

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT KOMPOZİT ÇUBUKLARDA BURKULMA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin KARADUMAN

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

ARALIK 2025

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİT KOMPOZİT ÇUBUKLARDA BURKULMA ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin KARADUMAN
36223618941

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

ARALIK 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen anneme,

Tezin uygulama aşamasında vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi'ne

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Hibrit Kompozit Çubuklarda Burkulma Analizi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Hüseyin Karaduman



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
2. KOMPOZİT MALZEMELER	10
2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları	13
2.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	14
2.3. Kompozit Malzemenin Takviye Ediciye Göre Sınıflandırılması	15
2.3.1 Fiber takviyeli kompozitler	15
2.3.2 Partikül takviyeli kompozitler	16
2.3.3 Sandviç ve lamine kompozitler	17
2.3.4 Hibrit kompozitler	20
2.4 Kompozit Malzemelerin Matrise Göre Sınıflandırılması	21
2.4.1 Polimer matrisli kompozitler	21
2.4.2 Metal matrisli kompozitler	22
2.4.3 Seramik matrisli kompozitler	23
2.5 Fiber Malzemeler.....	24
2.5.1 Epoksi karbon fiber (CFRP).....	24
2.5.2. Epoksi cam fiber (GFRP)	27
2.5.3. Epoksi kevlar fiber (AFRP).....	29
2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	31
2.6.1 El yatırması yöntemi.....	31
2.6.2 Vakum torbalama	32
2.6.3 Filament sarma yöntemi	34
2.6.4 Reçine transfer kalıplama	34
2.6.5 Püskürtme yöntemi	35
3. BURKULMA	37
3.1. Euler Burkulma Teorisi	38
3.2. Uç Koşullarının Burkulma Üzerindeki Etkisi.....	39
4. FEA ANALİZ YÖNTEMİ VE ANSYS YAZILIMI.....	41
4.1. ANSYS Workbench Ortamı ve Burkulma Analizi.....	41
4.2. Burkulma Analizlerinde FEA'nin Önemi.....	42
4.3. ACP-Pre Yöntemi	42
5. MATERYAL VE METOT	44
5.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....	45
5.2 Burkulma Analizi İçin Model Tasarımı	49
5.3 Modelin ACP (Pre) Modülünde Tanımlanması.....	50
5.3.1 ACP-Pre ile solid çekirdek üzerinde kompozit kaplama tanımlama.....	52
5.3.1.1 Doğrulama	53
5.4. ACP (Pre) Setup – Kompozit Katmanların Tanımlanması.....	54
5.4.1. Kompozit malzemelerin fabric (kumaş) tanımlamaları.....	54
5.4.2. Rosette tanımlaması ve fiber yönelimlerinin belirlenmesi	55

5.4.3. Stackup tanımlamaları	57
5.5. Statik Yapısal Analiz (Static Structural) – Sınır Şartları ve Analiz.....	62
5.5.1 Bağlantılar	63
5.5.2 Sınır şartları	64
5.5.3 Analiz adımları ve analiz akışı	65
5.6. Modellemenin Doğruluğunun Değerlendirilmesi.....	67
5.7. Referans Modellerin Tanımlanması.....	68
5.8. Katman Tanımı	69
6. BULGULAR	70
6.1 Referans Modellerin Burkulma Analizleri	71
6.2 Hibrit Kompozit Malzemelerin Burkulma Analizleri.....	72
6.2.1 Donatı çapı 3 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri	72
6.2.2 Donatı çapı 4 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri	88
6.2.3 Donatı çapı 5 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri	105
6.3 Kompozit Malzemeler ve Referans Modelin Rijitlik Süneklik Analizleri	122
7. SONUÇ	124
8. KAYNAKÇA.....	129
ÖZGEÇMİŞ	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5. 1 : Kompozit malzemeler Epoksi Karbon Fiber, Epoksi Kevlar Fiber ve Epoksi Cam Fiberin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 5. 2 : Beton C30 ve yapı çubuğu S355 malzemelerinin mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 5. 3 : Referans modellerin tanımları.....	68
Çizelge 5. 4 : Katman dizilimleri ve açıklamaları.....	69
Çizelge 6. 1 : 3 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN).....	85
Çizelge 6. 2 : 4 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN).....	101
Çizelge 6. 3 : 5 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN).....	118
Çizelge 7. 1 : Tüm konfigürasyonların kendi referanslarına göre kritik burkulma kuvvetlerinin yüzdesel değişimi.....	124

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1 : Hibrit kompozit tasarımın çizgisel görünümü.	2
Şekil 2. 1 : Kompozit malzeme türleri.	10
Şekil 2. 2 : Havacılık yapılarında kompozit malzemelerin kullanımı.....	12
Şekil 2. 3 : Partikül takviyeli kompozitler	17
Şekil 2. 4 : Tabakalı kompozitler için yerleştirme (lay-up) şemaları.....	18
Şekil 2. 5 : Sandviç panel kompozit.....	19
Şekil 2. 6 : Tabaka dizilimli hibrit kompozit	20
Şekil 2. 7 : Karbon fiber kompozit ile yapılmış bisiklet	26
Şekil 2. 8 : Cam fiber kullanım alanları	28
Şekil 2. 9 : Kevlar fiber, karbon-keklar ve kompozit zırh	30
Şekil 2. 10 : El yatırması.....	32
Şekil 2. 11 : Vakum torbalama.....	33
Şekil 2. 12 : Filament sarım uygulaması	34
Şekil 2. 13 : Reçine transfer kalıplama yöntemi	35
Şekil 2. 14 : Püskürtme yöntemi	36
Şekil 3. 1 : Deneyssel olarak gözlemlenen yapısal burkulma olayı	37
Şekil 3. 2 : Burkulma diagramı	38
Şekil 3. 3 : Burkulma uç koşulları.....	39
Şekil 5. 1 : ANSYS Workbench'te ACP (Pre) – Static Structural – Eigenvalue Buckling analiz bağlantı şeması.....	45
Şekil 5. 2 : Mekanik özelliklerinin <i>Engineering Data</i> modülüne tanımlanması;	47
Şekil 5. 3 : <i>Discovery</i> 'de oluşturulmuş modelin (a) teknik resim üst görünümü, (b) teknik resim yandan ve kesit görünümü, (c) model görünüm.	49
Şekil 5. 4 : Modele malzeme atamaları ve mesh (a) yapı çubuğu, (b) c30 beton, (c) mesh.	50
Şekil 5. 5 : Çekirdek modelin mesh yapısının genel görünümü.	51
Şekil 5. 6 : Pull (Surface Coating)" yöntemiyle çekirdek dış yüzeyine tanımlanan 0 mm kalınlıklı hayali yüzey.	52
Şekil 5. 7 : <i>ACP-Pre Setup</i> 'da hayali yüzeyin görünümü.	53
Şekil 5. 8 : Bu yöntemin doğruluğu için yapılan 5R modelinde burkulma analizi (a) Pull (Surface Coating) yöntemiyle tanımlanan sıfır mm kalınlıklı yüzeyle), (b) hayali yüzey tanımlanmadan.	54
Şekil 5. 9 : ACP (Pre) modülünde (a)Epoksi Cam Fiber (G), (b) Epoksi Karbon Fiber (C) ve (c) Epoksi Kevlar Fiber (A) malzemelerinin <i>Fabric Properties</i> sekmesinde tanımlanması	55
Şekil 5. 10 : ACP (Pre) ortamında <i>Rosette</i> (silindirik koordinat sistemi) tanımlaması.	56
Şekil 5. 11 : ACP (Pre) modülünde <i>Oriented Selection Set</i> üzerinden fiber yönelimlerinin <i>Rosette</i> sistemine göre atanması.....	56
Şekil 5. 12 : ACP (Pre) modülünde hibrit kompozit kaplamaya ait <i>Stackup Properties</i> penceresi görünümü.	57
Şekil 5. 13 : ACP (Pre) modülünde kompozit yapının kuvvet eksenine göre (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° ° fiber yönelim açıları.....	58
Şekil 5. 14 : ACP (Pre) modülünde kompozit kaplama görünümü.....	59
Şekil 5. 15 : Kompozit kaplamanın çizgisel görünümü.	60

Şekil 5. 16 :	(a) AAAAAA, (b) AACCGG, (c) ACGACG, (d) AGCAGC, (e) CAGCAG, (f) CCCCCC, (g) CCGGAA, (h) GACGAC, (j) GGAACC, (k) GGGGGG kompozit malzeme tabaka modelleri.....	61
Şekil 5. 17 :	Hibrit kompozit kolonun üç boyutlu görünümü (Beton çekirdek (yeşil), S355 donatılar(mavi) ve kompozit kaplama(gri) , (a) üstten bakış (b) izometrik görünüm.	62
Şekil 5. 18 :	Modelde tanımlanan temas bölgeleri ve bileşenler arası bağlantı ilişkileri (a) C30 beton iler S355 donatı arası bağlantı, (b) hayali yüzey ile C30 beton arasındaki bağlantı, (c) Hayali yüzey ile kompozit kaplama arasındaki bağlantı, (d) C30 beton ile kompozit kaplama arasındaki çoklu yüzey kontakları.....	63
Şekil 5. 19 :	Statik yapısal analizde tanımlanan sınır şartları ve yükleme durumu.	64
Şekil 5. 20 :	<i>ACP (Pre), Static Structural ve Eigenvalue Buckling</i> modülleri arasındaki bağlantı ve analiz akışı.	66
Şekil 5. 21 :	S355 çelik çubuğun Eigenvalue Buckling analizinde elde edilen burkulma sonucu.....	67
Şekil 6. 1 :	(a) 3R, (b) 4R, (c) 5R modellerinin burkulma analizi sonuç görüntüsü.	71
Şekil 6. 2 :	3AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	72
Şekil 6. 3 :	3AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	72
Şekil 6. 4 :	3AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	73
Şekil 6. 5 :	3AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	73
Şekil 6. 6 :	3ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	74
Şekil 6. 7 :	3ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	74
Şekil 6. 8 :	3ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	75
Şekil 6. 9 :	3ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	75
Şekil 6. 10 :	3AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	76
Şekil 6. 11 :	3AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	76
Şekil 6. 12 :	3CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	77
Şekil 6. 13 :	3CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	77
Şekil 6. 14 :	3CCCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	78
Şekil 6. 15 :	3CCCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	78
Şekil 6. 16 :	3CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	79
Şekil 6. 17 :	3CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	79
Şekil 6. 18 :	3GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	80
Şekil 6. 19 :	3GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	80
Şekil 6. 20 :	3GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	81
Şekil 6. 21 :	3GAGAGA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	81
Şekil 6. 22 :	3GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	82

Şekil 6. 23 : 3GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	82
Şekil 6. 24 : 3GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	83
Şekil 6. 25 : 3GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	83
Şekil 6. 26 : 3GGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	84
Şekil 6. 27 : 3GGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	84
Şekil 6. 28 : 3 mm donatılı tüm konfigürasyonların fiber açılarına göre kritik burkulma kuvvetlerinin ($P_{(kr)}$, kN) genel karşılaştırma grafiği.	87
Şekil 6. 29 : 4AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	88
Şekil 6. 30 : 4AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	88
Şekil 6. 31 : 4AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	89
Şekil 6. 32 : 4AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	89
Şekil 6. 33 : 4ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	90
Şekil 6. 34 : 4ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	90
Şekil 6. 35 : 4ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	91
Şekil 6. 36 : 4ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	91
Şekil 6. 37 : 4AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	92
Şekil 6. 38 : 4AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	92
Şekil 6. 39 : 4CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	93
Şekil 6. 40 : 4CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	93
Şekil 6. 41 : 4CCCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	94
Şekil 6. 42 : 4CCCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	94
Şekil 6. 43 : 4CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	95
Şekil 6. 44 : 4CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	95
Şekil 6. 45 : 4GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	96
Şekil 6. 46 : 4GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	96
Şekil 6. 47 : 4GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	97
Şekil 6. 48 : 4GAGAGA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	97
Şekil 6. 49 : 4GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	98
Şekil 6. 50 : 4GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	98
Şekil 6. 51 : 4GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	99
Şekil 6. 52 : 4GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	99
Şekil 6. 53 : 4GGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	100
Şekil 6. 54 : 4GGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	100
Şekil 6. 56 : 5AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	105

Şekil 6. 57 : 5AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	105
Şekil 6. 58 : 5AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	106
Şekil 6. 59 : 5AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	106
Şekil 6. 60 : 5ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	107
Şekil 6. 61 : 5ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	107
Şekil 6. 62 : 5ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	108
Şekil 6. 63 : 5ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	108
Şekil 6. 64 : 5AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	109
Şekil 6. 65 : 5AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	109
Şekil 6. 66 : 5CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	110
Şekil 6. 67 : 5CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	110
Şekil 6. 68 : 5CCCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	111
Şekil 6. 69 : 5CCCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	111
Şekil 6. 70 : 5CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	112
Şekil 6. 71 : 5CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	112
Şekil 6. 72 : 5GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	113
Şekil 6. 73 : 5GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	113
Şekil 6. 74 : 5GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	114
Şekil 6. 75 : 5GAGAGA modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	114
Şekil 6. 76 : 5GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	115
Şekil 6. 77 : 5GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	115
Şekil 6. 78 : 5GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	116
Şekil 6. 79 : 5GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	116
Şekil 6. 80 : 5GGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.	117
Şekil 6. 81 : 5GGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.	117
Şekil 6. 82 : 5 mm donatılı tüm konfigürasyonların fiber açlarına göre kritik burkulma kuvvetlerinin (P_{kr} , kN) genel karşılaştırma grafiği.	121
Şekil 6. 83 : Force Reaction analizi görünümü.	122
Şekil 6. 84 : 5GGGGGG (a), 5AAAAAA (b) ve 5CCCCCC (c) Force Reaction test sonuçları.	122
Şekil 6. 85 : Force Reaction testi sonuç grafiği.	123
Şekil 7. 1 : Burkulma analiz sonuçların ve eğilimlerinin verildiği genel grafik.	128

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

IRC	: Reinforced Concrete (Donatılı Beton)
NHC	: Natural Hybrid Composite (Doğal Hibrit Kompozit)
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Lif Takviyeli Polimer)
FEA	: Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM	: Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
IGA	: Isogeometric Analysis (İzogeometrik Analiz)
RC	: Reinforced Concrete (Donatılı Beton)
SFRC	: Steel Fiber Reinforced Concrete (Çelik Lif Takviyeli Beton)
SMA	: Shape Memory Alloy (Şekil Hatırlamalı Alaşım)
LCA	: Life Cycle Assessment (Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi)
VAT	: Variable Angle Tow (Değişken Lif Açılı Kompozit)
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam Fiber Takviyeli Polimer)
AFRP	: Aramid Fiber Reinforced Polymer (Kevlar Fiber Takviyeli Polimer)
EPS	: Expanded Polystyrene (Genleştirilmiş Polistiren Köpük)
ANSYS	: Analysis System – Mühendislik Simülasyon Yazılımı
PMC	: Polymer Matrix Composite (Polimer Matrisli Kompozit)
MMC	: Metal Matrix Composite (Metal Matrisli Kompozit)
CMC	: Ceramic Matrix Composite (Seramik Matrisli Kompozit)
PVC	: Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
HFRP	: Hybrid Fiber Reinforced Polymer (Hibrit Lif Takviyeli Polimer)
GLARE	: Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy (Cam-Elastik-Alüminyum Hibrit Kompozit)
CVI	: Chemical Vapor Infiltration (Kimyasal Buhar İnfiltrasyonu)
LPI	: Liquid Polymer Infiltration (Sıvı Polimer İnfiltrasyonu)
LSI	: Liquid Silicon Infiltration (Sıvı Silikon İnfiltrasyonu)
GNP	: Graphene Nanoplatelet (Grafen Nanoplate)
VARTM	: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama)
RTM	: Resin Transfer Molding (Reçine Transfer Kalıplama)
SMC	: Sheet Molding Compound (Levha Kalıplama Bileşiği)
GMT	: Glass Mat Thermoplastic (Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik)

SRIM	: Structural Reaction Injection Molding (Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama)
ACP-Pre	: ANSYS Composite PrepPost modülünün ön işlem kısmı (katman tanımlama aracı)
HDF5	: Hierarchical Data Format v5 – ANSYS veri dosya biçimi
CAE	: Computer Aided Engineering (Bilgisayar Destekli Mühendislik)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
E_x, E_y, E_z	: Elastisite (Young) Modülleri – x, y ve z yönlerindeki rijitlik katsayıları
$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	: Poisson oranları – yönler arası enine deformasyon oranları
G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}	: Kayma (Shear) Modülleri (GPa)
E	: Elastisite Modülü (GPa)
ν	: Poisson Oranı
σ_{ak}	: Akma Dayanımı (MPa)
σ_{φ}	: Çekme Dayanımı (MPa)
σ_{cy}	: Basınçta Akma Dayanımı (MPa)
EI	: Kesit Rijitliği (E: elastisite modülü, I: atalet momenti)
y	: Kolonun eksen boyunca yer değiştirmesi (sapma)
P	: Uygulanan eksenel basınç kuvveti
P_{cr}	: Kritik burkulma yükü
L	: Kolonun boyu (mm veya m)
L_e	: Etkin kolon boyu (K katsayısına bağlı)
K	: Etkinlik katsayısı (sınır koşullarına bağlı katsayı)
λ	: Özdeğer (Load Multiplier – burkulma katsayısı)
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$[KG]$	: Geometrik rijitlik matrisi
$\{u\}$	: Düğüm yer değiştirme vektörü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Hibrit Kompozit Çubuklarda Burkulma Analizi

Hüseyin KARADUMAN

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

139+XIII sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Bu çalışma, deprem etkileri altında burkulma riski yüksek kolonlarda epoksi esaslı fiber takviyeli polimer (FRP) kaplamaların taşıma kapasitesine etkisini sonlu elemanlar yöntemiyle incelemektedir. C30 beton çekirdek, dört adet S355 donatı ve altı tabakalı FRP kaplamadan oluşan kolonlar; 3 mm, 4 mm ve 5 mm donatı serilerinde modellenmiş, fiber yönelimi 0° – 90° aralığında 15° 'lik artışlarla değiştirilerek toplam 273 konfigürasyon analiz edilmiştir. Bu çalışma, FRP kaplamaların üç boyutlu kolon modelleriyle bütünleşik olarak incelenmesini sağlayan özgün bir modelleme stratejisi sunarak, literatürdeki klasik yüzey ve kabuk tabanlı uygulamaların ötesine geçmektedir. Kritik burkulma yükleri Static Structural–Eigenvalue Buckling çözümleriyle elde edilmiş ve tüm yüzdesel değişimler kompozit kaplamasız referans modellerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca karbon, kevlar ve cam fiberli modeller üzerinde 2 mm deplasman kontrollü yükleme ile yapılan Force Reaction analizleri, FRP kaplamaların kolon rijitliği ve süneklik eğilimlerini belirgin biçimde değiştirdiğini göstermiştir. Sonuçlar, 0° fiber yöneliminde kapasite artışının 3 mm serisinde 3CCCCC modeli için %172,2, 4 mm serisinde 4CCCCC modeli için %160,7, 5 mm serisinde 5CCCCC modeli için %145,8 seviyelerine ulaştığını göstermiştir. Tam karbon dizilimleri (CCCCC) en yüksek dayanımı sağlarken, karbon ağırlıklı hibrit dizilimlerde (ör. ACACAC, CAGCAG, GCGCGC) %60–110 aralığında dengeli artışlar elde edilmiştir. Fiber açısı büyüdükçe kapasite azalmış ve 60° – 75° aralığında karbon dizilimlerinde %5–7, hibritlerde %12–18, kevlar–cam tabanlı dizilimlerde %17–23 aralığında kayıplar ortaya çıkmıştır. Donatı çapının 3 mm'den 5 mm'ye çıkması ise genel rijitliği %8–12 artırmış ve maksimum kapasite 5CCCCC modelinde 926,88 kN olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, karbon oranı yüksek ve fiber yönelimi 0° – 30° aralığında olan FRP kaplamalar burkulma dayanımını en fazla artıran konfigürasyonlar olarak belirlenmiş; hibrit FRP sistemlerin deprem bölgelerinde kolon rijitliğini ve sünekliğini artırarak burkulma kaynaklı göçme riskini azaltan etkili bir güçlendirme yöntemi olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Burkulma, Ansys, Sayısal analiz, Hibrit.

ABSTRACT

Master Thesis

BUCKLING ANALYSIS OF HYBRID COMPOSITE COLUMNS

Hüseyin KARADUMAN

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

139+XIII page

2025

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

This study investigates the effect of epoxy-based fiber-reinforced polymer (FRP) jackets on the load-carrying capacity of columns with high buckling risk under seismic conditions using the finite element method. Column models consisting of a C30 concrete core, four S355 steel rebars, and a six-layer FRP jacket were generated in three reinforcement series with 3 mm, 4 mm, and 5 mm bar diameters. A total of 273 configurations were analyzed by varying the fiber orientation between 0° and 90° in 15° increments. This study introduces a novel modeling strategy that enables FRP jackets to be examined in an integrated manner with three-dimensional solid column models, thereby extending beyond the classical surface- and shell-based approaches in the literature. Critical buckling loads were obtained through Static Structural–Eigenvalue Buckling analyses, and all percentage variations were evaluated with respect to unjacketed reference models. Furthermore, Force Reaction analyses performed under a 2 mm displacement-controlled loading on carbon, kevlar, and glass-fiber models demonstrated that FRP jacketing significantly alters the axial stiffness and ductile–brittle tendencies of the columns. Results showed that at 0° fiber orientation, capacity enhancements reached 172.2% for the 3CCCCC configuration, 160.7% for 4CCCCC, and 145.8% for 5CCCCC. Fully carbon configurations (CCCCC) provided the highest capacity, while carbon-dominated hybrid layups such as ACACAC, CAGCAG, and GCGCGC achieved moderate increases between 60% and 110%. With increasing fiber angle, the capacity decreased, yielding losses of 5–7% in carbon configurations, 12–18% in hybrid ones, and 17–23% in kevlar–glass-based configurations within the 60°–75° range. Increasing the rebar diameter from 3 mm to 5 mm improved the overall stiffness by 8–12%, and the maximum load-carrying capacity was obtained as 926.88 kN in the 5CCCCC model. Consequently, FRP jackets with high carbon content and fiber orientations between 0° and 30° were identified as the most effective configurations for enhancing buckling resistance, and hybrid FRP systems were shown to provide an efficient strengthening method by improving the stiffness and ductility of columns and reducing buckling-induced collapse risk in seismic regions.

