-308:769-774, 2006.
- [41] BLOM, A.W., STICKLER, P.B., GURDAL, Z., Optimization of a composite cylinder under bending by tailoring stiffness properties in circumferential direction. *Compos. Part B: Eng.*, 41(2):157-165, 2010.
- [42] HAEDIR, J., BAMBACH, M.R., ZHAO, X.L., GRZEBIETA, R.H., Strength of circular hollow sections (CHS) tubular beams externally reinforced by carbon FRP sheets in pure bending. *Thin-Walled Struct.*, 47: 1136–1147, 2009.
- [43] HAEDIR, J., ZHAO, X.L., BAMBACH, M.R., GRZEBIETA, R.H., Analysis of CFRP externally-reinforced steel CHS tubular beams. *J. Compos. Struct.*, 92:2992–3001, 2010.
- [44] BROUGHTON, J.G., BEEVERS, A., HUTCHINSON, A.R., Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminium extrusions. *Int. J. Adhesion Adhesives*, 17:269-278, 1997.
- [45] LEE, S.Y., KIM, C.W., CHOI, N.S., Bending Collapse Behaviors and Energy Absorption Characteristics of Aluminum-GFRP Hybrid Tube Beams. *Key Eng. Mater.*, 326-328:1825-1828, 2006.
- [46] LEE, S.Y., CHOI, N.S., Bending Performance Evaluation of Reinforced Aluminum Square Tube Beams Considering Local Buckling Behavior. *Key Eng. Mater.*, 297-300:2290-2296, 2005.
- [47] BAMBACH, M.R., Axial capacity and crushing of thin-walled metal,fibre–epoxy and composite metal–fibre tubes. *Thin-Walled Struct.*, 48(6):440-452, 2010.

- [48] BOUCHET, J., JACQUELIN, E., HAMELIN, P., Dynamic axial crushing of combined composite aluminium tube: the role of both reinforcement and surface treatments. *Compos. Struct.*, 56:87-96, 2002.
- [49] FAM, A., KIM, Y.J., SON, J.K., A numerical investigation into the response of free end tubular composite poles subjected to axial and lateral loads. *Thin-Walled Struct.*, 48:650–659, 2010.
- [50] GÜDEN, M., YÜKSEL, S., TAŞDEMİRCİ, A., TANOĞLU, M., Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes. *Compos. Struct.*, 81:480-490, 2007.
- [51] BABBAGE, J.M., MALLICK, P.K., Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum–composite hybrid tubes. *Compos. Struct.*, 70:177-184, 2005.
- [52] JONES, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, 2. ED. Taylor and Francis, 1999.
- [53] ARAN, A., Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler Ders Notları, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, İstanbul, 1990.
- [54] CALLISTER, W.D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th Edition, A.B.D., 2008.
- [55] <http://fiberelyaf.com/urunler>, Erişim Tarihi: 12.06.2013.
- [56] <http://www.kompozit.net>, Erişim Tarihi: 12.06.2013.
- [57] MALLICK, P.K., *Composite Engineering Handbook*, Markel Dekker Inc., New York, 1997.
- [58] ŞAHİN, Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [59] IŞIK, A., *Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanın eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. F.B.E., İstanbul, 2008.
- [60] ARICASOY, O., *Kompozit Sektör Raporu*, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2006.
- [61] CTP Teknolojisi , Cam Elyaf Sanayii Yayınları.
- [62] ACAR, K., Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, F.B.E., Sakarya, 2012.

- [63] ARAN, A., IML212-N8 Ders Notları
- [64] KAW, A. K., Mechanics of Composite Materials, Taylor&Francis Group, ABD, 2006.
- [65] DURSUN, T., Civata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, F.B.E., Ankara, 2006.
- [66] OKUTAN, B., Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, F.B.E., İzmir, 2001.
- [67] BEER, F.P., JOHNSTON, E.R., DEWOLF, J.T., Mechanics of Materials, Fourth ed., McGraw-Hill, New York, 2006.
- [68] GENEL, K., KAPTI, A.O., YILMAZÇOBAN, İ.K., The analyses, design and production of light-weight, high-strength metallic tubular composite beam. Scientific Research Project, TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) Project number: 110M054 (in Turkish).
- [69] KURTAY, T., Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş Ders Notu, O.T.Ü. Makine Fakültesi, 1980.
- [70] TOPÇU, M., TAŞGETİREN, S., Sonlu Elemanlar Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi Makine Müh. Böl. , 2008.
- [71] SARIKAYA O.T., Analysis of heat treatment effect on springback in V-bending, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, 2008
- [72] COOK R., MALKUS D.S., PLESHA M.E., WITT R. J., Concepts and applications of finite element analysis, Wiley, 4.ed., 2002
- [73] Release 12.0 Documentation for ANSYS.

ÖZGEÇMİŞ

Seçil Ekşi, 26.10.1982’de İstanbul’ da doğdu. 2000 yılında Halit Armay Süper Lisesi’nden mezun oldu. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümüne girdi ve 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitime başladı. 2006 yılında yüksek lisans programından mezun olduktan sonra Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora eğitime başladı. Halen bu bölümde görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.