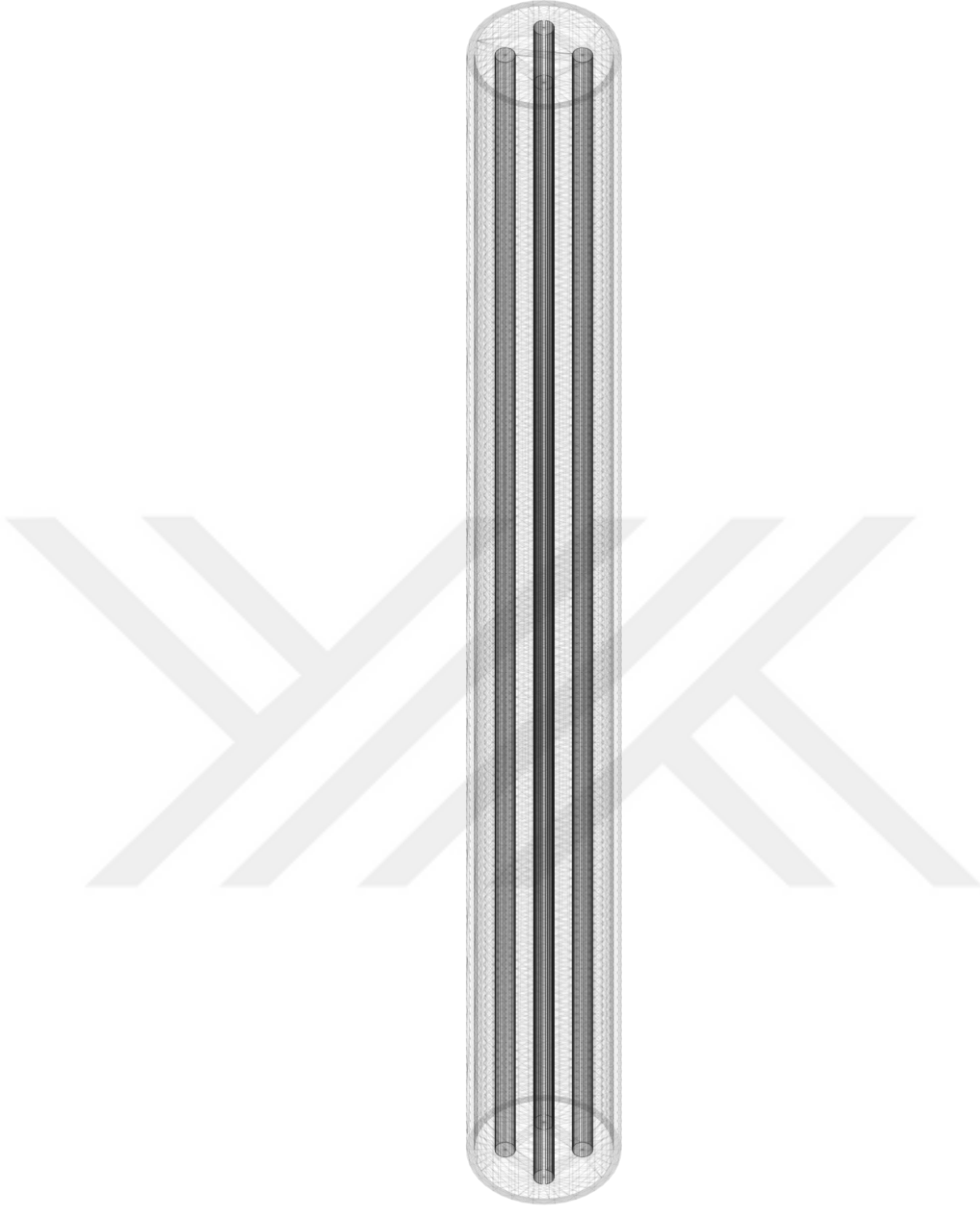
Keywords: Composite, Buckling, Ansys, Numerical simulation, Hybrid

1. GİRİŞ

Son yıllarda mühendislik yapılarında kullanılan malzemelerin mekanik performansını artırmaya yönelik hibrit sistemler, yapısal verimlilik ve dayanım açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle yüksek dayanım, düşük ağırlık ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda beton, çelik ve fiber takviyeli kompozitlerin birlikte kullanımı, klasik yapı malzemelerinin sınırlarını genişletmektedir. Betonarme yapılarda taşıyıcı elemanların en önemli stabilite problemlerinden biri olan burkulma, elemanın eksenel basınç yükleri altında denge kaybına uğrayarak ani göçmelere neden olabilen kritik bir durumdur. Bu nedenle, burkulma dayanımının artırılması amacıyla geliştirilen malzeme tabanlı güçlendirme yöntemleri, son yıllarda hem akademik hem de uygulamalı araştırmalarda ön plana çıkmıştır.

Kompozit malzemeler, yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluk ve üstün özgül mukavemet özellikleri sayesinde burkulma, çekme ve eğilme gibi zorlayıcı yükler altında yüksek performans göstermektedir. Bu malzemeler, özellikle fiber yöneliminin belirli açılarla düzenlenebilmesi sayesinde istenen mekanik özelliklerin elde edilmesine olanak tanır. Cam, karbon ve kevlar esaslı fiberlerin epoksi matrisiyle oluşturduğu çok katmanlı kompozit yapılar, yönetime bağlı olarak farklı rijitlik ve dayanım karakteristikleri sergiler. Bu durum, fiber açıları ile burkulma dayanımı arasındaki ilişkinin incelenmesini, modern malzeme mühendisliğinde önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir.

Burkulma olgusu, tarihsel olarak Euler tarafından geliştirilen teorik modellerle açıklansa da, modern mühendislik uygulamalarında kullanılan anizotropik ve çok katmanlı yapı elemanları için klasik teoriler tek başına yeterli değildir. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak malzeme heterojenliği, fiber dizilimi ve katman sayısı gibi parametreler dikkate alınmakta; böylece daha doğru ve gerçekçi sonuçlara ulaşılmaktadır.



Şekil 1. 1 : Hibrit kompozit tasarımın çizgisel görünümü.

Bu tez çalışmasında, Şekil 1.1’de çizgisel görünümü verilen C30 beton çekirdek, S355 yapı çeliği donatılar ve dış yüzeye sarılan çok katmanlı kompozit kaplama içeren hibrit silindirik bir yapı modelleri incelenmiştir. Makale aşamasında gerçekleştirilen ön çalışmalar, bu tez kapsamında genişletilmiş; fiber yönelimi ve donatı geometrisi parametreleri detaylandırılarak burkulma davranışı çok yönlü biçimde analiz edilmiştir. Kompozit kaplamadaki fiber açılarının 0° ile 90° arasında, 15° ’lik artışlarla değiştirildiği modeller oluşturulmuş ve yönelimin yapısal stabilite üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca,

beton çekirdekte yer alan S355 çelik donatıların çapları 3 mm, 4 mm ve 5 mm olacak şekilde farklı konfigürasyonlar oluşturulmuş; böylece çekirdek rijitliği ve donatı çapının burkulma yüküne olan etkisi karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

Elde edilen hibrit modeller, aynı geometrik boyutlara sahip kompozit kaplama içermeyen, yalnızca C30 beton çekirdek ve S355 yapı çeliği donatılardan oluşan bir referans model ile karşılaştırılmıştır. Böylece kompozit katmanların yapısal davranışa katkısı sayısal olarak ortaya konmuş, farklı malzeme kombinasyonlarının ve fiber yönelimlerinin burkulma yükü üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, farklı fiber yönelimleri, donatı çapları ve kaplama durumlarının hibrit kompozit kolonların burkulma davranışına etkisini incelemek ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum konfigürasyonu belirlemektir. Çalışma, özellikle deprem bölgelerinde taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi amacıyla kullanılabilecek yeni nesil hibrit kompozit sistemlerin tasarımına bilimsel katkı sunmayı hedeflemektedir.

1.1 Literatür Özeti

Farklı fiber yönelimlerine sahip karbon/epoksi kompozitlerin mekanik davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiş; 0° yöneliminin en yüksek dayanım, en düşük deformasyon ve en yüksek doğal frekansı sağladığı gösterilmiştir. Bulgular, fiber yöneliminin kompozitlerin mekanik performansında belirleyici olduğunu vurgulamaktadır [1]. Kompozit rijitlendirilmiş paneller, hafiflik, yüksek yük taşıma verimliliği ve düşük maliyet avantajları nedeniyle havacılık yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu paneller eksenel basınç, kayma veya birleşik yükleme koşullarına maruz kaldığında burkulma ve burkulma sonrası davranış kritik önem taşır. Literatürde yapılan deneysel, analitik ve sayısal çalışmalar; burkulma sonrası da taşıma kapasitesinin kısmen korunduğunu ve hasar modlarının genellikle cilt-rijitleştirici ayrılması, katmanlar arası delaminasyon ve interlaminar kırılmalarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Son on yıldaki çalışmalar, burkulma yüklerini ve hasar mekanizmalarını doğru tahmin edebilen gelişmiş sayısal modellerin tasarım optimizasyonu ve ağırlık azaltımı açısından gerekliliğini vurgulamaktadır [2]. Fiber takviyeli polimerler (FRP), yüksek mekanik dayanım, düşük ağırlık ve korozyon direnci nedeniyle yapı mühendisliğinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çalışmada karbon, cam ve aramid fiber içeren hem tek tip (NHC) hem de

intraply hibrit (IRC) kompozitler ile güçlendirilmiş beton örneklerin mekanik davranışları incelenmiştir. Farklı boyutlardaki silindirik, prizmatik ve kübik numunelerde yapılan basınç, eğilme ve elastisite deneyleri sonucunda, FRP ve hibrit takviyeli betonların rijitlik ve dayanımında belirgin artışlar elde edilmiştir. Bulgular, hibrit FRP sistemlerinin betonarme yapıların performansını geliştirmede etkili bir yöntem sunduğunu göstermektedir [3]. V hidrojen depolama tanklarının farklı geometrik biçimlerdeki (küresel, silindirik ve toroidal) patlama basıncı performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ve birinci mertebe kesme deformasyon teorisi kullanılarak, karbon, kevlar, cam ve bazalt fiber takviyeli epoksi kompozitlerin davranışı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, toroidal şeklin en iyi gerilme dağılımını ve en yüksek patlama basıncı değerini sağladığını; bazalt/epoksi kompozitin 12,7 MPa ile en yüksek dayanımı gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışma, şekil ve malzeme seçiminin hidrojen depolama verimliliği açısından kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır [4]. Tabakalı kompozit plakaların doğrusal ve doğrusal olmayan burkulma davranışları, izogeometrik analiz (IGA) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Green-Lagrange ve von Kármán gerinim-yer değiştirme ilişkilerinin karşılaştırıldığı çalışmada, Green-Lagrange doğrusal olmayanlığının daha güvenilir ve emniyetli sonuçlar sunduğu görülmüştür. Burkulma dayanımının, özellikle ön-burkulma sınır şartlarının doğru tanımlanmasına duyarlı olduğu ve bu parametrenin analiz doğruluğunu belirleyici bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, IGA tabanlı modellerin klasik sonlu eleman yöntemine (FEM) kıyasla burkulma davranışını daha hassas biçimde öngördüğü ifade edilmiştir [5]. Hibrit kompozitlerin dinamik özelliklerinin, fiber yönelimi, tabaka sayısı ve malzeme türüne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği; aramid ve karbon kombinasyonlarının doğal frekans değerlerini artırırken sönüm oranlarını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, deneysel verilerle doğrulanan sayısal analizlerde, interply ve intraply hibritlerin frekans ve rijitlik davranışlarında anlamlı farklar tespit edilmiştir [6]. Intraply hibrit karbon/kevlar kompozitlerin çekme ve yorulma davranışları, fiberlerin yük yönüne göre önemli farklılık göstermektedir. 0° (karbon yönelimi) doğrultusunda en yüksek çekme dayanımı ve modül elde edilirken, 45° yönelimde fiber dönmesiyle birlikte sünek deformasyon ve daha düşük yorulma dayanımı gözlenmiştir. Kevlar doğrultusundaki numunelerde ise yorulma çatlak ilerlemesi daha yavaş gerçekleşmiş, liflerin sertleşme etkisiyle iki aşamalı yorulma davranışı ortaya çıkmıştır. Bu durum, hibrit kompozitlerde lif yöneliminin yorulma ömrü üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermektedir [7]. Karbon, cam, bazalt ve para-aramid fiberlerin hibrit formda kullanımıyla geliştirilen termoplastik matrisli kompozitlerde, liflerin dokuma yoğunluğu ve reçine emdirme derecesi mekanik performans üzerinde belirleyici

olmuştur. Özellikle CF/BF kombinasyonu yüksek darbe dayanımı sergilerken, CF/p-aramid yapılar yüksek eğilme modülü ve sünek davranış göstermiştir. Liflerin kalınlığı, dokuma yönü ve matrisin akış özellikleri; çekme, eğilme ve delinme dayanımlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Bu sonuçlar, hibrit fiber takviyeli kompozitlerin istenen rijitlik ve süneklik dengesine göre tasarlanabileceğini göstermektedir [8].

Lamine ve biyo-esinli helicoidal kompozit kavisli kirişlerde, fiber açısının artması hem doğal frekans hem de kritik burkulma yükünü azaltmaktadır. Ayrıca, küçük fiber açılarında helicoidal-recursive ve helicoidal-exponential türlerinin en yüksek rijitlik ve stabiliteyi sağladığı belirlenmiştir [9]. Betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmak amacıyla yapılan çalışmada, intraply hibrit kompozitlerle (aramid-karbon, cam-aramid ve karbon-cam) güçlendirilmiş numunelerde referans kirişe kıyasla %4,36 ila %15,28 arasında yük kapasitesi artışı gözlenmiştir. Ayrıca, hibrit kompozit türünün kirişlerin kırılma modlarını doğrudan etkileyerek yapısal davranışa önemli katkı sağladığı belirtilmiştir [10]. Bazalt ve sisal fiber tabanlı hibrit kompozitlerle sarılan beton silindirlere, eksenel yük taşıma kapasitesinin ve sünekliğin anlamlı ölçüde arttığı belirlenmiştir. Doğal ve sentetik fiberlerin birlikte kullanımı, betonun kırılma enerjisini artırarak gevrek kırılma davranışını önemli ölçüde iyileştirmiştir [11]. Epoksi-karbon kompozitlere az miktarda karbon nanotüp eklendiğinde, malzemenin dayanımı ve aşınma direnci artmıştır. Fakat %1'den fazla eklendiğinde, nanotüplerin topaklanması nedeniyle dayanım azalmıştır [12]. Lif takviyeli hibrit kompozitlerin sonlu elemanlar analizi sonucunda, lif türü ve yerleşim şeklinin malzemenin dayanımını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Analizler, doğru lif kombinasyonlarıyla daha güçlü ve hafif yapıların tasarlanabileceğini göstermektedir [13]. Mevcut yapı kolonlarının güçlendirilmesinde RC, FRP ve SFRC giydirme yöntemleri karşılaştırılmış ve FRP sargının en yüksek dayanımı sağladığı belirlenmiştir. FRP yöntemi maliyet açısından biraz yüksek olsa da, uygulama kolaylığı ve performans üstünlüğüyle öne çıkmaktadır [14]. Bu çalışmada, katmanlar arası (interply) ve katman içi (intraply) hibrit kompozitlerde eksenel burkulma ve titreşim davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Dış tabakalarında aramid bulunan katmanlar arası hibritlerin en yüksek burkulma dayanımını sağladığı, katman içi hibritlerin ise daha iyi titreşim sönümleme performansı gösterdiği belirlenmiştir [15].

Hasarlı tabakalı kompozit yapıların termal burkulma davranışı sayısal olarak incelenmiş ve şekil hafızalı alaşım (SMA) fiber takviyesinin yüksek sıcaklıklarda dayanımı önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. SMA liflerinin eklenmesiyle burkulma sıcaklığında

yaklaşık %37'ye kadar artış elde edilmiştir [16]. Kimyasal olarak işlenmiş selüloz mikro liflerle güçlendirilmiş yeşil kompozitlerin burkulma davranışı sayısal olarak incelenmiş ve bu malzemelerin sentetik kompozitlerle benzer dayanım gösterdiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yeşil kompozitlerin çevre dostu alternatifler olarak yapısal uygulamalarda kullanılabileceğini ortaya koymaktadır [17]. Farklı kenar yükleri altında trapez şekilli kompozit plakaların burkulma davranışı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sonuçlar, kesit açıklığı, yük türü ve fiber yöneliminin burkulma yükü üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermiştir [18]. Farklı lif yönelim yollarının hibrit tabakalı kompozitlerin burkulma davranışı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, hibrit lif yerleşimlerinin, tek tip (uniform) yapılara kıyasla daha yüksek kritik burkulma yükü sağladığını göstermiştir [19]. Alt tabaka temelli değişken kinematik sonlu elemanlar yöntemiyle kompozit sandviç panellerin burkulma davranışı ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Yöntem, hem genel burkulma hem de yüzey kırışması gibi yerel kararsızlıkları yüksek doğrulukla öngörebilmekte ve hesaplama açısından oldukça verimli sonuçlar sunmaktadır [20]. Dairesel delikli tabakalı kompozit kirişlerde yanal burkulma davranışı, deneysel, teorik ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Elde edilen veriler, delik boyutu ve konumunun kritik burkulma yükünü etkilediğini ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin deney sonuçlarıyla yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymuştur [21]. Düşük maliyetli polipropilen (PP) termoplastik liflerin cam/epoksi kompozitlerde darbe dayanımı ve hasar toleransını artırdığı belirlenmiştir. PP liflerinin eklenmesiyle kompozit yoğunluğu %16 azalırken, yüksek hızlı darbe testlerinde emilen enerji %22 artış göstermiştir [22]. Hibrit kompozit malzemelerin çevresel etkilerini inceleyen yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) üzerine yapılan sistematik analiz, bu alandaki çalışmaların oldukça sınırlı olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, hibrit kompozitlerin sürdürülebilirlik açısından önemli potansiyele sahip olmasına rağmen, çevresel değerlendirme çalışmalarının henüz başlangıç aşamasında olduğunu göstermektedir [23]. Doğal ve sentetik lif tabanlı hibrit kompozitlerin mekanik, termal ve kimyasal özellikleri ile üretim teknikleri kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir. Bulgular, kimyasal işlem ve nanoparçacık katkısının liflerin dayanımını artırarak hibrit kompozitlerin otomotiv, inşaat, havacılık ve biyomedikal gibi sektörlerde kullanım potansiyelini güçlendirdiğini göstermektedir [24]. Mikro ve nano ölçekli yapılarda boyut etkilerini dikkate alan değiştirilmiş çift gerilme teorisine (MCST) dayalı sonlu elemanlar temelli bir burkulma analizi yöntemi geliştirilmiştir. Sonuçlar, boyut etkisinin hesaba katılmasıyla klasik sürekli ortam mekaniğine göre daha yüksek kritik burkulma yüklerinin elde edildiğini göstermektedir [25]. Kalınlık gerinim etkilerini içeren kinematik

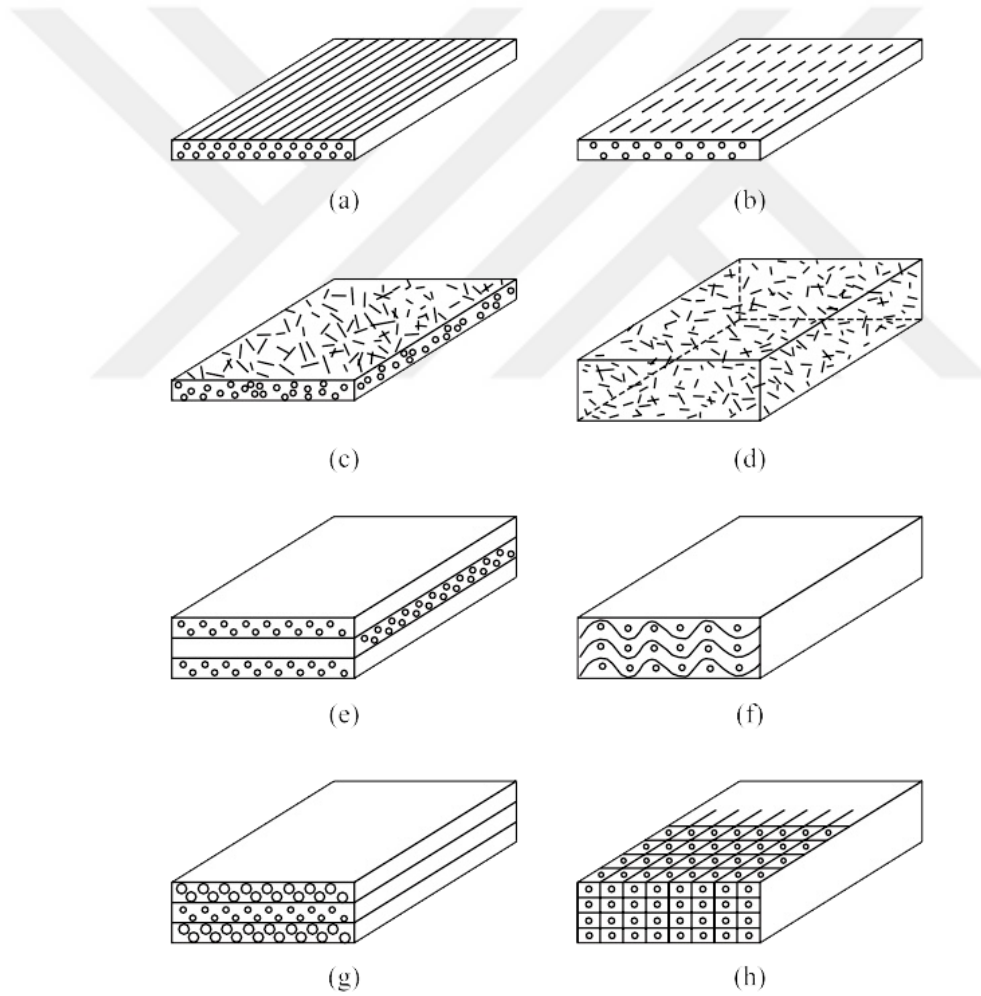
modele dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle değişken açılı fiber yerleşimine sahip (VAT) kompozit plakaların statik ve burkulma davranışı analiz edilmiştir. Modelin, değişken fiber açılarındaki yüksek doğruluk ve hesaplama verimliliği sağladığı belirlenmiştir [26]. Karbon ve cam elyaf takviyeli polimer (CFRP ve GFRP) kompozitlerin işlenebilirlik özellikleri ve üretim sırasında karşılaşılan zorluklar ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. İnceleme, kesme kuvvetleri, yüzey kalitesi ve hasar mekanizmalarının kullanılan işleme yöntemine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır [27]. S şekilli çekirdek geometrisine sahip bal peteği sandviç kompozitlerin eğme ve darbe performansları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çekirdek et kalınlığındaki artışın mekanik dayanımı artırdığı ve çekirdek diziliminde düz-ters yerleşimin eğilme performansını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir [28]. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerle karşılaştırmalı olarak doğal fiber (aramid-bazalt) takviyeli hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş, fiber oranı ve diziliminin dayanım üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Hibrit kompozitlerin darbe dayanımının CFRP'ye kıyasla daha yüksek olduğu ve otomotiv uygulamalarında alternatif malzeme potansiyeli taşıdığı belirlenmiştir [29]. EPS köpük çekirdekli alüminyum sandviç kirişlerin burkulma ve burkulma sonrası davranışları sayısal olarak analiz edilmiş, geometrik ve malzeme doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmıştır. Analizler, elastik-plastik burkulma yüklerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu ve kritik yük tahminlerinde doğruluğu artırdığını göstermiştir [30]. Eksenel basma yükü altındaki ince cidarlı kompozit silindirelerin burkulma ve burkulma sonrası davranışları doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemleriyle analiz edilmiştir. Geometrik kusurların, tabaka açısı diziliminin ve boy/çap oranının kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri değerlendirilmiş, kusur varlığının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir [31]. Basınç yükü altındaki tabakalı kompozit plakaların burkulma, burkulma sonrası ve ilerleyen kırılma davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Doğrusal olmayan Riks ve Newton-Raphson yöntemleriyle elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu ve geometrik kusurların burkulma sonrası davranış üzerinde belirgin etkiler yarattığı görülmüştür [32]. Kompozit malzemeden üretilen ince cidarlı dikdörtgen kesitli tüplerin burulma altındaki burkulma davranışları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Takviye açısı, kesit boyutu ve tüp uzunluğu gibi parametrelerin kritik burulmalı burkulma yükü üzerindeki etkileri ANSYS programı kullanılarak belirlenmiştir [33]. Karbon, cam ve aramid fiber takviyeli hibrit kompozit kirişlerin yanal burkulma davranışına soğuk ortam koşullarının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Soğutucu ortamda bekletilen numunelerde kritik burkulma yükünün arttığı,

ayrıca tabaka dizilimi ve fiber yöneliminin burkulma dayanımı üzerinde belirleyici olduğu belirlenmiştir [34]. Eğriliğe sahip tabakalı kompozit dairesel kirişlerin doğal frekans ve burkulma yüküne merkez açısı, eğrilik yarıçapı ve fiber açıları gibi parametrelerin etkisi sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Sabir ve Ashwell yer değiştirme fonksiyonlarıyla geliştirilen modelin sonuçlarının ANSYS çıktılarıyla uyumlu olduğu görülmüştür [35]. Bal peteği sandviç yapılarda petek hücrelerine köpük eklenmesinin burkulma dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Köpük dolgusu, özellikle ince hücre duvarlı numunelerde kritik burkulma yükünü belirgin şekilde artırarak yapının stabilitesini geliştirmiştir [36]. Delaminasyonlu kompozit silindirikler üzerinde yapılan araştırmada, burkulma davranışının delaminasyonun konumu ve oranından önemli ölçüde etkilendiği; bu etkinin yapısal stabiliteyi azaltarak göçme riskini artırdığı ifade edilmiştir. Çalışma, özellikle 0° fiber yöneliminin statik analizlerde burkulma eğilimini güçlendirdiğini göstermektedir [37]. Su altındaki kompozit silindirik kabukların burkulma davranışını inceleyen çalışmada, mevcut modellerin yetersizliklerini gidermek için yeni bir sonlu eleman yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, katmanlar arası gerilmeleri daha doğru hesaplayarak hidrostatik basınç altında burkulma analizlerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır [38]. Kuş çarpması veya motor parçalarının çarpması sonucu oluşan hasarların taşıma kapasitesine etkisini inceleyen çalışmada, çentik ve yapışma kaybı (debonding) içeren kompozit takviyeli paneller test edilmiştir. Sonuçlar, tek bölge çentiklerin burkulma gerinimini bir miktar artırsa da genel olarak hasarlı panellerin burkulma sonrası yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ayrıca, yüzey kalınlığının artırılmasının ilk burkulmayı geciktirdiği belirlenmiştir [39]. Değişken rijitlikli (VS) kompozit silindirik kabukların dinamik burkulma davranışını inceleyen çalışmada, geometrik kusurların ve darbe yüklerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İzogeometrik analiz temelli geliştirilen yeni bir kabuk eleman yöntemiyle yapılan hesaplamalar, VS kompozitlerin uygun lif yerleşimiyle klasik sabit rijitlikli yapılara göre daha yüksek burkulma dayanımı sağlayabildiğini göstermiştir [40]. Kompozit halka takviyeli çelik silindirlerin hidrostatik basınç altındaki burkulma davranışını inceleyen çalışmada, analitik, deneysel ve sayısal yöntemler birlikte kullanılmıştır. Bulgular, kompozit halka takviyelerin burkulma yükünü yaklaşık %259 oranında artırırken ağırlığı yalnızca %17 civarında yükselttiğini göstermiştir. Ayrıca, halka kalınlığı ve genişliği gibi parametrelerin burkulma tipi üzerinde önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir [41]. Cam-karbon hibrit kompozit silindirik yapılarda hidrostatik basınç altında burkulma dayanımını artırmak amacıyla yapılan çalışmada, farklı katman dizilimleri ve fiber yönelimleri optimize

edilmiştir. Sonuçlar, iç katmanlarda kalın cam elyaf ve dış katmanlarda rijit karbon fiber kullanımının çökme basıncını önemli ölçüde yükselttiğini göstermiştir [42]. Fonksiyonel dereceli (FG) ve auxetik çekirdekli silindirik yapılarda burkulma davranışını inceleyen çalışmada, eksenel ve radyal yükleme altında doğrusal olmayan denge denklemleri çözülmüştür. Sonuçlar, radyal basıncın burkulma direncini artırdığını ve FG tabakaların yapısal tepki üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir [43]. Köpük dolguya sahip ve birden fazla rijitlik halkasıyla takviye edilmiş silindirik yapıların burkulma davranışını inceleyen çalışmada, kritik burkulma yükünü tahmin etmek için deneysel verilere dayalı bir regresyon modeli geliştirilmiştir. Bulgular, köpük ve silindirin rijitliğinin burkulma yükü üzerinde doğrusal bir etki oluşturduğunu, ayrıca halka genişliği ve silindir çapının kritik yükü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir [44]. Değişken rijitlikli (VS) kompozit silindirik yapıların eğilme yükü altındaki burkulma dayanımını artırmak amacıyla yapılan çalışmada, üretim hatalarının (boşluk ve lif sapmaları) etkisi dikkate alınarak genetik algoritma ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, üretim kusurları hesaba katıldığında bile VS silindirlerin sabit rijitlikli yapılara göre yaklaşık %15 daha yüksek burkulma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir [45]. FG-CNT takviyeli metal-fiber hibrit kompozit panellerin hidrostatik basınç altındaki burkulma dayanımını inceleyen çalışmada, üretim kaynaklı geometrik kusurlar ve CNT aglomerasyonunun etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, fiber yönelimi, metal türü ve CNT dağılımının burkulma kapasitesi üzerinde belirleyici olduğunu ve kusurlara rağmen optimum tasarım ile yüksek dayanımın sağlanabileceğini göstermiştir [46]. Kafes çekirdekli sandviç konik-silindirik kabukların burkulma davranışını inceleyen çalışmada, analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Bulgular, rijitlik elemanlarının (stiffener) ve dış yüzey parametrelerinin burkulma yükü üzerinde önemli etkileri olduğunu ve analitik modelin sayısal sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermiştir [47].

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Teknolojik gelişmelerin temelinde malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler yer almaktadır. Uygulama alanı ne olursa olsun, mühendislik yapılarının performansı ve güvenilirliği büyük ölçüde kullanılan malzemelerin mekanik, fiziksel ve çevresel özellikleriyle sınırlıdır. Başka bir deyişle, en gelişmiş tasarımlar dahi uygun malzeme bulunmadığında işlevini yerine getiremez. Bu nedenle, mühendislikte kullanılan malzemelerin geliştirilmesi, teknolojik ilerlemenin temel itici gücü olmuştur. Kompozit malzemeler bu bağlamda, malzeme özelliklerinin optimize edilmesine yönelik insanlığın sürekli çabasının önemli bir adımını temsil etmektedir.



Şekil 2. 1 : Kompozit malzeme türleri; (a) Sürekli fiberli tek yönlü lamina, (b) süreksiz fiberli tek yönlü lamina, (c) düzlemde rastgele yönelimli kesikli fiberler, (d) üç boyutlu rastgele yönelimli kısa fiber/whisker yapısı, (e) tabakalı kompozit (laminat), (f) dokuma kumaş kompozit, (g) hibrit fiber kompozit, (h) dokuma/dikişli/örgülü kompozitler [49].

Kompozit malzemeler, Şekil 2.1’de ki gibi iki veya daha fazla farklı malzemenin belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve bileşenlerinin tek başına sahip oldukları özelliklerden daha üstün mekanik ve fiziksel nitelikler sergileyen mühendislik malzemeleridir. Metal alaşımlardan farklı olarak kompozitlerde bileşenler kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur. Kompozit sistemler temel olarak takviye (reinforcement) ve matris (matrix) olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Takviye fazı malzemenin mukavemet ve rijitliğini sağlayan esas elemandır; genellikle lif veya parçacık biçimindedir. Matris fazı ise takviyeyi bir arada tutan, dış etkilere karşı koruyan ve yük aktarımını sağlayan sürekli fazdır. Bu iki fazın uygun biçimde birleştirilmesiyle yüksek dayanım, düşük yoğunluk ve istenen yönlerde farklı mekanik özellikler elde edilir [50].

Tarihsel olarak bakıldığında, kompozit malzeme kavramı yeni bir fikir değildir. Doğa, bu konseptin çok sayıda örneğini sunmaktadır. Örneğin ağaç (wood), selüloz liflerinin lignin matrisi içinde yer aldığı doğal bir kompozittir; lifler yüksek çekme dayanımı sağlarken, lignin matrisi yapısal rijitliği destekler. Benzer şekilde kemik (bone), yumuşak kollajen liflerinin sert mineral faz (apatit) içinde dağıldığı biyolojik bir kompozittir. Bu tür doğal sistemler, lif-matris etkileşiminin dayanım, tokluk ve rijitlik gibi özellikleri nasıl dengelediğine dair erken örnekler sunar.

İnsan yapımı kompozitlerin kullanımı da oldukça eskiye dayanmaktadır. Karbon siyahı katkılı kauçuk, kumla karıştırılmış portland çimentosu veya cam lifleriyle takviye edilmiş reçineler, mühendisliğin erken dönemlerinden beri kullanılan kompozit sistemlere örnektir. Ancak modern anlamda kompozit malzeme bilimi, 1960’lı yıllarda havacılık, uzay, enerji ve inşaat gibi alanlarda yüksek dayanım ve düşük yoğunluk ihtiyacının artmasıyla sistematik bir araştırma alanı hâline gelmiştir. Bu dönemde özellikle cam, bor, karbon, silisyum karbür ve aramid gibi ileri liflerin geliştirilmesi, kompozit malzemelerin mekanik performansını büyük ölçüde artırmıştır [51].

Kompozit malzemelerin en önemli avantajı, tasarım esnekliği sağlamalarıdır. Lif yönelimi, katman dizilimi, matris türü veya takviye oranı değiştirilerek, malzemenin özellikleri uygulama gereksinimlerine göre “terzi işi” biçimde tasarlanabilir. Bu özellik, özellikle ağırlığın kritik önem taşıdığı Şekil 2.2’de verilen gibi havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde kompozitlerin yaygın kullanılmasını sağlamıştır. Ayrıca modern kompozitler, geleneksel monolitik malzemelere kıyasla çok daha yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon direnci, yorulma dayanımı ve tasarım optimizasyonu sunmaktadır.

Boeing 787 "dreamliner" composite structure

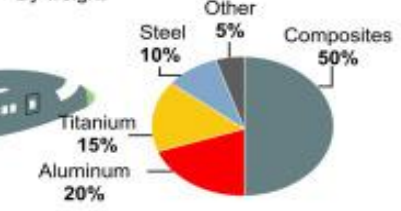
(a)

Materials used in 787 body

- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium



Total materials used
By weight



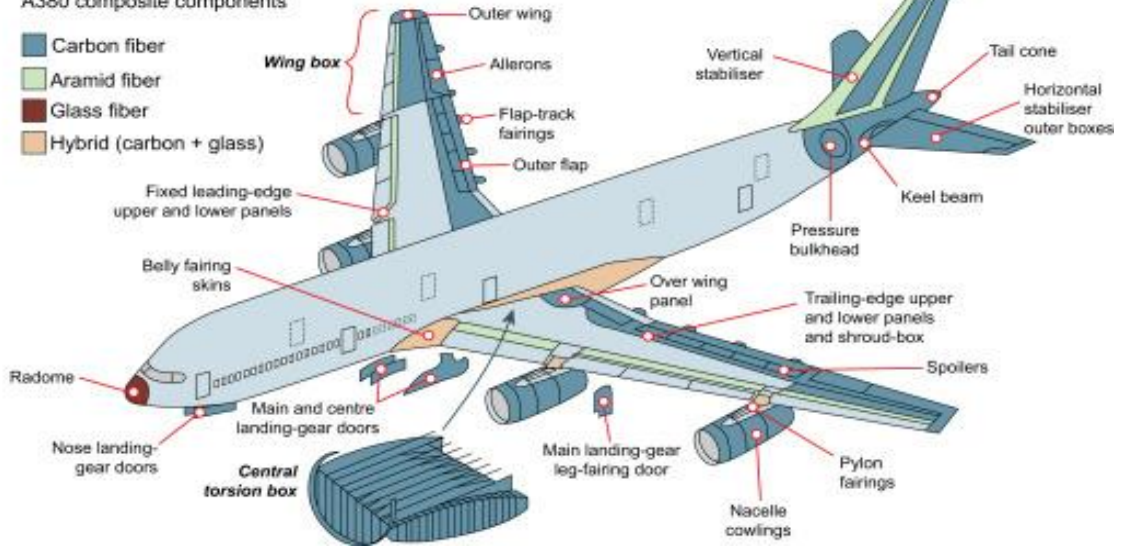
By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

(b)

Model aeroplane

A380 composite components

- Carbon fiber
- Aramid fiber
- Glass fiber
- Hybrid (carbon + glass)



Şekil 2. 2 : Havacılık yapılarında kompozit malzemelerin kullanımı: (a) Boeing 787

“Dreamliner” gövdesinde kullanılan malzeme türleri ve oranları; (b) Airbus A380 uçağının kompozit bileşenlerinin yapısal dağılımı [52]

Sonuç olarak, kompozit malzemeler hem doğal sistemlerden ilham alınarak geliştirilmiş hem de mühendisliğin modern gereksinimlerine yanıt verecek şekilde optimize edilmiş çok fazlı yapılardır. Günümüzde kompozit teknolojisi, malzeme bilimi, üretim teknolojisi ve yapısal tasarımın bütünleşik biçimde ilerlediği, yüksek performanslı mühendislik çözümlerinin temel taşı hâline gelmiştir.

2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin diğer geleneksel mühendislik malzemelerine göre önem kazanmasının temel nedeni, farklı uygulamalarda bir arada bulunması zor olan üstün özellikleri aynı yapıda sunabilmeleridir. Bu malzemeler, çekme, basma, eğilme, sürünme ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerin yanı sıra sertlik, tokluk, rijitlik ve aşınma direnci açısından da yüksek performans göstermektedir. Ayrıca, elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık, manyetik özellikler, yoğunluk gibi fiziksel ve korozyon direnci ile kimyasal kararlılık gibi kimyasal özellikler bakımından da geniş bir tasarım esnekliği sunarlar.

Malzeme seçimi ve tasarım sürecinde yalnızca teknik özellikler değil, aynı zamanda birim maliyet, temin kolaylığı, üretilebilirlik ve şekillendirilebilirlik gibi ekonomik faktörler de önemli rol oynamaktadır. Mühendislik uygulamalarında çoğu zaman malzemeden birden fazla özelliği aynı anda karşılaması beklenir. Bu durum, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte daha karmaşık ve özel amaçlı malzemelere duyulan ihtiyacı artırmıştır.

Kompozit malzemelerin en yaygın kullanım alanlarından biri, yüksek özgül mukavemetin (mukavemet/yoğunluk oranı) ön planda olduğu sektörlerdir. Özellikle havacılıkta hafiflik ve dayanımın bir arada sağlanması büyük önem taşır. Kompozit yapılar, hafif fakat yüksek dayanımlı bileşenlerin bir araya getirilmesiyle elde edilir ve bu sayede hem ağırlık hem de performans açısından avantaj sağlar. Bu malzemelerin kullanımıyla uçakların yapısal ağırlıkları önemli ölçüde azaltılmış; böylece yakıt tasarrufu, menzil artışı ve operasyonel verimlilik sağlanmıştır. Örneğin, savaş uçaklarında yalnızca 0,45 kg'lık bir ağırlık azalması toplamda yaklaşık 1,13 kg'lık bir kazanç yaratabilmektedir.

Kompozit malzemelerin bir diğer avantajı, ekonomik açıdan dengeli çözümler sunabilmeleridir. Kimya endüstrisinde kullanılan depolama ve taşıma sistemlerinde, reaktif maddelere karşı dayanıklı malzemelerin seçimi gerekir. Ancak tamamen paslanmaz çelikten yapılan yapılar yüksek maliyetli, tamamen plastik yapılar ise düşük dayanımlıdır. Bu durumda, düşük karbonlu çeliğin iç yüzeyinin plastik tabaka ile kaplanması hem mukavemeti hem de kimyasal direnci artırarak ekonomik bir çözüm sunar. Bu örnek, kompozit malzeme anlayışının mühendislik açısından en temel mantığını ortaya koymaktadır.

Bazı uygulamalarda ise malzemenin yüksek sertlik ile birlikte darbelere karşı yüksek tokluk göstermesi istenir. Klasik mühendislik malzemelerinde bu iki özelliği aynı anda sağlamak zordur. Kompozit yapılar sayesinde bu gereksinim karşılanabilmektedir. Örneğin,

zırhlı araçlarda kullanılan çok katmanlı çelik levhalar bu duruma iyi bir örnektir. Yüksek sertlikteki dış tabaka zırhın delinmesini önlerken, içteki sünek tabaka darbe enerjisini sönümleyerek yapının genel dayanımını artırır. Bu durum, kompozit tasarım yaklaşımının savunma, havacılık ve sanayi uygulamalarında neden vazgeçilmez hale geldiğini açıkça göstermektedir [53].

2.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemeler birçok üstün özelliğe sahip olmalarına rağmen, tasarım ve uygulama aşamalarında dikkate alınması gereken çeşitli dezavantajlar da barındırmaktadır. Bu dezavantajlar, özellikle üretim maliyetleri, çevresel etkiler, hasar toleransı ve tamir edilebilirlik konularında belirgin şekilde ortaya çıkar.

Kompozitlerin en önemli olumsuz yönlerinden biri yüksek hammadde ve üretim maliyetidir. Lif takviyeli polimer sistemlerinde kullanılan karbon, aramid veya cam fiber gibi malzemelerin yanı sıra, reçine sistemleri de oldukça pahalıdır. El yatırması (hand lay-up) gibi geleneksel üretim yöntemlerinde işçilik giderleri toplam imalat maliyetinin %40–60'ını oluştururken, montaj maliyetleri toplam parça maliyetinin yaklaşık %50'sine ulaşabilmektedir. Katmanların yerleştirilmesi, kütleme işlemleri ve tahribatsız muayene (NDI) süreçleri de üretim maliyetini artıran başlıca etkenlerdir.

Bir diğer önemli dezavantaj, sıcaklık ve nem gibi çevresel etkiler karşısında malzemenin hassasiyetidir. Kompozitlerin matris kaynaklı mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda belirgin biçimde azalır. Bu davranış, esas olarak kullanılan matris reçinesinin cam geçiş sıcaklığına (Tg) bağlıdır. Tg'nin üzerindeki sıcaklıklarda reçine yapısı yumuşar ve yük taşıma kapasitesi düşer. Ayrıca termoset esaslı reçineler, termoplastiklere göre daha fazla nem emer. Emilen nem, Tg değerini düşürür, matrisin mekanik özelliklerini zayıflatır ve şişme ile birlikte boyutsal kararsızlığa neden olur. Donma-çözülme çevrimlerinde bu nem genişleterek matrisin çatlamasına veya buharlaşarak tabakalar arasında delaminasyona yol açabilir.

Kompozit malzemelerin zayıf yönlerinden biri de kalınlık doğrultusundaki (out-of-plane) düşük dayanımdır. Lif takviyeli yapılar, esas olarak lif doğrultusunda yüksek mukavemet ve rijitlik gösterirken, liflere dik doğrultuda yük taşıma kapasitesi büyük oranda matris tarafından karşılanır. Bu nedenle, karmaşık yük yollarına sahip bağlantı bölgelerinde (örneğin kulakçık, bağlantı parçası, fitting vb.) kompozitlerin kullanımı uygun değildir.

Bir diğ er dezavantaj, d üş k darbe dayanımı ve delaminasyona (tabaka ayrılması) yatkınlıktır. Kompozit yapılar, d üş k hızlı darbeler ( rneğın d üş en bir alet veya montaj sırasında yapılan hatalı temaslar) sonucunda yüzeyde küçük bir ezilme şeklinde görünen, ancak tabaka içinde geniş bir alana yayılan delaminasyon hasarları oluşturabilir. Bu tür hasarlar, statik, yorulma ve burkulma dayanımını önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca,  retim sırasında yabancı madde kalması, hatalı yerleştirme veya yanlış fastener montajı da tabaka ayrılmalarına neden olabilir. Servis koşullarında delaminasyon, yorulma yükleri altında ilerleyerek yapının ani göçmesine yol açabilir.

Son olarak, kompozit malzemelerin tamiri ve bakımı metalik yapılara göre çok daha zordur. Kompozitlerde hasarın tespiti genellikle yüzeyden gözle fark edilemez; bu nedenle ultrasonik, termografik veya X-ışını gibi tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanılması gerekir. Bu işlemler hem maliyetli hem de zaman alıcıdır. Ayrıca onarım işlemleri özel yapıştırıcılar, yüzey hazırlığı ve kontrollü k rleme koşulları gerektirir; bu da nitelikli iş gücü ve uygun donanım ihtiya ını artırır [54].

2.3. Kompozit Malzemenin Takviye Ediciye Göre Sınıflandırılması

Takviye elemanları, kompozitin mukavemetini artırmanın yanı sıra ısıya dayanıklılık, korozyon direnci ve rijitlik kazandırma gibi ek işlevler de üstlenir. Matristen daha güçlü ve rijit olan bu takviyeler, kompozitin sünekliğini azaltarak daha gevrek bir davranış sergilemesine neden olur. Temel olarak beş ana takviye tipi bulunur: fiber takviyeli, laminar (katmanlı), partikül takviyeli, pul (flake) ve dolgu takviyeli kompozitler. Bu sınıflandırma, kompozitlerin yapısal özelliklerini ve kullanım alanlarını belirleyen en önemli kriterlerden biridir [55].

2.3.1 Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, matris fazı içerisinde sürekli veya kısa liflerin belirli yönelimlerle dağıtılması sonucu elde edilen, yüksek dayanım ve rijitliğ  sahip anizotrop yapılardır. Lif fazı, sistemin yük taşıma kapasitesini belirleyen esas bileşendir; matris ise lifleri bir arada tutar, çevresel etkilerden korur ve gerilme aktarımını sağlar. Bu malzemeler, genellikle epoksi, polyester veya vinil ester gibi polimerik reçinelerin karbon, cam ya da kevlar gibi yüksek mukavemetli liflerle birleştirilmesiyle üretilir. Lifler sürekli (continuous) veya kesikli (discontinuous) formda kullanılabilir. Sürekli lifli kompozitlerde liflerin tek

doğrultuda (unidirectional) veya iki doğrultuda (bidirectional) yerleştirilmesiyle yüksek eksenel rijitlik ve mukavemet elde edilirken, kısa lifli sistemlerde izotropiye yakın bir mekanik davranış sağlanır ancak maksimum dayanım daha düşüktür. Fiber takviyeli kompozitlerde lif yönelimi, katman dizilimi ve lif hacim oranı gibi parametreler, malzemenin mekanik performansını doğrudan etkiler. Bu yapıların başlıca avantajı, lif doğrultusunda çok yüksek özgül mukavemet ve özgül modül sağlamasıdır. Ancak, anizotropik karakterleri nedeniyle lif yönünden sapmalar, üretim hataları veya delaminasyon gibi hasarlar yapısal dayanımı olumsuz etkileyebilir. Fiber takviyeli kompozitler; havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik ve inşaat sektörlerinde, özellikle yüksek yük taşıma kapasitesi ve düşük ağırlık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [55].

2.3.2 Partikül takviyeli kompozitler

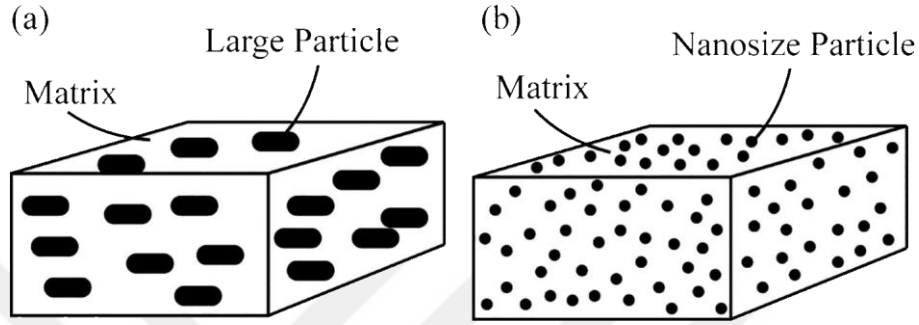
Partikül takviyeli kompozitler, matris fazı içerisine belirli oranlarda dağıtılmış küçük parçacıkların (partiküllerin) eklenmesiyle oluşturulan kompozit yapılardır. Bu tür kompozitlerde takviye elemanı, genellikle seramik, metal oksit veya karbür gibi sert partiküllerden oluşur ve matrisin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılır. Partikül takviyeli kompozitler, Şekil 2.3’de takviye parçacıklarının ortalama boyutuna göre büyük partikül kompozitleri ve mikro partiküllü kompozitler olarak iki gruba ayrılır.

Büyük partikül kompozitlerinde, milimetre mertebesindeki partiküller matris deformasyonunu sınırlandırarak yükün önemli bir kısmını taşır. Dayanım artışı, partikül ile matris arasındaki yüzeyde oluşan gerilme kısıtlaması sayesinde gerçekleşir. Mikro partiküllü kompozitlerde ise takviye elemanları nanometre boyutundadır ve yükün büyük kısmı matris tarafından taşınır. Bu durumda dayanım artışı atomik ölçekte meydana gelir; dağılmış partiküller, matris içindeki dislokasyon hareketlerini engelleyerek mukavemeti artırır.

Partikül takviyeli kompozitlerin elastisite modülü gibi mekanik özellikleri, karışım kuralı (rule of mixtures) ile tahmin edilebilir. Bu kurala göre, kompozitin toplam mekanik özelliği matris ve partikül fazlarının hacim oranlarıyla ağırlıklandırılmış ortalaması olarak hesaplanır. Ancak partikül boyutu, şekli, dağılımı ve matrisle olan ara yüzey bağı gibi faktörler, teorik değerlerden sapmalara neden olabilir. Bu nedenle, partikül dolgulu kompozitlerin gerçek davranışını tahmin etmek için hem teorik hem de deneysel modeller

kullanılmaktadır. kompozitlerin gerçek davranışını tahmin etmek için hem teorik hem de deneysel modeller kullanılmaktadır.

Partikül takviyeli kompozitler; aşınma direnci, sertlik, ısı iletkenliği veya boyutsal kararlılık gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, otomotiv, havacılık ve zırh sistemleri gibi alanlarda önemli bir yer tutmaktadır [56].

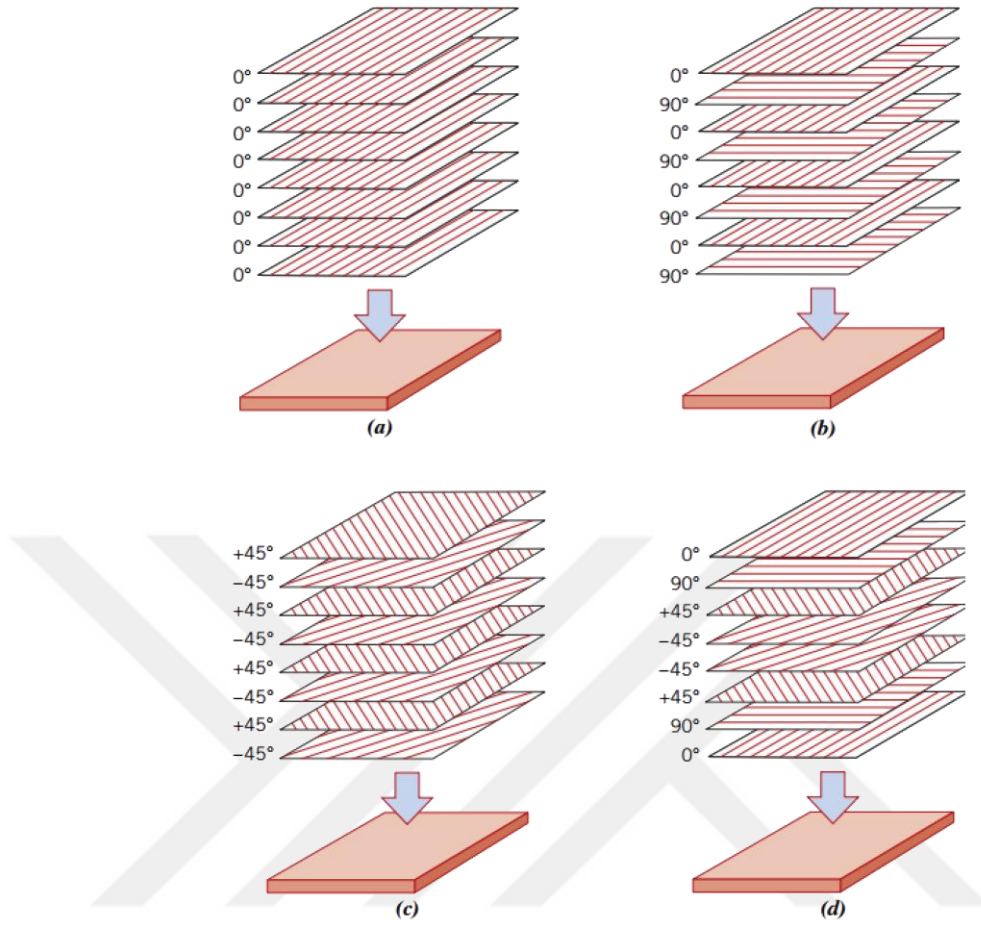


Şekil 2.3 : Partikül takviyeli kompozitler [56]

2.3.3 Sandviç ve lamine kompozitler

Katmanlı (laminar) kompozit malzemeler, Şekil 2.4’de ki gibi birden fazla lif takviyeli tabakanın belirli yönelimlerde yerleştirilip matris fazı ile bir araya getirilmesi sonucunda oluşturulan yapılardır. Lif tabakalarının kompozit eksenine göre farklı açılarla düzenlenmesi, malzemenin düzlem içi mekanik özelliklerinin istenilen yükleme koşullarına uygun şekilde ayarlanmasına olanak tanır. Bu nedenle laminar kompozitler, yüksek düzlem içi dayanım ve rijitlik sağlayan, aynı zamanda düşük yoğunluk avantajı sunan önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır.

Bununla birlikte, bu tür kompozitler kalınlık doğrultusunda sınırlı mekanik performans gösterir. Yükleme altında tabakalar arasındaki bağ dayanımının yetersiz kalmasıyla ortaya çıkan delaminasyon, laminar kompozitlerin başlıca zayıf yönlerinden biridir. Delaminasyon hasarını azaltmak amacıyla çeşitli dikişleme (ply-stitching) yöntemleri geliştirilmiş olsa da, bu teknikler tabakaların düzlem içi mukavemetinde bir miktar düşüşe neden olabilmektedir. Bu dezavantajları gidermek üzere son yıllarda üç boyutlu (3D) lif mimarilerine sahip kompozit tasarımları geliştirilmiştir. Bu yapılarda, kalınlık yönünde yer alan bağlayıcı lif veya iplikler sayesinde malzemenin kırılma tokluğu, darbe dayanımı ve genel hasar toleransı önemli ölçüde artırılmıştır [57].



Şekil 2. 4 : Tabakalı kompozitler için yerleştirme (lay-up) şemaları: (a) Tek yönlü (unidirectional), (b) Çapraz yönlü, (c) Açısal yönlü ve (d) Çok yönlü yerleşimler [58].

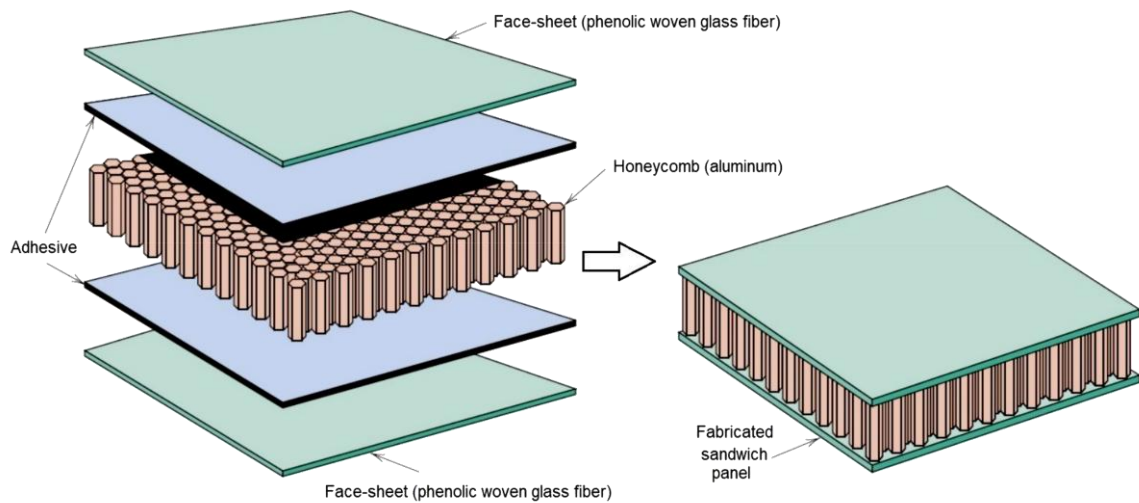
Sandviç kompozit yapılar, yüksek dayanım ve rijitlik gerektiren ancak hafifliğin kritik olduğu panel ve kiriş türü elemanların üretimi amacıyla geliştirilen özel bir kompozit malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Bu yapı, iki ince fakat yüksek mukavemetli yüzey levhasının (face/skin), arada yer alan hafif ve kalın bir çekirdek tabaka (core) ile yapıştırıcılar üzerinden bütünleştirilmesiyle meydana gelir. Yüzey levhaları genellikle alüminyum alaşımları, çelik, paslanmaz çelik, fiber takviyeli polimerler (FRP) veya kontrplak gibi dayanımı yüksek malzemelerden üretilir ve yapıya uygulanan eğilme yüklerinin ana taşıyıcısıdır. Eğilme altında bir yüzey tabakası çekme gerilmelerini üstlenirken, karşı yüzey basınç gerilmelerini taşımaktadır.

Düşük yoğunluğa ve düşük elastisite modülüne sahip çekirdek tabaka, sandviç yapının performansında kritik birkaç işlevi yerine getirir. Öncelikle yüzey levhaları arasında

stabil bir bağlantı sağlayarak onların konumunu korur. Bunun yanında, panelin kesme kuvvetlerine ve yerel burkulmaya karşı direncini artırabilmesi için yeterli kalınlık ve kesme rijitliği sunmalıdır. Yüzey tabakalarında oluşan gerilmelerin çekirdeğe göre çok daha yüksek olması nedeniyle, çekirdek esas olarak yapının genel eğilme rijitliğinde belirleyici rol oynar. Nitekim sandviç bir panelin eğilme rijitliği, çekirdeğin kalınlığı ve mekanik özelliklerine doğrudan bağlıdır; çekirdek kalınlığının artırılması panel rijitliğinin önemli ölçüde yükselmesine olanak tanır.

Sandviç paneller ekonomik açıdan da avantajlıdır; zira çekirdek malzemeleri çoğu durumda yüzey levhalarına kıyasla daha düşük maliyetlidir. En sık kullanılan çekirdek türleri Şekil 2.5'deki gibi arasında rijit polimer köpükler, balsa ağacı ve bal peteği (honeycomb) yapılar bulunmaktadır. Rijit köpük çekirdekler, polistiren, fenolik reçineler, poliüretan, PVC, polipropilen, polieterimid veya polimetakrilimid gibi çeşitli termoset ya da termoplastik polimerlerden üretilebilir. Balsa ağacı ise düşük yoğunluğu ($0.10\text{--}0.25\text{ g/cm}^3$), uygun maliyeti ve yüksek basma ile kesme dayanımı sayesinde tercih edilen doğal bir çekirdek malzemesidir. Bal peteği çekirdekler ise ince metal ya da polimer folyoların altıgen hücre yapısında birleştirilmesiyle oluşur ve yüksek özgül dayanım, rijitlik, ses ve titreşim sönümleme gibi üstün özellikler sunar.

Bu çok amaçlı kompozit yapılar; havacılıkta (örneğin kanat uçları, radomlar, kargo kapakları, rotor bileşenleri), inşaat sektöründe (cephe panelleri, çatı elemanları, iç kaplama sistemleri), otomotiv alanında (bagaj zeminleri, tavan iç kaplamaları, taban panelleri) ve denizcilikte (bölme panelleri, mobilya elemanları, iç kaplama yapıları) gibi pek çok uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadır [58].



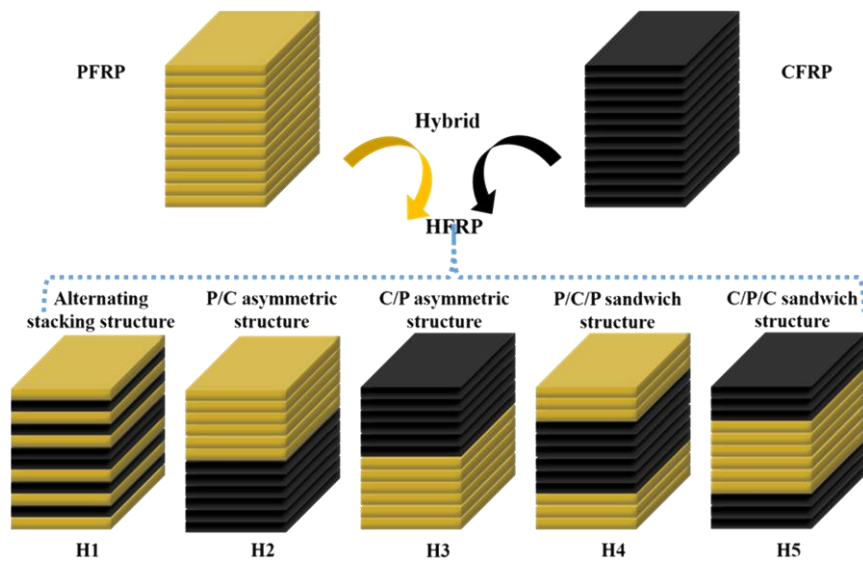
Şekil 2. 5 : Sandviç panel kompozit [58].

2.3.4 Hibrit kompozitler

Hibrit kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla lif türünün birlikte kullanılmasıyla elde edilen ve tek lifli sistemlere göre daha dengeli mekanik özellikler sunan fiber takviyeli yapılardır. Bu kapsamda en yaygın yaklaşım, polimer bir matris içerisinde karbon ve cam liflerinin birlikte kullanılmasıdır. Karbon lifleri yüksek özgül mukavemet ve rijitlik kazandırmakla birlikte maliyet açısından dezavantajlıdır; buna karşılık cam lifleri daha ekonomik olup nispeten düşük rijitlik sağlar. Bu iki lif tipinin uygun şekilde bir araya getirilmesi sonucunda, yalnızca karbon ya da yalnızca cam takviyeli kompozitlere göre daha üstün darbe dayanımı, artmış tokluk ve çoğu durumda daha düşük üretim maliyeti elde edilebilir.

Lif yerleşimi, tek bir tabaka içinde karışık ve hizalı şekilde düzenlenebileceği gibi, her tabakanın yalnızca bir lif türünden oluştuğu ve bu lif türlerinin Şekil 2.6 daki gibi tabakalar arasında dönüşümlü olarak yerleştirildiği lamine yapılar şeklinde de tasarlanabilir. Her iki yerleşim yaklaşımında da ortaya çıkan kompozit yapı belirgin bir anizotropik davranış sergiler. Çekme yüklemesi altında hibrit kompozitlerde hasar oluşumu genellikle ani değil, aşamalı şekilde ilerler: ilk olarak karbon lifleri kırılarak yükü taşımayı bırakır ve yük cam liflerine aktarılır; cam liflerinin kapasitesi de tükendiğinde taşıma yeteneği matrise devredilir ve nihai göçme matris hasarıyla sonuçlanır.

Hibrit kompozitler, hafiflik, yüksek özgül rijitlik ve darbe dayanımının birlikte talep edildiği kara, deniz ve hava taşıtlarının yapısal bileşenlerinde; spor ekipmanlarının üretiminde ve hafif ortopedik uygulamalarda geniş bir kullanım yelpazesi sunmaktadır [58].



Şekil 2. 6 : Tabaka dizilimli hibrit kompozit [59].

2.4 Kompozit Malzemelerin Matrise Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, yapısal bütünlüğü sağlayan matris fazının türüne bağlı olarak üç temel grupta incelenmektedir: polimer matrisli kompozitler (PMC), metal matrisli kompozitler (MMC) ve seramik matrisli kompozitler (CMC). Sanayide en yaygın uygulama alanına sahip olan PMC'ler, düşük maliyetleri ve üretim süreçlerindeki kolaylık nedeniyle uzun süredir tercih edilmektedir. Buna karşılık MMC ve CMC yapılar daha modern malzeme sınıflarını oluşturmakta olup, özellikle karbon ve bor bazlı sürekli fiber üretim teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde yüksek sıcaklık ve ağır hizmet koşullarındaki performansları önemli ölçüde gelişmiştir.

Matris fazı, kompozit malzemenin temel taşıyıcı bileşeni olarak takviye elemanlarını bir arada tutar, geometrik kararlılığı korur ve dış yüklerin etkin biçimde takviye fazına iletilmesini sağlar. Takviye unsurları lif, partikül veya whisker formunda olabilir ve matrisin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılır. Uygun matris–takviye eşleşmeleri ile mühendislik uygulamalarının gerektirdiği farklı rijitlik, mukavemet ve tokluk seviyelerine sahip kompozit yapılar tasarlanabilmektedir.

Metal matrisli kompozitlerde matris, çoğunlukla alüminyum, magnezyum, nikel, titanyum veya kobalt gibi metallere dayanır; takviye fazı ise genellikle seramik partiküller ya da kısa fiberlerden oluşur. Bu yapılarda takviye bileşeninin matris içinde homojen bir şekilde dağılması ve kuvvetli bir ara yüz bağının oluşması, kompozitin yük taşıma kapasitesini ve dayanım özelliklerini doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir. Matris fazı şekil verme, yük aktarımı ve enerji dağıtımı görevlerini üstlenirken; takviye fazı, malzemenin mukavemetini ve rijitliğini artırarak kompozitin genel mekanik performansını geliştirmektedir [60].

2.4.1 Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozit malzemeler, termoset veya termoplastik reçinelerin yüksek dayanım ve rijitlik sunan fiber takviyelerle birleştirilmesi sonucunda oluşturulan gelişmiş mühendislik ürünleridir. Bu yapı sayesinde, takviyesiz polimerlere ya da geleneksel metal malzemelere kıyasla daha hafif, daha dayanıklı ve daha yüksek özgül rijitliğe sahip kompozit sistemler elde edilmektedir. Ayrıca bu tür kompozitlerin mekanik özellikleri ve geometrik tasarımları, farklı mühendislik gereksinimlerine uygun biçimde kolaylıkla uyarlanabilmektedir.

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan yüksek performanslı lifler kritik bir rol oynar. Karbon fiberler, kevlar lifleri ve sıvı kristal polimer (LCP) bazlı organik fiberler; havacılık, uzay ve savunma endüstrisi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu fiberlerin yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunlukları, mükemmel ısı kararlılıkları ve kimyasal dirençleri, onları pek çok ileri teknoloji uygulaması için uygun hale getirir.

Kompozit malzemelerin performansı yalnızca takviye fiberlerinin özellikleriyle sınırlı değildir; matris türü, fiber–matris ara yüzeyinin kalitesi ve kullanılan üretim tekniği de malzemenin nihai davranışını belirleyen temel unsurlardır. Matris fazı, fiberleri bir arada tutmak ve dış yükleri etkin şekilde fiberlere aktarmakla görevlidir; fiberler ise sistemin asıl taşıyıcı bileşenini oluşturur.

Cam fiberler, 1930’lu yıllardan itibaren üretilmeye başlanmış olup günümüzde hâlâ en yaygın kullanılan yüksek performanslı takviye türüdür. Karbon fiberler ise sundukları yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle özellikle askeri uygulamalar ve havacılık alanlarında tercih edilmektedir. Kevlar fiberler ise aromatik halka yapıları ve amid bağlarının sağladığı yüksek kimyasal ve ısı kararlılık sayesinde, balistik koruma sistemleri ve zırh benzeri etkili darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [61].

2.4.2 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, isminden de anlaşılacağı üzere matris fazının metal olduğu gelişmiş kompozit malzemelerdir. Bu yapı türünde alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve bu metallerin çeşitli alaşımları en sık kullanılan matris malzemelerini oluşturur. Takviye fazı ise partikül, kısa lif veya sürekli lif biçiminde olabilir.

Bu kompozitlerde yaygın şekilde kullanılan takviye bileşenleri arasında Alümina (Al_2O_3), Silisyum Karbür (SiC), bor esaslı malzemeler, Titanyum Karbür (TiC) ve karbon türevli takviyeler bulunmaktadır. Söz konusu takviyeler, metal matrisin mekanik ve tribolojik performansını artırarak malzemeye yüksek mukavemet, gelişmiş aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanım kazandırmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde; toz metalürjisi, difüzyon yoluyla birleştirme, sıvı metalin takviye fazına nüfuz ettirilmesi (infiltrasyon), sıkıştırma döküm (squeeze casting), sıvı metal karıştırma yöntemi (stir casting) ve plazma püskürtme gibi

çeşitli yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bu teknikler içerisinde döküm temelli üretim yöntemleri, düşük maliyet, uygulama kolaylığı ve seri üretime elverişlilikleri nedeniyle en yaygın kullanılan süreçler arasında yer almaktadır [62].

2.4.3 Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMC), metal ve metal olmayan elementlerin oluşturduğu inorganik bileşiklerden meydana gelen malzeme sistemleridir. Bu tür seramikler genellikle kil, kaolen gibi doğal hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda pışırılmasıyla elde edilir. Yapısal olarak çoğunlukla silikat, alüminat ve çeşitli metal oksitlerinden oluşurlar. İyonik ya da iyonik–kovalent karakterdeki bağ yapıları nedeniyle kimyasal açıdan oldukça kararlı, fiziksel olarak ise yüksek sertlik, gevreklik ve üstün sıcaklık dayanımı sergileyen malzemelerdir.

Seramikler endüstride çok geniş bir kullanım alanına sahiptir; fırın tuğlalarından çimento ve beton katkılarına, elektronik bileşenlerden optik cihazlara kadar pek çok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Bununla birlikte, cam esaslı seramikler cam geçiş sıcaklığının üzerine çıkıldığında mekanik dayanımlarını hızla yitirir ve daha kırılgan hale gelir. Yüzeydeki küçük kusurlar bile gerilme altında çatlak ilerlemesini başlatabilir. Seramiklerin düşük çekme dayanımı ile yüksek basma dayanımı arasındaki belirgin fark da mikroyapıdaki kusurların gerilme yığılmalarını artırarak gevrek kırılmaya yol açmasından kaynaklanmaktadır.

Bu dezavantajların etkisini azaltmak amacıyla günümüzde seramik matrisli kompozitlerde ince çaplı fiber takviyeler kullanılmaktadır. Fiber takviyesi, mikroyapısal kusurların etkisini sınırlandırarak malzemenin tokluğunu ve genel dayanımını önemli ölçüde artırır. Seramiklerin yüksek sıcaklık kararlılığı ise onları özellikle yüksek sıcaklıklı kompozit sistemlerde değerli bir takviye bileşeni haline getirmektedir. En yaygın kullanılan mühendislik seramikleri arasında silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si₃N₄) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) bulunmaktadır.

Bu malzemeler kullanılarak üretilen seramik matrisli kompozitler yaklaşık 1200 °C'ye kadar, karbon matrisli ve karbon fiber takviyeli sistemler ise 3000 °C'ye varan sıcaklıklarda dahi olağanüstü mekanik ve ısıl kararlılık gösterebilmektedir. Seramik matrisli kompozitlerin yüksek eğilme dayanımı, kırılma tokluğu ve üstün ısıl şok direnci, bu

malzemeleri yüksek sıcaklık altında görev yapan mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez hale getirmektedir [63].

2.5 Fiber Malzemeler

Fiber takviyeler, yüksek özgül dayanım ve özgül rijitlik sağlayan, ince ve uzun yapıları nedeniyle çoğunlukla anizotropik davranış gösteren önemli mühendislik bileşenleridir. En yaygın kullanılan fiber türleri cam, karbon ve kevlar lifleridir; bunlara ek olarak bazalt lifleri ile keten ve jüt gibi doğal kökenli lifler de belirli uygulamalarda tercih edilmektedir. Lifler; sürekli (unidirectional), kesikli (chopped) ya da dokuma/örgü kumaş biçimlerinde kullanılarak yüklerin istenilen yönlerde etkin bir şekilde taşınması sağlanır.

Kompozit yapılarda lif ile matris arasındaki ara yüzey (interface), gerilme transferi, mekanik dayanım ve hasar toleransı açısından belirleyici bir rol oynar. Bu nedenle, uygun yüzey kaplamaları ve kuplaj ajanları kullanılarak ara yüz bağının güçlendirilmesi yaygın bir yaklaşımdır. Lif hacim oranı, oryantasyon açıları ve tabaka dizilim düzeni (lay-up) gibi tasarım parametreleri, kompozit sistemin nihai mekanik, dinamik ve dayanıklılık açısından göstereceği performansı doğrudan etkiler.

Doğru seçildiğinde fiber takviyeler, metal alternatiflerine kıyasla çok daha düşük bir kütle ile yüksek performans elde edilmesine olanak tanır. Bununla birlikte, özellikle karbon fiberler başta olmak üzere fiber takviyelerin geri dönüştürülebilirliği ve çevresel etkileri tasarım sürecinin erken safhalarında mutlaka değerlendirilmesi gereken konular arasındadır [64].

2.5.1 Epoksi karbon fiber (CFRP)

Epoksi matrisli karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), yüksek dayanım-ağırlık oranları sayesinde günümüz yapı ve malzeme mühendisliğinde en yaygın kullanılan ileri kompozit malzeme gruplarından biridir. Bu sistemler, epoksi reçinesi içinde gömülü karbon liflerinden oluşur ve özellikle betonarme, çelik, ahşap veya taş yapılarda dış yüzeye uygulanarak taşıma kapasitesinin, eğilme ve kesme dayanımının artırılmasında önemli bir rol oynar. Karbon lifleri yüksek elastisite modülleri sayesinde yapının eksenel rijitliğini artırırken, ağırlık artışı son derece düşük seviyede kalır. Bu avantajlar, CFRP uygulamalarını

özellikle deprem tehlikesi altındaki bölgelerde yapıların güçlendirilmesi ve hasar oluşumunun sınırlandırılması açısından son derece değerli kılmalıdır.

Epoksi matris, karbon liflerini bir arada tutarak yük aktarımını sağlayan bağlayıcı faz görevini üstlenir. Lif–matris ara yüzeyinin yüksek aderans göstermesi, kompozitin deformasyon ve hasar davranışında belirleyici bir unsurdur. Literatürde epoksi matrisin yalnızca mekanik dayanım açısından değil, aynı zamanda viskoelastik karakteri sayesinde çatlak ilerlemesini sınırlandırıcı etkisiyle de performansa katkı sağladığı ortaya konmuştur. Bununla birlikte, karbon liflerinin yönlenmesi ve epoksi reçinenin reolojik özellikleri, kompozitin çekme, eğilme ve burulma yükleri altındaki davranışını doğrudan etkilemektedir. Liflerin eksenel yönde hizalanması yük aktarım verimliliğini artırırken; liflerin homojen dağılmadığı veya ara yüzey bağının zayıf olduğu durumlarda mikro boşluklar ve fiber–matris ayrılmaları oluşarak çatlak başlangıç bölgeleri meydana gelebilir.

CFRP sistemlerin uygulanması, genellikle yüzeyin taşlama veya kumlama ile hazırlanması, epoksi ile doyurulmuş karbon kumaşın yüzeye yapıştırılması ve sonrasında koruyucu kaplama işlemleriyle tamamlanır. Karbon fiber dokumalar, çeliğe göre yaklaşık on yedi kat daha yüksek çekme dayanımı sunarken yoğunluklarının çeliğin yalnızca beşte biri kadar olması, bu malzemelerin hem yüksek taşıma kapasitesi hem de düşük ağırlık avantajını birlikte sağlamasına imkân tanır. Ayrıca karbon fiberler, korozyona dayanıklılıkları, uzun hizmet ömrü ve uygulama kolaylıklarıyla öne çıkar. Bununla birlikte yüksek maliyet, yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı ve düşük dayanımlı beton yüzeylerde sınırlı etkinlik gibi dezavantajlar da bulunmaktadır. Tüm bu özellikler değerlendirildiğinde epoksi esaslı CFRP güçlendirme sistemleri, geleneksel yöntemlere göre çok daha hafif, hızlı uygulanabilir ve etkili çözümler sunarak yapıların dayanımını artırmakta ve servis ömrünü önemli ölçüde uzatmaktadır [65,66].

1995 Panamerikan Oyunları'nda ABD bisiklet takımının büyük oranda karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) bileşenlerle donatılmış özel tasarım bir bisiklet kullanarak üç yarışma rekoru ve bir dünya rekoru kırması, bu malzemelerin sportif performans açısından sunduğu avantajlara çarpıcı bir örnektir. Daha hafif bisikletler, enerji tasarrufu sağlayarak sporcunun performansını doğrudan artırmakta, bu nedenle günümüzde CFRP kompozitler yol, pist ve dağ bisikleti kadrolarının üretiminde temel malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 7 : Karbon fiber kompozit ile yapılmış bisiklet [67].

Karbon fiber kompozitler, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve yüksek rijitlik özelliklerini bir arada sunmaları sayesinde üstün bir performans profili oluşturur. Özellikle zorlu arazi şartlarında kullanılan dağ bisikletlerinde, bu malzemeler hem dayanıklılık hem de hafiflik açısından son derece uygun bir çözüm sağlar. Pist bisikletlerinde ise hızın ön planda olması nedeniyle, malzemenin mümkün olan en düşük kütleye sahip olması temel tasarım hedeflerinden biridir.

Bisiklet kadrolarının üretiminde genellikle tek yönlü yüksek modüllü ve ultra yüksek modüllü karbon fiberler, çeşitli polimerik reçine sistemleriyle bir araya getirilerek kullanılmaktadır. Yarış odaklı üreticilerin büyük bir bölümü, dayanımı artırmak ve üretim toleranslarını iyileştirmek amacıyla modüler monokok kalıplama yöntemini tercih eder. Bu üretim tekniği, kadronun bütün olarak tek parça şeklinde imal edilmesini sağlayarak hem ağırlığın azaltılmasına hem de yapısal bütünlüğün artırılmasına katkı verir.

Sonuç olarak, karbon fiber takviyeli kompozitler, hafiflik–dayanım dengesinin kritik önem taşıdığı modern bisiklet tasarımlarında temel mühendislik malzemeleri haline gelmiştir. Karbon fiber hibrit kompozitlerden üretilmiş tipik bir bisiklet yapısına ilişkin örnek Şekil 2.7’de sunulmaktadır [67].

2.5.2. Epoksi cam fiber (GFRP)

Cam fiberler, esas olarak silis kumu, kil, kalsit ve kolemanit gibi hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılıp yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve daha sonra lif formuna dönüştürülmesiyle elde edilen mühendislik malzemeleridir. Üretimde kullanılan hammadde oranları cam fiberin kimyasal bileşimini doğrudan belirlediği için, mekanik performans ve kimyasal dayanım bu bileşimle yakından ilişkilidir. Örneğin silis içeriğinin artırılması mekanik dayanımı yükseltirken, farklı oksit katkıları alkali ortamlara karşı direnci güçlendirmektedir. Bu nedenle, farklı kullanım koşullarına ve endüstriyel ihtiyaçlara yönelik çeşitli cam fiber türleri geliştirilmiştir.

Epoksi matrisli cam fiber takviyeli kompozitler (GFRP), polimer matrisin mekanik özelliklerini geliştirmek, rijitliği artırmak ve yapının enerji sönümleme yeteneğini iyileştirmek amacıyla üretilmektedir. Epoksi reçinesi, fiberleri birbirine bağlayarak yük aktarımının sağlanmasında temel rolü üstlenen matris fazını oluşturur. Bu yapıda fiber–matris ara yüzeyinin kalitesi, kompozitin deformasyon karakterini ve mukavemet performansını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Üretim sırasında bağlayıcı bileşenin epoksi matrise difüzyonu ile oluşan interfaz tabakasının kimyasal uyumu ve kalınlığı, sistemin çekme, eğilme ve burkulma yükleri altında göstereceği dayanımı doğrudan etkilemektedir. Uyumlu bağlayıcı sistemleri güçlü aderans ve yüksek rijitlik sağlarken; arayüz uyumsuzlukları bağ dayanımını düşürerek çatlak ilerlemesini kolaylaştırır.

Cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin üretiminde enjeksiyon kalıplama, pultrüzyon, filaman sarma, tabaka kalıplama ve el yatırması gibi farklı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Üretim esnasında fiberlerin kırılmasını önlemek ve arayüzey bağını güçlendirmek amacıyla fiber yüzeyine özel bağlayıcı maddeler uygulanır. Bu bağlayıcılar, statik yük birikimini azaltır, liflerin birbirine yapışmasını engeller ve ara yüzey aderansını artırarak kompozitin bütünlüğünü güçlendirir. Sonuç olarak GFRP sistemleri hem yüksek dayanım hem de uzun ömürlü mekanik kararlılık sağlayan güvenilir kompozit malzemeler olarak geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. GFRP malzemeler Şekil 2.8’de verildiği gibi, hafiflik, yüksek dayanım ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde pek çok endüstride yaygın bir kullanım alanına sahiptir.



a)

b)



c)



d)



e)

Şekil 2. 8 : Cam fiber kullanım alanları, (a)Diş sabitlemede gibi biyolojik ürünlerde, (b) otomobil sektöründe (c) dekoratif ürünlerde, (d) ev ürünlerinde, (e) tekne yapımında [69].

Yapı ve yaşam alanlarına yönelik uygulamalarda çatı kaplamaları, pencere sistemleri, banyo ekipmanları, mobilya ve iç/dış duvar panelleri gibi çeşitli ürünlerde tercih edilmektedir. Elektronik sektöründe ise baskılı devre kartları, televizyon ve bilgisayar bileşenleri ile kablo ve elektrik motoru izolasyonlarında kullanılmaktadır. Denizcilik endüstrisinde GFRP malzemelerin hafiflik ve dayanım bakımından ahşap ve metal

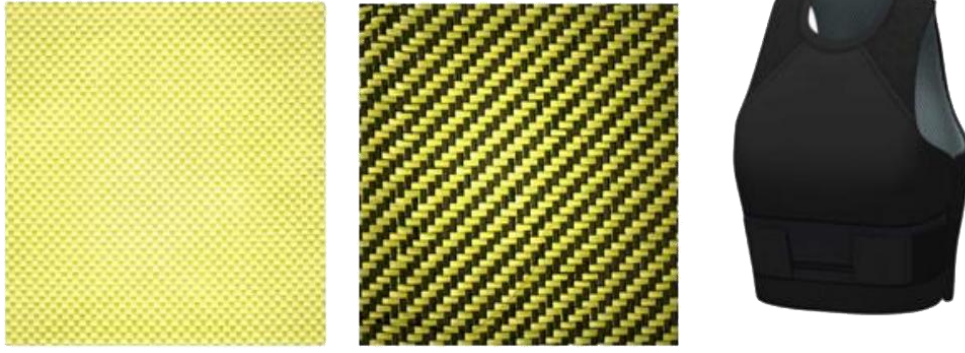
malzemelere göre önemli avantajlar sunması nedeniyle tekne üretiminde yaygın biçimde kullanıldığı bilinmektedir; günümüzde teknelerin yaklaşık %70'inin GFRP esaslı malzemelerle üretildiği rapor edilmektedir. Bu nitelikler, GFRP'nin uzun ömürlü, güvenli ve enerji verimli yapılar oluşturulmasında önemli bir katkı sunmasını sağlamaktadır.

Cam fiber takviyeli epoksi kompozitlerin performansını belirleyen temel parametreler arasında fiber–matris uyumunun doğru şekilde sağlanması, arayüz aderansının artırılması ve kompozit sistemine uygun bağlayıcı malzemenin seçilmesi yer alır. Bu unsurların optimize edilmesi, kompozitin mekanik davranışını ve dayanıklılığını doğrudan etkilemektedir. GFRP malzemeler, ekonomik olmaları ve mekanik açıdan dengeli bir performans sunmaları nedeniyle modern kompozit teknolojilerinde önemli bir yer edinmiş olup; havacılık, otomotiv ve yapı mühendisliği gibi pek çok alanda hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı çözümler sağlamaya devam etmektedir [65,68].

2.5.3. Epoksi kevlar fiber (AFRP)

Kevlar, 1972 yılında DuPont tarafından geliştirilen ve “aynı ağırlıktaki çelikten beş kat daha dayanıklı” ifadesiyle tanınan yüksek performanslı bir lif türüdür. Yanıcı ortamlara karşı yüksek direnç göstermesine rağmen erime ya da akma davranışı sergilememesi, bu lifin en dikkat çekici özelliklerindendir. Kevlar; yüksek elastisite modülü, yüksek çekme dayanımı, kimyasal etkilere karşı direnç, üstün ısı kararlılık ve boyutsal stabilite gibi avantajları sayesinde günümüzde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Bu özellikleri nedeniyle kevlar, gemi yapımından basınçlı kaplara, spor ekipmanlarından yüksek sıcaklığa dayanıklı iş kıyafetlerine ve yangın battaniyelerine kadar pek çok endüstriyel kullanımda tercih edilmektedir. Ayrıca motosiklet ve uçak lastikleri, konveyör bantları ve hidrolik hortumlar gibi hem dayanım hem de güvenlik gerektiren sistemlerde önemli bir rol oynar. Bunlara ek olarak, kevlar'ın en kritik kullanım alanları; kurşungeçirmez yelek ve kask üretimi, araç zırhlama sistemleri ve stratejik koruma amaçlı ekipman kalkanlarıdır. Yüksek enerji sönmeme yeteneği ve darbe dayanımı, kevlar'ı hayati güvenlik gerektiren uygulamalarda vazgeçilmez kılmaktadır.



Şekil 2. 9 : Kevlar fiber, karbon-kevlar ve kompozit zırh [71].

Kevlar (aramid) fiberler; yüksek elastisite modülü, düşük yoğunlukları, üstün darbe dayanımı ve yüksek enerji soğurma yetenekleri sayesinde ileri teknoloji kompozitlerde sıklıkla tercih edilen takviye malzemeleridir. Epoksi esaslı matrislerle bir arada kullanıldıklarında, düşük ağırlıkla yüksek dayanım ve rijitliği birleştiren gelişmiş kompozit yapılar meydana getirirler. Bu nedenle kevlar takviyeli epoksi kompozitler (AFRP), savunma, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri gibi performans odaklı birçok sektörde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Darbe enerjisinin kontrolü ve deformasyonun sınırlandırılmasının kritik olduğu balistik koruma sistemleri, uçak panelleri ve Şekil 2.9’da ki gibi çelik yelek gibi ürünlerde bu kompozitler özellikle tercih edilmektedir.

Kevlar fiberlerin en önemli avantajlarından biri, kırılma gerçekleşmeden önce yüksek deformasyon kabiliyeti göstermeleri ve bu sayede darbe enerjisini etkin biçimde sönmömlerler. Bu özellik, kompozitin tokluğunu ve darbe dayanımını artırırken, yapının ani yüklemeler altındaki kararlılığını da iyileştirir. Epoksi matris, kevlar lifleri arasında güçlü bir bağ oluşturarak yük aktarımını sağlar ve lifler arasındaki gerilmelerin dengeli biçimde dağılmasına katkıda bulunur. Kevlar liflerinin düşük ısı iletkenliği, üretim sırasında katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) ve yüzey hasarı gibi sorunları ortaya çıkarabilmektedir.

Bu nedenle kevlar takviyeli epoksi kompozitlerin imalatında, yüzey kalitesi ve mekanik dayanımın korunabilmesi için üretim parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalar; uygun kesme hızının, ilerleme miktarının ve fiber yönlendirilmesinin belirlenmesiyle yüzey pürüzlülüğünün azaltılabileceğini, arayüz bütünlüğünün korunabileceğini ve delaminasyon eğiliminin düşürülebileceğini göstermektedir. Ayrıca epoksi reçinenin viskozitesi, kurlama sıcaklığı ve uygulanan basınç

gibi parametreler arayüz aderansını doğrudan etkileyerek kompozitin genel mekanik performansında belirleyici rol oynamaktadır.

Kevlar takviyeli epoksi sistemler, karbon ve cam fiber kompozitlere kıyasla daha yüksek darbe enerjisi sönümlleme kapasitesi ve daha iyi aşınma dayanımı sergilemektedir. Bununla birlikte kevlar liflerinin nem çekme eğilimi ve işlenebilirlik açısından zorluklar içermesi, üretim süreçlerini diğer takviyelere göre daha karmaşık hale getirebilmektedir. Tüm bu sınırlamalara rağmen kevlar fiberler, yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında güvenilir bir takviye malzemesi olarak öne çıkmakta; hem yüksek dayanım hem de etkin enerji sönümlleme özellikleri sayesinde modern epoksi kompozit teknolojilerinde önemli bir yer tutmaktadır [65,70].

2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretiminde çok çeşitli kalıplama ve şekillendirme teknikleri kullanılmakta olup, yöntem seçimi ürünün geometrisi, kullanılacak matris ve takviye türü, hedeflenen mekanik özellikler ve üretim hızına bağlı olarak yapılmaktadır. Üretim sürecinde uygulanan yöntem; reçinenin fiberlere nüfuz etme davranışını, fiber hacim oranını, yüzey kalitesini ve nihai kompozitin mekanik performansını doğrudan etkiler. Farklı teknikler arasında el yatırması, reçine enjeksiyon sistemleri, pultrüzyon, filament sarma, tabaka yerleştirme, sıkıştırma kalıplama ve otomatik fiber yerleştirme gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her biri belirli avantajlar ve sınırlılıklar sunduğundan, uygun üretim tekniğinin belirlenmesi kompozit malzemenin istenen kalite ve performans düzeyine ulaşması açısından kritik öneme sahiptir [72].

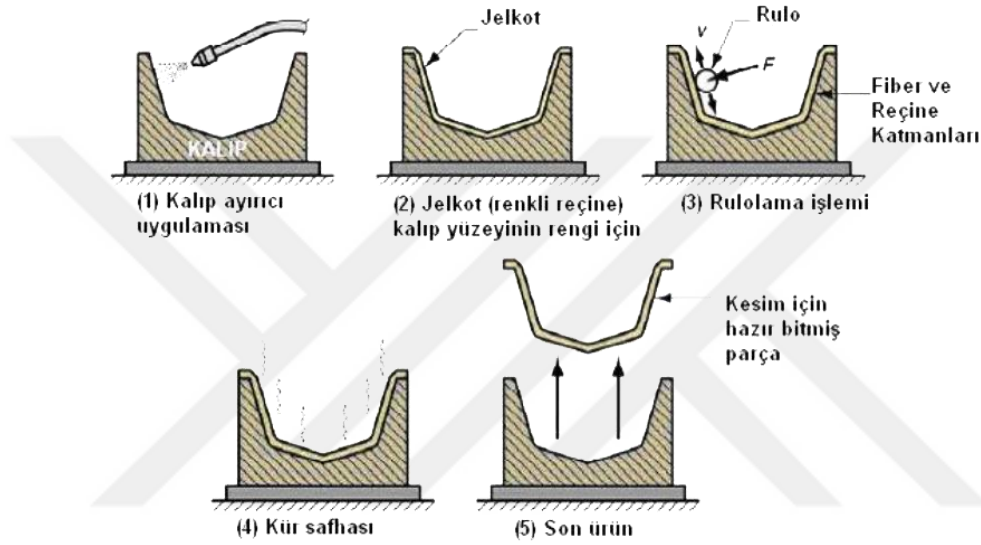
2.6.1 El yatırması yöntemi

El yatırması yöntemi, termoset matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan en temel ve düşük maliyetli imalat tekniklerinden biridir. Süreçte gerekli ekipmanların sınırlı olması yöntemi ekonomik hale getirir de, ortaya çıkan ürünün kalitesi büyük ölçüde uygulayıcının deneyimi ve dikkatine bağlıdır.

Bu yöntemde genellikle dokuma ya da dikişli kuru fiber kumaşlar takviye malzemesi olarak tercih edilir. Takviye kumaşı Şekil 2.10'da gösterimi verilen, tek yüzeyli (dişi) bir kalıp üzerine özenle yerleştirilir ve kalıbın geometrisi doğrultusunda uygun şekilde

şekillendirilir. Ardından epoksi veya polyester esaslı, düşük viskoziteli bir reçine; fırça, rulo veya benzeri el uygulama araçlarıyla takviye tabakası üzerine uygulanır.

Bazı üretim durumlarında nip-roller gibi yardımcı ekipmanlar veya emdirme sistemleri kullanılarak reçinenin kumaşa daha etkin biçimde nüfuz etmesi sağlanır. Bu sayede takviye tabakalarının tam doygunluğa ulaşması ve boşluk oranının azaltılması mümkün olur. El yatırması yöntemi; düşük üretim hacmine sahip, geniş boyutlu veya karmaşık geometrili parçaların imalatında—örneğin tekne gövdeleri, rüzgâr türbini kanatları ve otomotiv paneli üretiminde—yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [73].



Şekil 2.10 : El yatırması [72].

2.6.2 Vakum torbalama

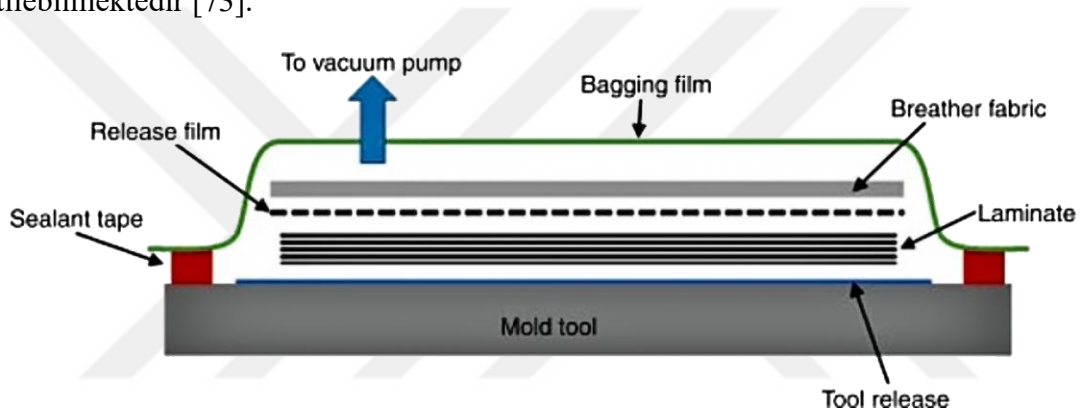
Vakum torbalama (vacuum bagging) yöntemi, kompozit malzemelerde gözenek oranını azaltmak ve fiber hacim oranını yükseltmek amacıyla kullanılan etkili bir kürleme tekniğidir. Genellikle el yatırması veya ıslak serim yöntemleriyle oluşturulan tabakalar, kalıp yüzeyine yerleştirildikten sonra plastik bir torba ya da film ile hava geçirmez şekilde kapatılır. Ardından Şekil 2.11’de ki gibi torba içerisindeki hava vakum pompası ile uzaklaştırılır ve malzeme atmosfer basıncının etkisiyle sıkıştırılarak kürlenmeye bırakılır. Bu süreç, kompozit malzemenin daha homojen ve daha yoğun bir iç yapıya sahip olmasına olanak tanır.

Vakum torbalama uygulamaları çoğunlukla fırın ortamında gerçekleştirilerek yüksek sıcaklıklarda kürleme yapılabilir. Bu durum, kimyasal reaksiyon hızının artmasına ve üretim süresinin kısılmasına katkı sağlar. Ayrıca bu yöntem, özellikle ön emprenye edilmiş

(prepreg) malzemeler ile termoplastik matrisli kompozitlerin verimli biçimde işlenmesine imkân sunar.

Her ne kadar vakum torbalama, el yatırmasıyla üretilen kompozitlere kıyasla daha yüksek mekanik performans ve daha kısa üretim döngüleri sağlayan bir yöntem olsa da, tek kullanımlık torbalar, ayırıcı filmler, hava geçiren kumaşlar (breather) ve sızdırmazlık bantları gibi sarf malzemelerinin fazlalığı nedeniyle maliyet açısından dezavantaj oluşturabilir. Bunun yanı sıra, büyük boyutlu parçaların üretimi nispeten sınırlıdır ve yüksek sıcaklıkta fırınla kürleme gerektiren durumlarda kalıp maliyetleri artabilmektedir.

Vakum torbalama tekniğiyle yalnızca cam ve karbon fiber takviyeli kompozit elemanlar değil, aynı zamanda çekirdek malzemeye sahip sandviç yapılar da başarıyla üretilmektedir [73].

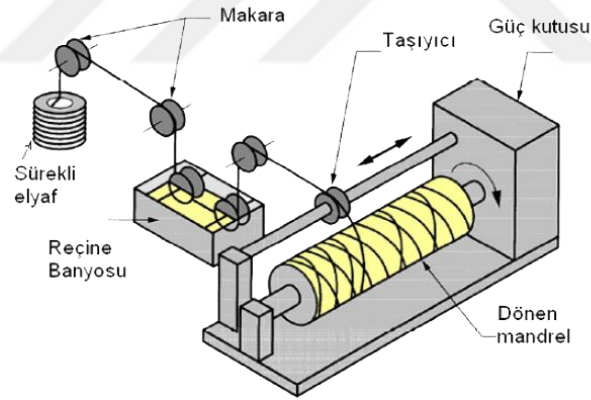


Şekil 2. 11 : Vakum torbalama [73].

2.6.3 Filament sarma yöntemi

Elyaf sarma (filament winding) yöntemi, reçine ile doyurulmuş fiberlerin dönen bir mandrel üzerine belirlenen açıyla sarılması prensibine dayanan bir kompozit üretim tekniğidir. Üretim sırasında Şekil 2.12 gösterilen mandrel kontrollü bir hızla dönerken, fiber besleme ünitesi ileri-geri hareket ederek liflerin tasarlanan yönelim açısına göre yerleştirilmesini sağlar. Mandrel ve taşıyıcı ünitenin hareketlerinin senkronize biçimde kontrol edilmesiyle hedeflenen fiber açıları ve katman dizilimleri hassas bir şekilde elde edilir. Elyaf sarma yöntemi, özellikle boru, tank ve diğer silindirik geometriye sahip kompozit yapıların imalatı için oldukça uygun bir süreçtir.

Üretim süreci tamamen otomasyona uyarlanabildiğinden, yüksek adetli üretimlerde maliyetlerin düşürülmesi ve ürün kalitesinin yüksek tutulması mümkündür. Bunun yanında, yöntemin lif yerleşiminde sunduğu yüksek hassasiyet, basınç kapları gibi özel gereksinimleri olan yapıların imalatında benzersiz bir avantaj sağlar. Nitekim filament sarma, yüksek basınca dayanıklı silindirik kompozit bileşenlerin üretiminde kullanılabilen tek yöntem olarak öne çıkmaktadır [74].

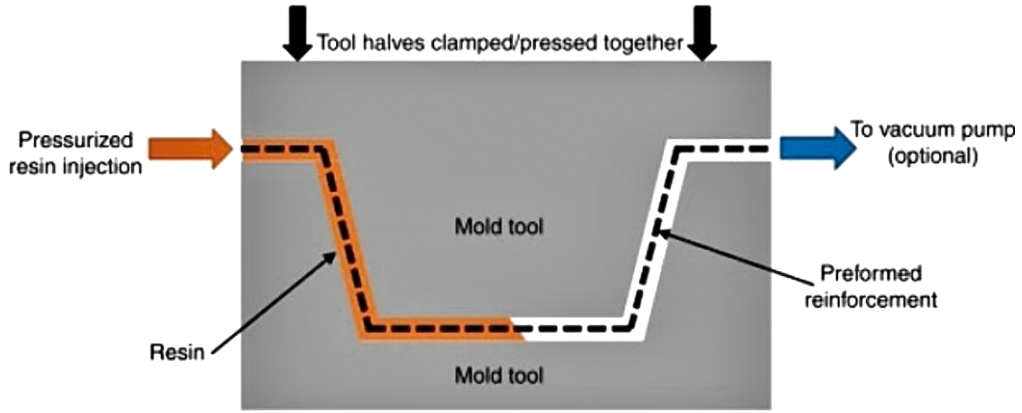


Şekil 2.12 : Filament sarım uygulaması [72].

2.6.4 Reçine transfer kalıplama

Reçine transfer kalıplama (RTM – Resin Transfer Molding) yöntemi, sıvı kompozit kalıplama (LCM) teknikleri arasında en yaygın kullanılanlardan biridir. Bu yöntem, cam veya karbon elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozit parçaların üretiminde tercih edilir. RTM sürecinde, iki parçalı kapalı bir kalıp kullanılır; kalıp içine önceden yerleştirilen kuru elyaf preformların arasına düşük viskoziteli reçine (100–1000 mPa·s) düşük basınçta (genellikle 0,7 MPa’dan az) enjekte edilir. Şekil 2.13’de görüldüğü gibi reçine, liflerin arasına nüfuz

ederek tüm yüzeyi ıslatır ve ardından kalıp içinde polimerleşerek sertleşir. Bu işlem, SRIM yöntemine göre daha yavaş gerçekleşir (saniyeler yerine birkaç dakika), bu da kalıplama basıncının ve maliyetin düşük olmasını sağlar.



Şekil 2. 13 : Reçine transfer kalıplama yöntemi [73].

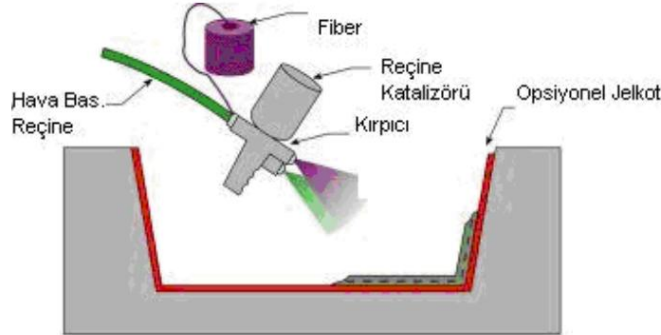
RTM sürecinde kullanılan kalıplar çoğunlukla epoksi veya kompozit esaslı malzemelerden üretilmektedir. Bu tür kalıplar, çelik kalıplara kıyasla daha hafif olmalarının yanı sıra ekonomik açıdan da önemli avantaj sağlar. Kalıp dolumu sırasında uygulanan düşük basınç ve kontrollü reçine akışı, parçanın yüzey kalitesini artırmakta ve delaminasyon oluşma olasılığını azaltmaktadır. RTM yönteminin başlıca üstünlükleri arasında yüksek yüzey doğruluğu, düşük boşluk oranı, boyutsal hassasiyet ve otomasyona uygun bir üretim süreci yer almaktadır. Bu nedenlerle RTM, havacılık, otomotiv, enerji ve denizcilik sektörlerinde karmaşık geometrili kompozit paneller, gövde bileşenleri ve çeşitli yapısal elemanların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, RTM yöntemi; SRIM tekniğine göre daha düşük basınçlarda, daha uzun sürede ancak daha yüksek yüzey kalitesiyle üretim yapılmasına imkân tanıyan gelişmiş bir sıvı kalıplama yöntemidir. Bu özellikleri sayesinde RTM, yüksek performans gerektiren kompozit malzemelerin ekonomik şekilde üretilmesinde önemli bir konuma sahiptir [49].

2.6.5 Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi, el yatırması tekniğinin geliştirilmiş ve yarı otomatik hale getirilmiş bir uyarlaması olarak değerlendirilmektedir. Her iki yöntemde de temel üretim prensibi benzer olsa da, reçine ve takviye elyafın kalıba uygulanma şekli bakımından belirgin bir farklılık bulunur. El yatırması sürecinde Şekil 2.14'de ki gibi bu uygulamalar tamamen manuel olarak yapılırken, püskürtme yönteminde reçine ve kesikli elyaf

uygulaması bir püskürtme tabancası tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Bu otomasyon, iş gücü gereksinimini azaltmakta, üretim süresini kısaltmakta ve reçinenin daha kontrollü bir şekilde uygulanmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 2. 14 : Püskürtme yöntemi [72].

Püskürtme tabancası, sürekli haldeki elyaf demetlerini istenen boylarda (yaklaşık 20–40 mm) keserek eş zamanlı olarak reçine–katalizör karışımı ile birleştirir ve bu karışımı kalıp yüzeyine püskürtür. Karıştırma işlemi tabanca içerisinde gerçekleştiğinden, operatörün kimyasallarla doğrudan temas riski önemli ölçüde azalır. Püskürtme sonrasında uygulanan yüzey, rulo yardımıyla düzeltilerek hava kabarcıklarının uzaklaştırılması ve homojen bir tabaka oluşması sağlanır.

Kalıplama işlemine, kalıp yüzeyine ayırıcı madde uygulanmasıyla başlanır; ardından yüzey koruma amaçlı jel tabaka sürülür. Jel tabaka sertleştikten sonra reçine–elyaf karışımı püskürtülerek kalıp tamamen kaplanır. Püskürtme tabancaları genel olarak hava destekli ve havasız (hidrolik basınçlı) sistemler olmak üzere iki gruba ayrılır. Havasız sistemler, daha az uçucu parçacık yaymaları ve daha düzgün bir püskürtme sağlamaları nedeniyle modern üretim hatlarında daha fazla tercih edilmektedir.

Bu yöntem, özellikle çok yüksek dayanım gerektirmeyen geniş boyutlu parçaların üretiminde önemli avantaj sağlar. Otomotiv sektöründe iç panel, kaplama ve gövde elemanlarında; ayrıca havuz, küvet, tekne kabuğu gibi büyük yüzeyli kompozit parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. El yatırması tekniğine göre daha düşük maliyetli, daha hızlı ve malzeme israfı daha az olan bir süreç sunması, püskürtme yöntemini ekonomik açıdan oldukça cazip hale getirmektedir [75].

3. BURKULMA

Yapısal elemanların dayanımını belirlerken yalnızca malzemenin akma veya kırılma sınırları dikkate alınmaz; aynı zamanda elemanın stabilitesi (kararlılığı) de büyük önem taşır. Bir yapı elemanı, yük taşıma kapasitesine ulaşmadan önce geometrik kararlılığını kaybedebilir ve bu durumda burkulma (buckling) meydana gelir. Burkulma, özellikle basınca çalışan ince ve uzun kolonlarda görülen ani şekil değiştirme olayıdır. Bu olay sonucunda kolon, eksenel doğrultuda yük taşımaya devam edemez ve ani biçimsel kararsızlığa uğrar.



Şekil 3. 1 : Deneysel olarak gözlemlenen yapısal burkulma olayı [76].

Bir kolona, eksenel doğrultusunda bir basınç yükü uygulandığında, yük belirli bir değere kadar arttırıldığında sistem dengededir. Ancak yük belirli bir sınır değeri aştığında kolon düz doğrultuda kalmaz ve ani bir yana eğilme meydana gelir. Bu kritik yük değeri Euler kritik yükü olarak adlandırılır.

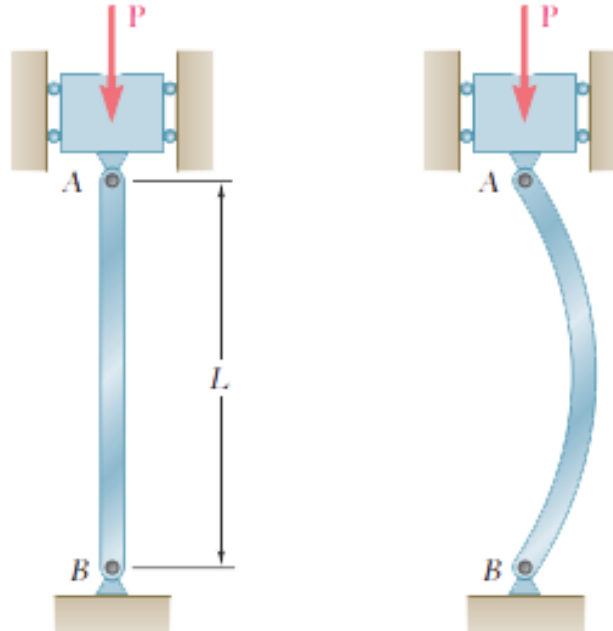
Eğer uygulanan yük $P < P_{cr}$ ise kolon denge durumunu korur ve sistem stabil kabul edilir.

Ancak yük $P > P_{cr}$ değerini aştığında kolon, başlangıçtaki doğrusal konumundan saparak yeni bir eğilmiş şekil altında dengeye gelir ve Şekil 3.1'deki gibi sistem kararsız hâle gelir [76].

3.1. Euler Burkulma Teorisi

Burkulma davranışının ilk teorik açıklaması 18. yüzyılda Leonhard Euler tarafından yapılmıştır. Euler, eksenel basınç yükü altındaki ideal bir kolonda, malzeme elastik sınırlar içinde kalmasına rağmen sistemin kararlılığını kaybettiğini matematiksel olarak göstermiştir. Bu yaklaşım, günümüzde Euler burkulma teorisi olarak bilinir ve kolon stabilitesi analizlerinin temelini oluşturur.

Bir kolona Şekil 3.2 verildiği gibi eksenel yük uygulandığında, yük belirli bir seviyeye kadar arttığında sistem dengededir. Ancak yük kritik değere ulaştığında, çok küçük bir yanal sapma bile kolonu kararsız hale getirir. Bu durumda kolon doğrusal eksen boyunca basınç taşımak yerine eğilerek yeni bir denge konumuna geçer. Bu davranış elastik stabilite kaybı olarak tanımlanır.



Şekil 3. 2 : Burkulma diagramı [76].

Euler'in matematiksel modelinde kolonun herhangi bir kesitindeki eğilme momenti, kolonun elastik eğilme denklemiyle ilişkilendirilir. Denge denklemi şu şekilde ifade edilir:

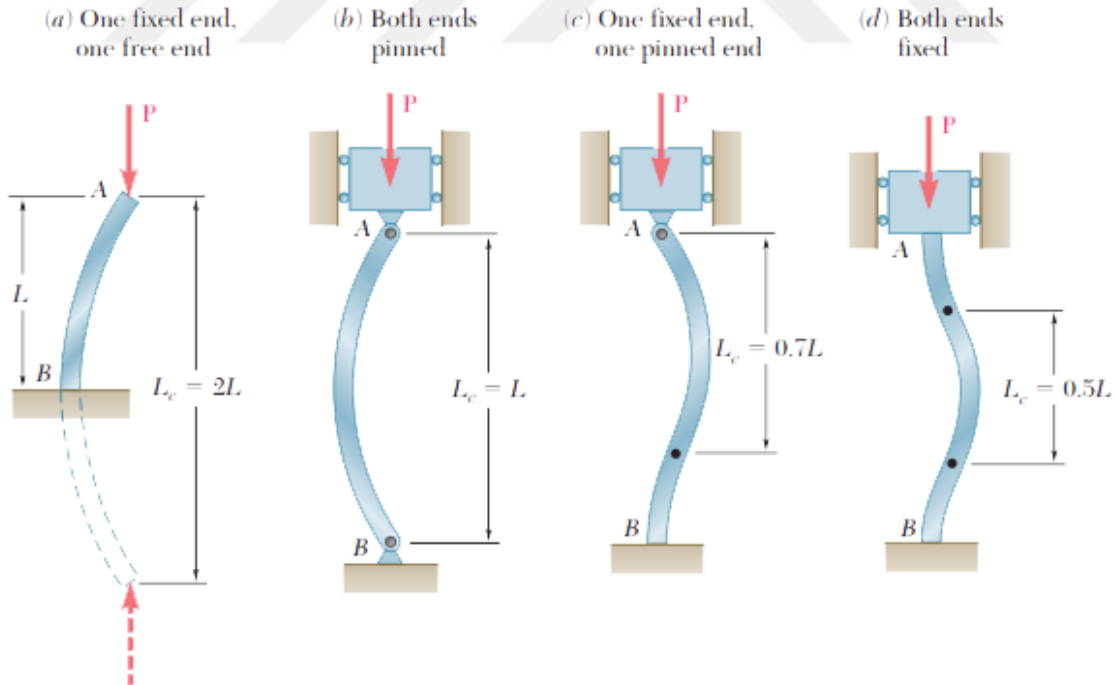
$$EI \frac{d^2y}{dx^2} + Py = 0 \quad (3.1)$$

Bu denklemde E elastisite modülünü, I kesitin en küçük atalet momentini, P uygulanan aksenal yükü ve $y(x)$ yanal sapmayı temsil eder. Çözüm, kolonun burkulma şekline karşılık gelen sinüzoidal bir eğri biçimindedir. İki ucu mafsallı bir kolon için sınır koşulları sıfır alınarak elde edilen çözüm, burkulma modlarını ve kritik yükü tanımlar. En düşük kritik yük değeri birinci mod için hesaplanır ve şu şekilde ifade edilir:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.2)$$

Bu formül, iki ucu mafsallı bir kolona ait Euler kritik yükünü temsil eder. Kritik yük, kolonun elastik sınırlar içinde kararlılığını kaybettiği ve burkulmanın başladığı yük seviyesidir [76].

3.2. Uç Koşullarının Burkulma Üzerindeki Etkisi



Şekil 3. 3 : Burkulma uç koşulları [76].

Şekil 3.3’de verilen gerçek sistemlerde kolon uçları farklı biçimlerde bağlanabilir. Uç koşulları, kolonun dönme ve öteleme serbestliğini belirler ve bu durum sistemin burkulma kapasitesini doğrudan etkiler. Uç koşulları ne kadar kısıtlysa kolonun burkulmaya karşı direnci o kadar artar.

Farklı uç koşullarını dikkate alabilmek için Euler formülüne etkin uzunluk katsayısı (K) eklenir. Kolonun etkin uzunluğu $L_e = K \cdot L$ olarak tanımlanır ve kritik yük genel formu:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem, farklı uç koşullarına sahip kolonların burkulma yüklerinin hesaplanmasında kullanılır. Uçların her ikisi mafsallı olduğunda K değeri 1.0’dır. Her iki uç ankastre olduğunda kolonun dönmesi engellendiği için K değeri 0.5 olur ve sistemin burkulma yükü dört kat artar. Bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı olduğunda K değeri yaklaşık 0.7’dir. En zayıf durum ise bir ucu serbest diğer ucu ankastre olan sistemdir; bu durumda K değeri 2.0’dır ve kolon yalnızca referans dayanımın dörtte biri kadar yük taşıyabilir.

Mühendislik uygulamalarında uç koşullarının doğru belirlenmesi analiz doğruluğu açısından büyük önem taşır. Özellikle sonlu elemanlar analizlerinde burkulma davranışı, sınır şartlarının gerçeğe uygun modellenmesiyle doğru biçimde tahmin edilebilir.

4. FEA ANALİZ YÖNTEMİ VE ANSYS YAZILIMI

Sonlu Elemanlar Analizi (Finite Element Analysis, FEA), mühendislikte karmaşık yapıların davranışını sayısal olarak incelemek için kullanılan etkili bir yöntemdir. FEA, temel olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (Finite Element Method, FEM) dayanır. Bu yöntemde, sürekli bir yapı sonlu sayıda küçük parçalara (elemanlara) ayrılır ve her elemanın davranışı, düğüm noktaları arasındaki ilişkilerle yaklaşık olarak ifade edilir. Bu sayede karmaşık geometriler, değişken sınır koşulları ve farklı malzeme özellikleri bilgisayar ortamında çözümlenebilir hale gelir. Yöntem; gerilme analizi, ısı transferi, titreşim, akışkanlar mekaniği ve stabilite problemleri gibi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Sonlu elemanlar yaklaşımı ilk olarak 1940'lı yıllarda ortaya konmuş, 1960'lardan itibaren mühendislik alanlarında yaygınlaşmıştır. Boeing firmasının uçak kanatlarını üçgen elemanlarla modellemesi, yöntemin uygulama alanını genişletmiş ve "finite element" kavramı bu dönemde literatüre girmiştir. Bu yöntemi bilgisayar ortamına aktaran ilk kapsamlı yazılım 1971 yılında geliştirilen ANSYS olmuştur. Günümüzde ANSYS, sonlu elemanlar analizlerinde dünya çapında en çok kullanılan yazılımlardan biridir.

ANSYS, FEM prensiplerine dayalı bir FEA yazılımıdır ve yapısal, termal, akışkan ve elektromanyetik analizler gibi birçok mühendislik problemine uygulanabilir. Program, lineer ve nonlineer statik analizler, dinamik titreşim incelemeleri, ısı transferi ve özellikle burkulma (stabilite) analizleri için geniş olanaklar sunar. ANSYS Workbench platformu, kullanıcıya geometri oluşturma, malzeme tanımlama, mesh hazırlama, yük ve sınır koşullarını belirleme gibi tüm analiz adımlarını tek bir arayüzde gerçekleştirme imkânı verir. Kaynakta, ANSYS'in mühendislikte 40 yılı aşkın süredir güvenilir bir analiz aracı olduğu ve yazılımın doğru kullanılabilmesi için kullanıcıların FEM'in temel mantığını iyi anlaması gerektiği belirtilmektedir [77].

4.1. ANSYS Workbench Ortamı ve Burkulma Analizi

ANSYS Workbench, farklı analiz türlerinin aynı proje üzerinde yürütülmesini sağlayan entegre bir platformdur. Kullanıcı, *Project Schematic* alanında çeşitli analiz sistemleri ekleyerek statik, dinamik veya burkulma analizlerini gerçekleştirebilir. Bu çalışmada kullanılan Eigenvalue Buckling modülü, yapıların kritik burkulma yüklerini ve bu yüklere karşılık gelen mod şekillerini hesaplamak için geliştirilmiştir.

Burkulma analizi, statik analizden elde edilen iç gerilme sonuçlarını kullanır ve sistemin rijitlik matrisi (K) ile geometrik rijitlik matrisi (K_G) üzerinden aşağıdaki özdeğer denklemini çözer:

$$([K] + \lambda[K_G])\{u\} = 0 \quad (4.1)$$

$$P_{cr} = \lambda P_{uygulanan} \quad (4.2)$$

Burada, λ burkulma yükü çarpanını (Load Multiplier), P_{cr} kritik yükü temsil eder. Bu yöntemle hem ilk (kritik) burkulma modu hem de daha yüksek mod şekilleri belirlenir. ANSYS, çözüm sonucunda mod şekillerini, deformasyon konturlarını ve yük katsayılarını otomatik olarak hesaplayarak kullanıcıya hem sayısal hem görsel olarak sunar.

4.2. Burkulma Analizlerinde FEA'nin Önemi

Burkulma, yapı elemanlarının stabilitesini belirleyen en önemli kriterlerden biridir. Basit geometriler için analitik yöntemlerle hesaplama yapılabilir de, karmaşık geometriler veya çok katmanlı kompozit yapılara sahip sistemlerde bu yöntemler yetersiz kalır. Bu nedenle sayısal çözümler ve özellikle FEA tabanlı analizler büyük önem taşır.

ANSYS Workbench, burkulma analizlerinde yüksek doğruluk ve esneklik sağlar. Kompozit kolonlar, ince cidarlı silindirik kabuklar ve sandviç yapılar gibi karmaşık sistemlerde, malzeme anizotropisi, fiber yönü ve katman dizilimi gibi etkiler ayrıntılı biçimde tanımlanabilir. Kaynakta, burkulma analizlerinde sonuçların güvenilir olması için uygun mesh yoğunluğu, doğru sınır koşulları ve fiziksel anlam kontrolünün yapılması gerektiği vurgulanmaktadır [77].

4.3. ACP-Pre Yöntemi

ANSYS Composite PrepPost (ACP-Pre) modülü, kompozit malzemelerin katman bazlı tanımını, fiber yönelimlerinin belirlenmesini ve malzeme özelliklerinin atamasını sağlayan ileri düzey bir ön-işlem (pre-processing) aracıdır. ACP-Pre, özellikle çok katmanlı kompozit yapıların mekanik analizlerinde katmanların bireysel olarak modellenmesine imkân tanır. Uygulamada iki temel yaklaşım bulunur: geometri tabanlı modelleme ve HDF5

Composite CAE dosyası kullanımı. Geometri tabanlı yöntemde, katmanlar CAD ortamında tanımlanan yüzeyler üzerinden ACP-Pre'ye aktarılır; fiber yönleri, rozet sistemleri ve malzeme özellikleri modül içinde atanır. Alternatif olarak, HDF5 formatındaki Composite CAE dosyaları aracılığıyla dış kaynaklı katman verileri (fiber yönleri, kalınlıklar ve malzeme bilgileri) doğrudan içe aktarılabilir. Bu yöntem, özellikle 3B baskı veya sarmal sarım (winding) gibi karmaşık üretim geometrilerinde doğru katman temsili elde etmeyi kolaylaştırır.

ACP-Pre iş akışı (workflow) tipik olarak şu adımlardan oluşur: öncelikle geometri veya ağ (mesh) modeli hazırlanır; ardından malzeme tanımları ve katman dizilimi (stack-up) yapılır; her katmana fiber yönü atanır ve rozet sistemi tanımlanır. Bu veriler, Workbench üzerinden mekanik çözücüye (ANSYS Mechanical) aktarılır ve burkulma, gerilme, deformasyon gibi analizler gerçekleştirilir. Ayrıca ACP-Pre, *Imported Modeling Ply* ve *Lay-up Mapping* özellikleri sayesinde katmanların 3B hacimsel modellere aktarılmasını ve solid mesh üzerine haritalanmasını (mapping) destekler. Bu sayede, çok katmanlı kompozit kolon, plaka veya kabuk yapıların doğrulukla temsil edilmesi mümkün hale gelir.

ACP-Pre'nin gelişmiş modülleri arasında Draping, Modeling Groups ve Interface Layer özellikleri yer alır. Draping algoritması, üretim sırasında fiberlerin yüzey boyunca nasıl uzandığını simüle ederek gerçekteki serim davranışını yaklaştırır. Modeling Groups ise farklı alt yapıların (örneğin gövde, kaplama veya takviye bölgeleri) ayrı ayrı tanımlanmasına imkân verir. Bu yapı, karmaşık hibrit sistemlerde, fiber yönelimlerinin ve katman sıralarının düzenli şekilde yönetilmesini sağlar [78].

5. MATERYAL VE METOT

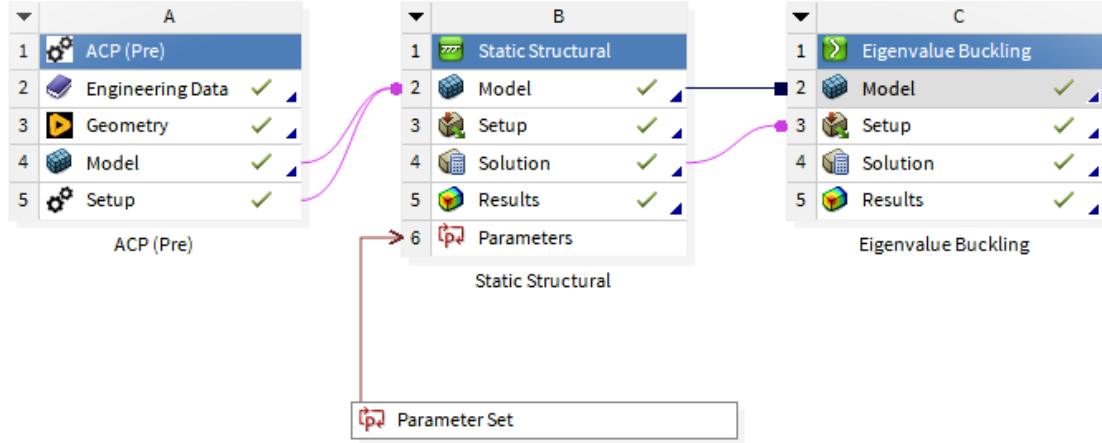
Bu çalışmada, mevcut betonarme kolonların dış yüzeyine farklı fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit kaplamalar uygulanarak oluşturulan hibrit kompozit kolonların burkulma davranışı, sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak incelenmiştir. Analizler, yüksek doğrulukta katman bazlı modelleme imkânı sunan ANSYS Workbench 2024 R2 ortamında gerçekleştirilmiştir. Kolon çekirdeği C30 sınıfı beton, iç donatılar S355 yapı çeliği, dış yüzey kaplaması ise Kevlar/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Cam/Epoksi kompozit malzemelerden oluşacak şekilde tanımlanmıştır.

Modelin genel geometrisi, 300 mm uzunluğa ve 30 mm dış çapa sahip silindirik bir kolon şeklinde tasarlanmıştır. Beton çekirdek çapı 28,5 mm olup, beton içerisinde eksenel doğrultuda simetrik olarak yerleştirilmiş dört adet çelik yapı çubuğu (donatı) bulunmaktadır. Çalışma kapsamında iç donatı çapı değişken alınarak üç farklı yapı çubuğu konfigürasyonu oluşturulmuştur: 3 mm, 4 mm ve 5 mm. Dış yüzeyde yer alan kompozit kaplama toplam altı katmandan meydana gelmiş ve her bir katman kalınlığı 0,25 mm olarak belirlenmiştir.

Kompozit tabakalar, farklı malzeme türleriyle tanımlanmış ve fiber yönelim açıları 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° olacak şekilde yedi farklı açı kombinasyonu için analiz edilmiştir. Böylece fiber yönelimi, katman dizilimi ve malzeme türü değişkenlerinin kolon davranışı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

Karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılabilmesi amacıyla, her bir donatı konfigürasyonu için kompozit kaplamasız üç adet referans model oluşturulmuştur. Bu referans modeller yalnızca C30 beton ve S355 çelik bileşenlerinden oluşmakta olup, kompozit modellerle tamamen aynı dış çapa ($\varnothing 30$ mm), aynı uzunluğa (300 mm) ve aynı donatı çapına sahiptir. Böylece, kompozit takviyenin varlığına bağlı olarak burkulma davranışındaki değişimler doğrudan gözlemlenebilmiştir.

Modelleme süreci Şekil 5.1’de görüldüğü üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada ACP (Pre) modülünde malzeme tanımları, katman kalınlıkları, fiber yönelimleri ve katman dizilimleri oluşturulmuştur. İkinci aşamada Static Structural modülünde sınır şartları ve yükleme koşulları tanımlanmış; kolonun bir ucu ankastre, diğer ucu serbest bırakılarak eksenel basınç yükü uygulanmıştır. Son aşamada Eigenvalue Buckling modülü kullanılarak sistemin kritik burkulma yükü (P_{cr}) değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5. 1 : ANSYS Workbench’te ACP (Pre) – Static Structural – Eigenvalue Buckling analiz bağlantı şeması.

Bu yöntemsel yaklaşım, farklı donatı çaplarının, fiber yönelimlerinin, katman dizilimlerinin ve kompozit kaplamanın varlığının kolonun burkulma davranışı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı biçimde değerlendirebilmek amacıyla uygulanmıştır.

5.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada incelenen hibrit kompozit kolon modelleri, üç ana malzeme grubundan oluşmaktadır: beton çekirdek, donatı çeliği ve kompozit kaplama malzemeleri. Beton çekirdek, sistemin basınç yüklerini taşıyan temel bileşen olup yapısal bütünlüğü sağlar. Donatı çeliği, çekme gerilmelerinin dengelenmesine katkıda bulunarak sünekliği artırır. Kompozit kaplamalar ise kolonun dış yüzeyinde ilave bir taşıyıcı katman oluşturarak rijitliği ve burkulma dayanımını yükseltir.

Kompozit kaplamalar, Epoksi Karbon Fiber, Epoksi Kevlar Fiber (Aramid) ve Epoksi Cam Fiber malzemelerinden oluşturulmuştur. Karbon fiber yüksek rijitlik ve dayanım sağlarken, kevlar fiber tokluk ve darbe direncini artırır; Cam fiber ise ekonomik ve kimyasal dayanımı yüksek bir alternatif olarak sistemin genel davranışına katkı sunar. Bu fiber türlerinin farklı dizilim ve kombinasyonlarıyla oluşturulan hibrit yapılar, dayanım ve süneklik arasında dengeli bir kompozit davranış elde edilmesini sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan beton ve çelik malzemeler izotropik, kompozit malzemeler ise fiber yönelimlerine bağlı olarak farklı elastik özellikler sergilediklerinden ortotropik

elastisite modeli ile tanımlanmıştır. Böylece fiber doğrultusundaki rijitlik ve dik yönlerdeki elastikiyet farkı doğru biçimde modellenmiştir.

Tüm malzeme özellikleri, güncel literatür ve deneysel veriler dikkate alınarak belirlenmiş; kompozit malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 5.1’de, beton ve çeliğe ait özellikler ise Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5. 1 : Kompozit malzemeler Epoksi Karbon Fiber, Epoksi Kevlar Fiber ve Epoksi Cam Fiberin mekanik özellikleri.

	Epoksi Cam Fiber [4]	Epoksi Karbon Fiber [1]	Epoksi Kevlar Fiber [4]
ρ (kg/m ³)	1800	1800	1380
$E_x/E_y/E_z$ (GPa)	30.9/7.33/7.33	230/23/23	80/5.5/5.5
$\nu_{xy}/\nu_{yz}/\nu_{xz}$	0.281/0.448/0.281	0.2/0.4/0.2	0.34/0.4/0.34
$G_{xy}/G_{yz}/G_{xz}$ (GPa)	2.69/2.53/2.69	9/8/9	2.2/1.8/2.2

Çizelge 5. 2 : Beton C30 ve yapı çubuğu S355 malzemelerinin mekanik özellikleri.

	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	σ_{ak} (MPa)	σ_{ζ} (MPa)	σ_{cy} (MPa)
Beton (C30) [81]	2500	32	0.2	-	1.9	30
S355 [79,80]	7850	210	0.3	355	510	-

Properties of Outline Row 3: Beton (C30)					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2500	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Mod...			
6	Young's Modulus	32	GPa		
7	Poisson's Ratio	0,2			
8	Bulk Modulus	17778	tonne s ⁻² mm ⁻¹		
9	Shear Modulus	13333	tonne s ⁻² mm ⁻¹		
10	Tensile Yield Strength	1,9	MPa		
11	Compressive Yield Strength	30	MPa		

Properties of Outline Row 7: S355					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulus an...			
6	Young's Modulus	210	GPa		
7	Poisson's Ratio	0,3			
8	Bulk Modulus	1,75E+05	tonne s ⁻² mm ⁻¹		
9	Shear Modulus	80769	tonne s ⁻² mm ⁻¹		
10	Tensile Yield Strength	355	MPa		
11	Tensile Ultimate Strength	510	MPa		

a)

b)

Properties of Outline Row 4: Epoksi Cam Fiber					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1800	kg m ⁻³		
4	Orthotropic Elasticity				
5	Young's Modulus X direction	30,9	GPa		
6	Young's Modulus Y direction	7,33	GPa		
7	Young's Modulus Z direction	7,33	GPa		
8	Poisson's Ratio XY	0,281			
9	Poisson's Ratio YZ	0,448			
10	Poisson's Ratio XZ	0,281			
11	Shear Modulus XY	2,69	GPa		
12	Shear Modulus YZ	2,53	GPa		
13	Shear Modulus XZ	2,69	GPa		

c)

Properties of Outline Row 5: Epoksi Karbon Fiber					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1800	kg m ⁻³		
4	Orthotropic Elasticity				
5	Young's Modulus X direction	230	GPa		
6	Young's Modulus Y direction	23	GPa		
7	Young's Modulus Z direction	23	GPa		
8	Poisson's Ratio XY	0,2			
9	Poisson's Ratio YZ	0,4			
10	Poisson's Ratio XZ	0,2			
11	Shear Modulus XY	9	GPa		
12	Shear Modulus YZ	8	GPa		
13	Shear Modulus XZ	9	GPa		

d)

Properties of Outline Row 6: Epoksi Kevlar Fiber					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1380	kg m ⁻³		
4	Orthotropic Elasticity				
5	Young's Modulus X direction	80	GPa		
6	Young's Modulus Y direction	5,5	GPa		
7	Young's Modulus Z direction	5,5	GPa		
8	Poisson's Ratio XY	0,34			
9	Poisson's Ratio YZ	0,4			
10	Poisson's Ratio XZ	0,34			
11	Shear Modulus XY	2,2	GPa		
12	Shear Modulus YZ	1,8	GPa		
13	Shear Modulus XZ	2,2	GPa		

e)

Şekil 5. 2 : Mekanik özelliklerinin *Engineering Data* modülüne tanımlanması;

(a) C30 beton, (b) S355, (c) E/cam fiber (d) E/karbon fiber (e) E/kevlar fiber.

Bu çalışmada kullanılan tüm malzemelerin mekanik özellikleri, ANSYS Workbench yazılımının *Engineering Data* modülünde tanımlanmıştır. Bu modül, analizlerde kullanılacak malzemelere ait elastik, plastik ve yoğunluk gibi temel parametrelerin modele atanmasını sağlayan bir veri tabanı olarak işlev görmektedir. Şekil 5.2’de, çalışmada kullanılan kompozit, çelik ve beton malzemelere ait mekanik özelliklerin bu modül aracılığıyla tanımlanma süreci gösterilmektedir.

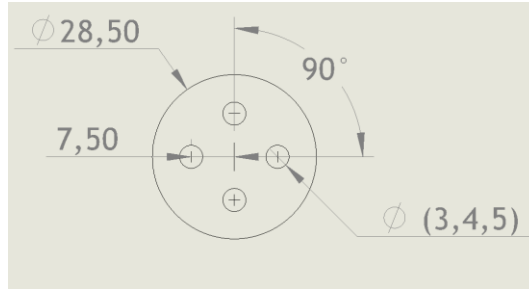
Analiz kapsamında kullanılan epoksi esaslı cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozit malzemeler, fiber yönelimine bağlı olarak farklı elastik özellikler sergilediğinden, bu malzemeler ortotropik elastisite modeli ile tanımlanmıştır. Bu modelde, her bir kompozit için üç farklı doğrultudaki Young modülleri (E_x , E_y , E_z), üç Poisson oranı (ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{xz}) ve üç kayma modülü (G_{xy} , G_{yz} , G_{xz}) ayrı ayrı girilmiştir. Böylelikle fiber doğrultusundaki yük taşıma kapasitesi ile dik doğrultulardaki davranış arasındaki farklar doğru şekilde temsil edilmiştir. Ortotropik malzeme tanımlamaları, özellikle çok katmanlı hibrit kompozit yapıların doğru rijitlik matrisinin elde edilmesinde kritik rol oynamaktadır. Kompozit malzemelere ait mekanik özellikler ayrıntılı olarak Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Diğer taraftan, C30 sınıfı beton ve S355 yapı çeliği için izotropik elastisite modeli tercih edilmiştir. Bu malzemelerde elastik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu varsayılmış, dolayısıyla malzeme davranışı tek bir Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν) ile tanımlanmıştır. Betonun çekme ve basınç dayanımları (f_{ct} ve f_{ck}) ile çeliğin akma ve çekme dayanımları (f_y ve σ_u) literatür verileriyle uyumlu biçimde belirlenmiş ve ayrıntılı olarak Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

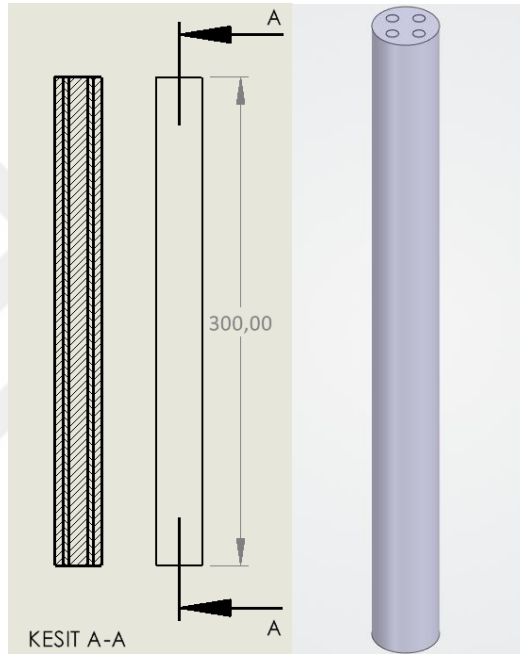
Bu kapsamda, her bir malzeme için tanımlanan yoğunluk, elastisite modülleri, Poisson oranları ve kayma modülleri; hem teorik hem de deneysel literatür değerleriyle tutarlı olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece, ACP (Pre) modülünde gerçekleştirilen katman tanımlamaları ve burkulma analizleri sırasında, malzeme davranışının gerçeğe en yakın biçimde temsil edilmesi sağlanmıştır.

Analizlerde beton ve çelik bileşenler izotropik, kompozit malzemeler ise ortotropik karakterde modellenmiştir. Kompozit katmanlarda, fiberlerin yönelim açılarına bağlı olarak elastisite modülleri ve kayma modülleri eksenel ve teğetsel doğrultularda farklı değerler almıştır. Bu yaklaşım, fiber takviyeli kompozitlerin anizotropik davranışını doğru biçimde temsil etmek amacıyla tercih edilmiştir.

5.2 Burkulma Analizi İçin Model Tasarımı



a)



b)

c)

Şekil 5.3 : *Discovery*'de oluşturulmuş modelin (a) teknik resim üst görünümü, (b) teknik resim yandan ve kesit görünümü, (c) model görünüm.

Bu çalışmada kullanılan modeller, ANSYS Discovery ortamında oluşturulmuş ve analiz sürecinde kullanılmak üzere ACP (Pre) modülüne aktarılmıştır. Modeller, eksenel kuvvet yükü altındaki silindirik kolonların burkulma davranışını incelemek amacıyla hazırlanmıştır.

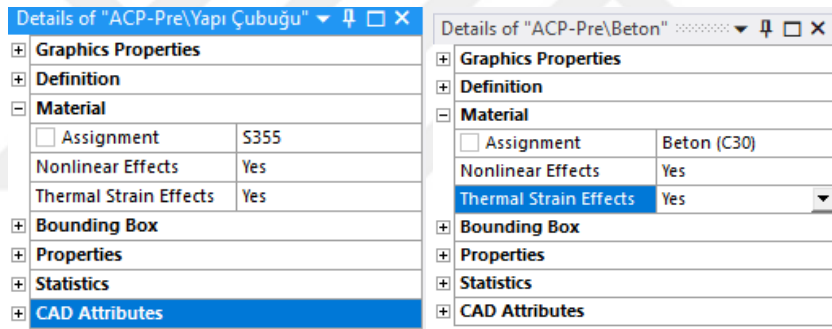
Toplamda altı farklı model oluşturulmuştur. Üçü referans model, üçü ise aynı geometriye sahip ancak ilerleyen aşamalarda kompozit kaplama uygulanacak modellerdir.

Referans modellerin dış çapı 30 mm, kompozit kaplama uygulanacak modellerin dış çapı ise 28,5 mm olarak belirlenmiştir. Tüm modellerin uzunluğu 300 mm'dir.

Şekil 5.3'de teknik resimlerinde verildiği her iki model grubunda da beton çekirdek içerisine 4 adet yapı çubuğu (S355 yapı çeliği donatı) yerleştirilmiştir. Bu yapı çubuklarının çapları 3 mm, 4 mm ve 5 mm olacak şekilde üç farklı varyasyon oluşturulmuştur. Donatı çubuklarının merkezleri, kolon merkezine göre 7,5 mm uzaklıkta olacak biçimde simetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu düzenleme, çubukların dairesel olarak dengeli bir konumda bulunmasını sağlamış ve yük altında oluşacak gerilme dağılımlarının eksenel simetriye uygun biçimde modellenmesine olanak tanımıştır.

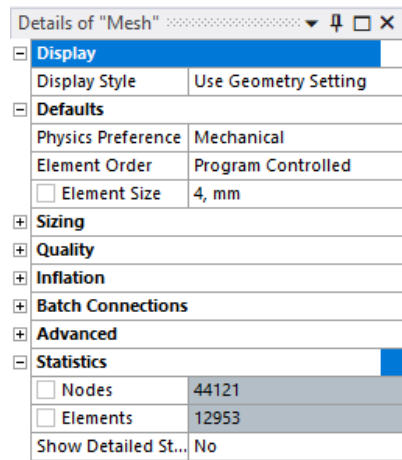
Tüm modellerde genel geometrik ölçüler aynı tutulmuş, yalnızca yapı çubuğu çapı ve dış çap parametreleri değiştirilmiştir.

5.3 Modelin ACP (Pre) Modülünde Tanımlanması



a)

b)

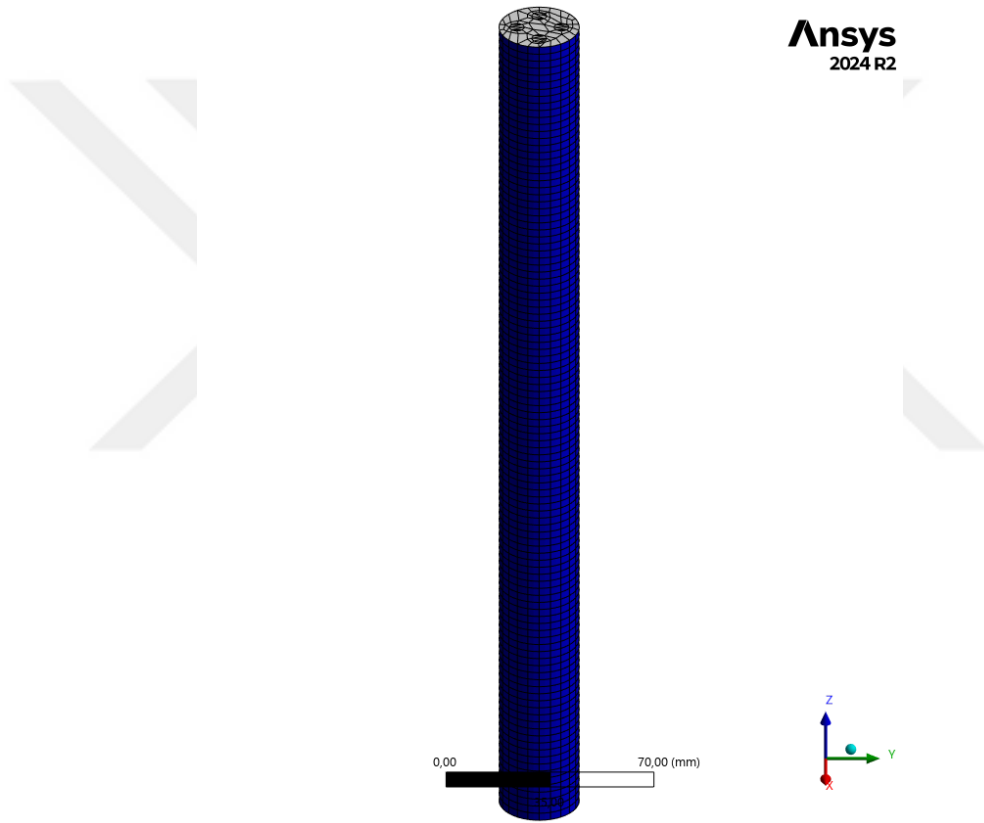


c)

Şekil 5. 4 : Modele malzeme atamaları ve mesh (a) yapı çubuğu, (b) c30 beton, (c) mesh.

Modelin tanımlama işlemleri, ANSYS Composite PrepPost (ACP) (Pre) modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada modelin geometrik bileşenleri, malzeme atamaları, ağ (mesh) yapısı ve temas koşulları tanımlanmıştır.

Öncelikle beton çekirdek ve yapı çubukları ayrı bileşenler (part) olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, beton bölgeye C30 sınıfı beton, donatı çubuklarına ise S355 yapı çeliği atanmıştır. Her iki malzeme için de *Nonlinear Effects* seçeneği etkinleştirilmiş; böylece doğrusal olmayan deformasyonların model davranışına etkisi dikkate alınmıştır. Malzeme atamaları ACP (Pre) arayüzündeki *Assignment* sekmesi üzerinden yapılmıştır.



Şekil 5. 5 : Çekirdek modelin mesh yapısının genel görünümü.

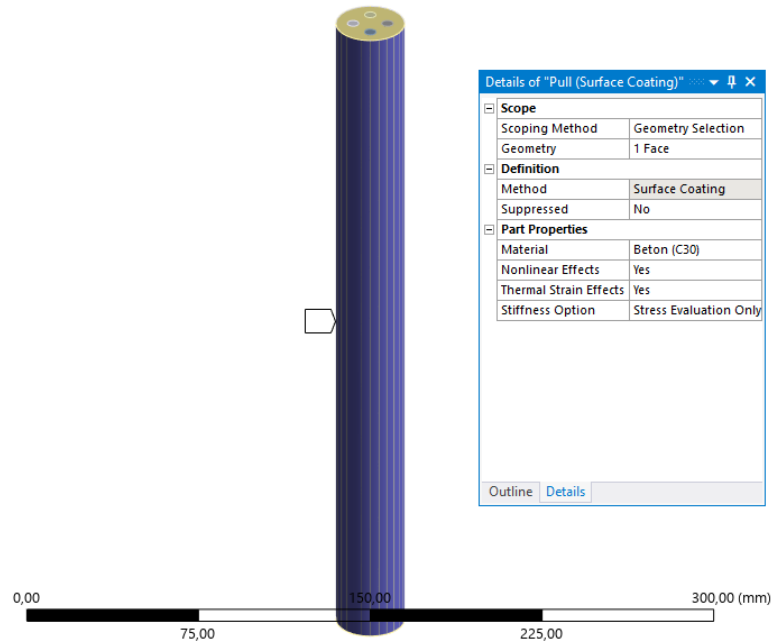
Model üzerinde ağ yapısı oluşturulurken Physics Preference: Mechanical seçeneği kullanılmış ve eleman boyutu 4 mm olarak belirlenmiştir. Eleman tipi, mekanik analizlerde yüksek doğruluk sağlayan üç boyutlu tetrahedral elemanlardan seçilmiştir. Bu mesh ayarları, çözüm doğruluğunu koruyacak ve hesaplama süresini optimize edecek şekilde belirlenmiştir. Oluşturulan ağ yapısında toplam 44.121 düğüm (node) ve 12.953 eleman (element) yer almaktadır. Mesh yoğunluğu, beton ve çelik arayüzlerinde gerilme aktarımının

doğru biçimde yakalanabilmesi amacıyla bu bölgelerde daha sık olacak biçimde düzenlenmiştir.

Model bileşenleri arasında tam yapışma (bonded contact) tanımlanmış ve beton ile donatı çubuklarının yük altında birlikte çalışması sağlanmıştır. Bu sayede, kolon eksenel basınç yüküne maruz kaldığında çubukların beton çekirdek ile bütünleşik davranış sergilemesi hedeflenmiştir.

Bu aşamada oluşturulan model, kompozit kaplama uygulanmadan önceki referans durumunu temsil etmektedir. Şekil 5.5'te ağ (mesh) yapısının genel görünümü verilmiştir. Bu model, ilerleyen aşamalarda kompozit kaplamaların tanımlanacağı analizler için temel yapı olarak kullanılmıştır.

5.3.1 ACP-Pre ile solid çekirdek üzerinde kompozit kaplama tanımlama



Şekil 5. 6 : Pull (Surface Coating)” yöntemiyle çekirdek dış yüzeyine tanımlanan 0 mm kalınlıklı hayali yüzey.

ACP-Pre modülü yalnızca kabuk (shell) veya yüzey (surface) temelli geometriler üzerinde çalışabildiği için, solid biçimde tanımlanan C30 beton çekirdek doğrudan lay-up geometrisi olarak kullanılamamıştır. Bu durumu aşmak amacıyla Şekil 5.6’da, çekirdeğin

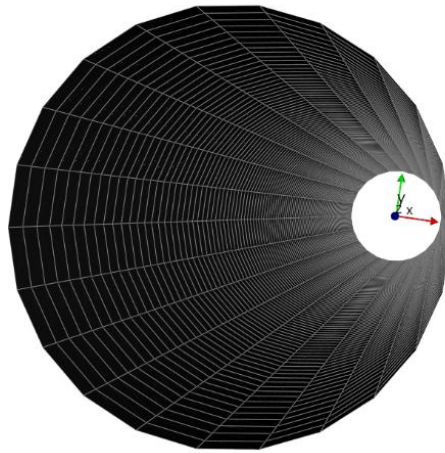
dış silindirik yüzeyine sıfır kalınlıklı bir hayali yüzey tanımlanmıştır. Bu işlem, Model Tree üzerinden Mesh sekmesi altındaki Insert → Pull (Surface Coating) komutu kullanılarak yapılmıştır.

“Pull (Surface Coating)” seçeneği etkinleştirildikten sonra, *Geometry Selection* kısmında çekirdeğin dış yüzeyi seçilmiş; *Method = Surface Coating*, *Thickness = 0 mm* olarak tanımlanmıştır. Böylece tanımlanan yüzey, yapısal modele herhangi bir kalınlık veya rijitlik eklemekten yalnızca topolojik bir referans tabaka işlevi görmüştür.

Yüzeyin malzemesi, model bütünlüğünü korumak ve malzeme sürekliliğini sağlamak amacıyla C30 beton olarak atanmıştır. Kalınlığın sıfır olması nedeniyle bu atama, çözüme herhangi bir mekanik katkı getirmemekte, yalnızca sistemin yüzeyi geçerli bir eleman olarak algılamasını sağlamaktadır. Bu hayali yüzeyin Şekil 5.7 görünümü verilmiş ACP-Pre modülünde ilk kompozit katman için temel geometri olarak kullanılmıştır.

ACP Model
11/02/25 03:59
Fiber Directions
Ply-Wise
On Solids

Ansys
2024 R2

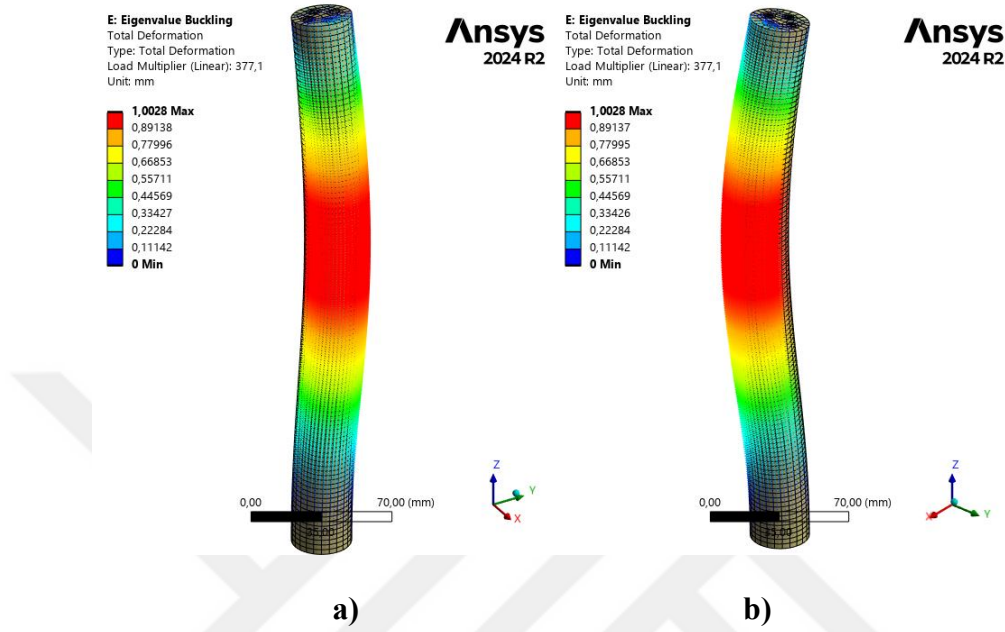


Şekil 5. 7 : ACP-Pre Setup’da hayali yüzeyin görünümü.

5.3.1.1 Doğrulama

Uygulanan yöntemin doğruluğunu test etmek amacıyla, 5R referans modeli (kompozit kaplamasız beton + donatı) iki ayrı biçimde çözülmüştür:

Her iki durumda Eigenvalue Buckling analizinden elde edilen mod şekilleri ve Load Multiplier değerleri Şekil 5.8’de verilmiş, toplam yer değiştirme konturları ve Load Multiplier değerleri tam olarak aynı çıkmıştır. Bu sonuç, hayali yüzeyin yalnızca geometrik bir taşıyıcı olduğunu, modele ilave rijitlik veya kütle kazandırmadığını doğrulamıştır.



Şekil 5. 8 : Bu yöntemin doğruluğu için yapılan 5R modelinde burkulma analizi (a) Pull (Surface Coating) yöntemiyle tanımlanan sıfır mm kalınlıklı yüzeyle), (b) hayali yüzey tanımlanmadan.

5.4. ACP (Pre) Setup – Kompozit Katmanların Tanımlanması

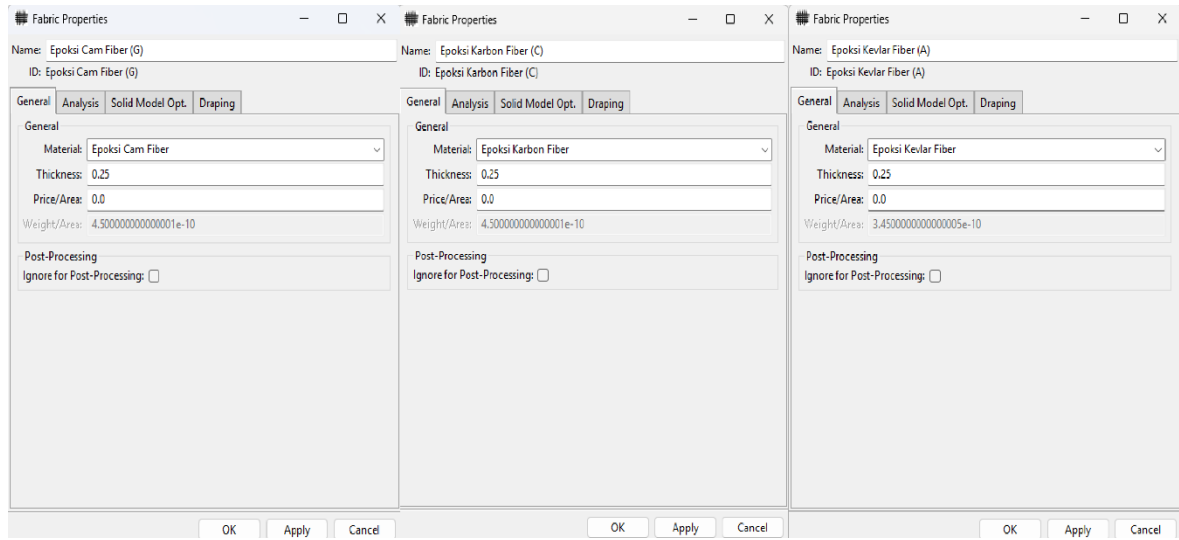
Modelleme sürecinin bu aşamasında, kompozit kaplamaların tanımlanması işlemleri ANSYS ACP (Pre) modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu modül, kompozit yapıların katman sayısı, fiber yönelimi, malzeme türü ve kalınlıklarının ayrı ayrı tanımlanmasına olanak sağlamaktadır.

5.4.1. Kompozit malzemelerin fabric (kumaş) tanımlamaları

Kompozit modellemede kullanılan malzemelerin tanımlamaları, ANSYS ACP (Pre) modülündeki *Fabric Properties* sekmesi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, kompoz Her üç kompozit malzeme için tanımlama işlemleri, Fabric Properties penceresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9’da görüldüğü üzere, Epoksi Cam Fiber (G), Epoksi Karbon Fiber (C) ve Epoksi Kevlar Fiber (A) malzemeleri aynı parametrelerle sisteme girilmiş ve

her biri için kalınlık değeri 0,25 mm olarak atanmıştır. Bu yaklaşım, tüm modeller arasında geometrik ve mekanik karşılaştırma yapılabilmesini sağlamıştır.

Ayrıca, her bir malzeme için *Price/Area* değeri sıfır alınarak ekonomik etkiler model dışında bırakılmış, analiz yalnızca mekanik performans farklarına odaklanmıştır. *Weight/Area* değeri ise otomatik olarak sistem tarafından hesaplanmış ve yalnızca malzemenin yoğunluk farkına bağlı olarak değişmiştir. Daha önce Engineering Data modülünde mekanik özellikleri tanımlanan bu kompozit malzemeler, burada *Fabric Properties* sekmesi üzerinden fiziksel parametreleriyle birlikte modellenmiştir.



a)

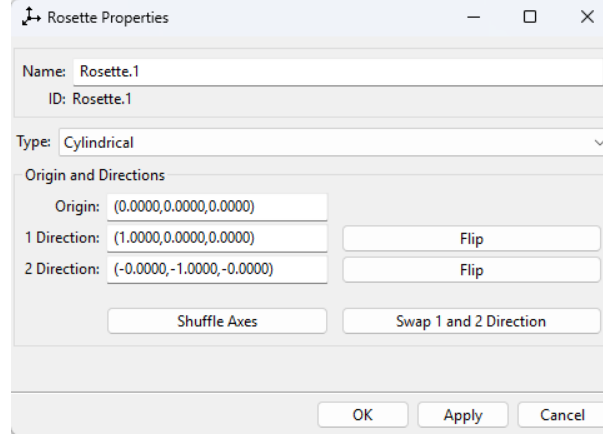
b)

c)

Şekil 5. 9 : ACP (Pre) modülünde (a)Epoksi Cam Fiber (G), (b) Epoksi Karbon Fiber (C) ve (c) Epoksi Kevlar Fiber (A) malzemelerinin *Fabric Properties* sekmesinde tanımlanması

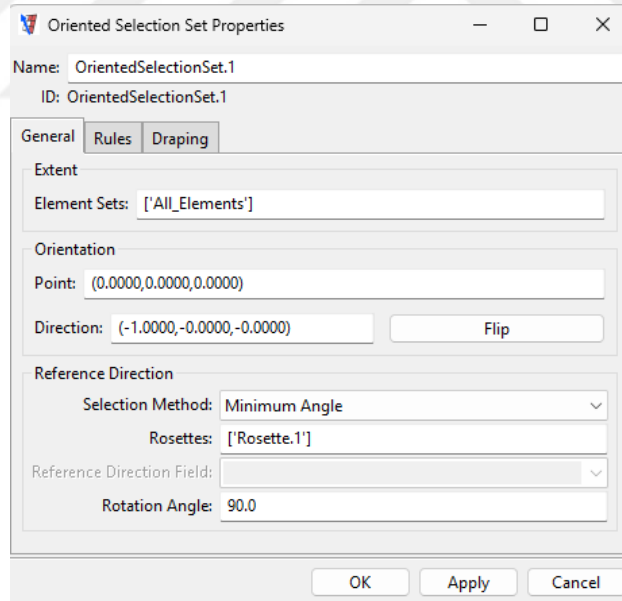
5.4.2. Rosette tanımlaması ve fiber yönelimlerinin belirlenmesi

Kompozit katmanların yönelim sistemi, ACP (Pre) modülünde oluşturulan *Rosette* yapısı üzerinden tanımlanmıştır. Rosette sistemi, kompozit fiberlerin yönelim açılarının belirlenmesi ve katman bazında anizotropik özelliklerin doğru biçimde modellenmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 5. 10 : ACP (Pre) ortamında *Rosette* (silindirik koordinat sistemi) tanımlaması.

Bu aşamada, kompozit kolonun silindirik geometrisine uygun olarak Şekil 5.10’da Cylindrical Rosette tipi seçilmiştir. Bu seçim, kolon eksenini boyunca fiberlerin açısal dağılımının koordinat sistemine göre doğru tanımlanmasını sağlamıştır. *Rosette Properties* penceresinde fiberlerin 1. ve 2. yönleri eksenel ve çevresel doğrultulara göre tanımlanmış, orijin noktası (0,0,0) alınmıştır. Böylece, fiber yönelimleri kolonun eksenel yönünü referans alacak biçimde modellenmiştir.



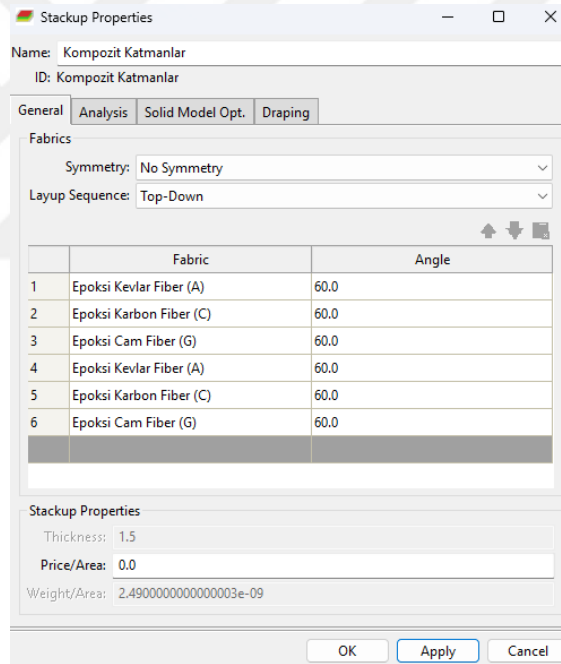
Şekil 5. 11 : ACP (Pre) modülünde *Oriented Selection Set* üzerinden fiber yönelimlerinin *Rosette* sistemine göre atanması.

Şekil 5.11’de ise *Oriented Selection Set* sekmesinde ise bu rosette sistemi, tüm elemanlara uygulanacak şekilde ilişkilendirilmiştir. *Selection Method* olarak Minimum Angle seçilmiş ve *Rotation Angle* değeri 90° olarak atanmıştır. Bu tanımlama, fiber yönelimlerinin kuvvete göre hizalanmasını ve düzenlenmesine olanak tanımıştır.

Rosette tanımlaması sayesinde her bir kompozit katmanda fiber açılarının 0° ile 90° arasındaki farklı yönelimleri doğru biçimde modellenmiş ve analiz sürecinde anizotropik davranışın simülasyona yansıtılması sağlanmıştır.

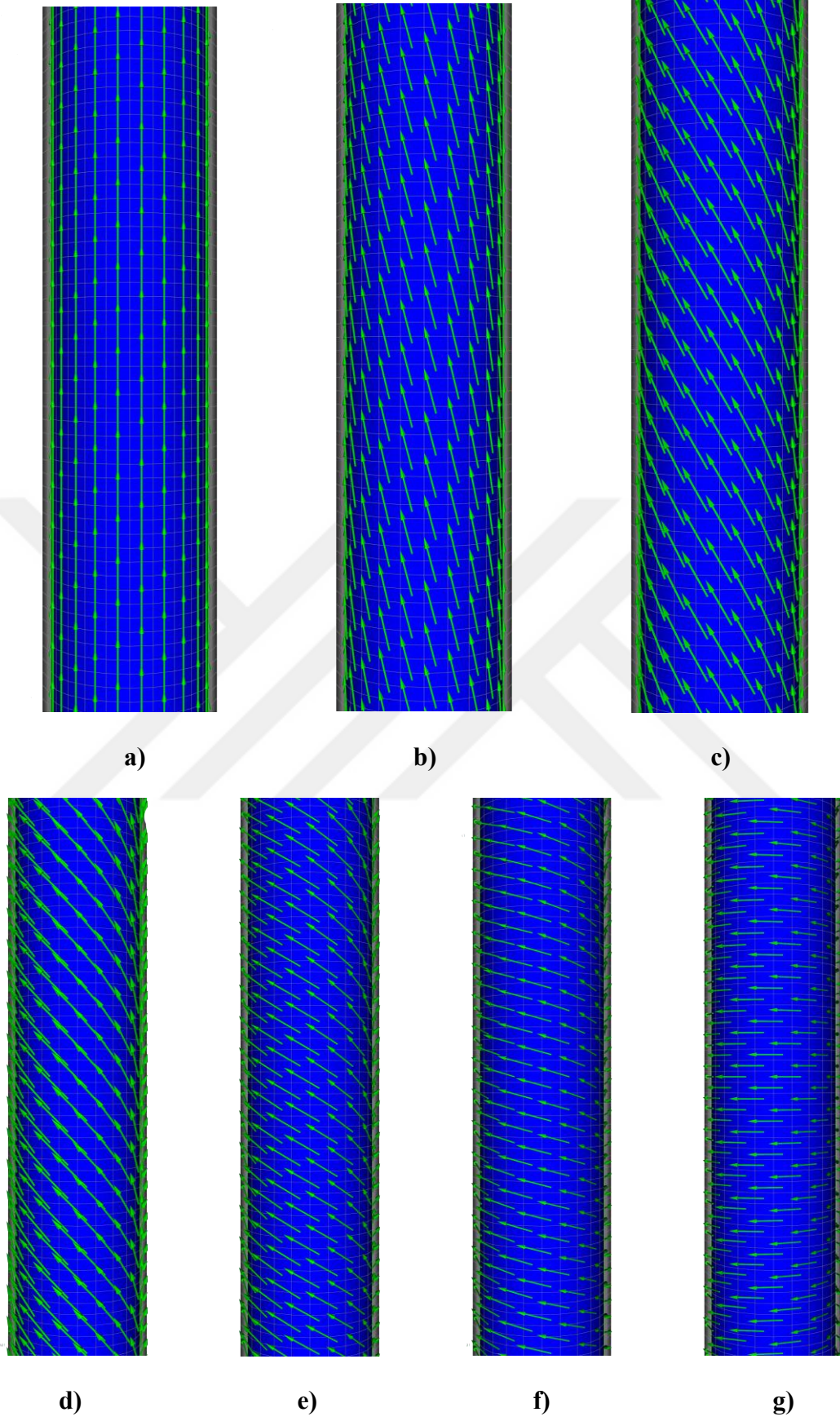
5.4.3. Stackup tanımlamaları

Kompozit yapının genel katman dizilimi ve malzeme sıralaması, Stackup Properties penceresi üzerinden tanımlanmıştır. Bu bölümde, modelde kullanılacak tüm fiber katmanlar belirli bir düzen içinde sıralanır ve her katman için malzeme türü, kalınlık ve yerleşim yönü tanımlanır. Böylece kompozit sistemin genel yapısı oluşturulur ve analiz sürecinde katmanlar arasındaki etkileşim doğru biçimde modellenir. Stackup tanımlamaları, kompozit kaplamanın toplam kalınlığını, malzeme kombinasyonlarını ve yapısal davranışın temelini belirleyen en önemli adımlardan biridir.



Şekil 5. 12 : ACP (Pre) modülünde hibrit kompozit kaplamaya ait *Stackup Properties* penceresi görünümü.

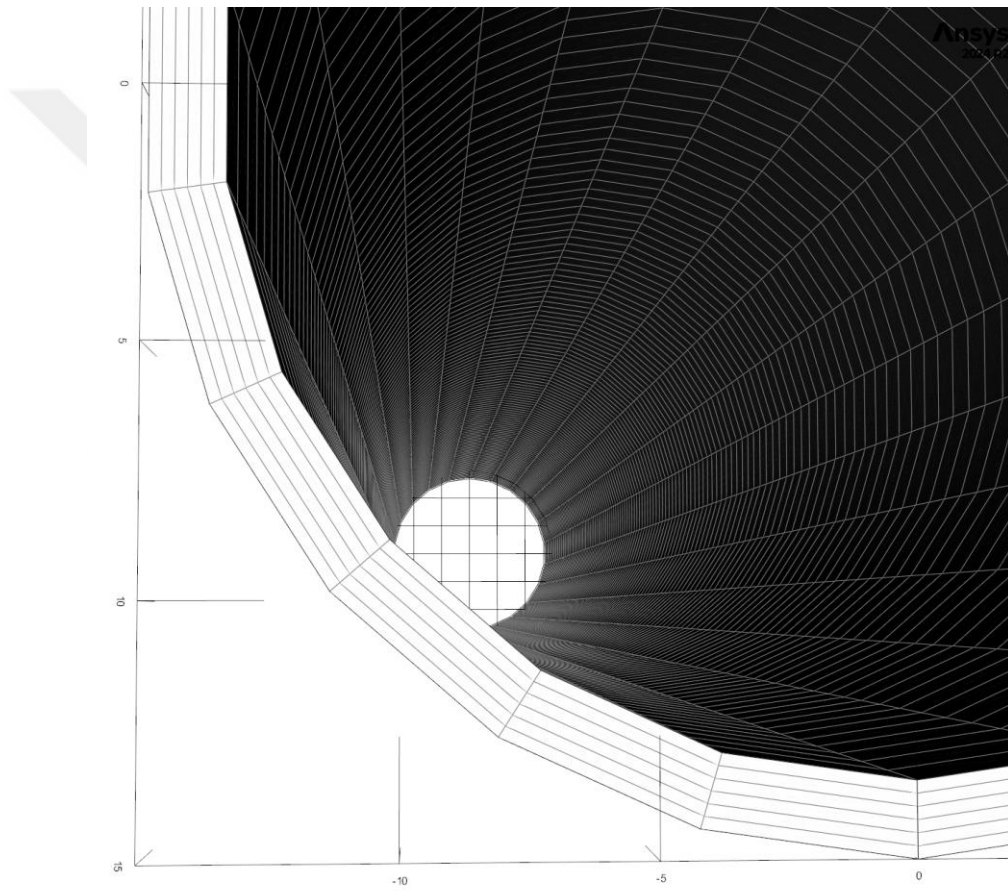
Stackup Properties penceresinin işlevi, kompozit yapıdaki tüm katmanların bir arada yönetilmesini sağlamaktır. Şekil 5.12’de verilen bu arayüz, farklı fiber malzemelerin bir arada kullanılabildiği hibrit kompozit sistemlerde katman sırasının, kalınlık değerlerinin ve simetri seçeneklerinin kolayca kontrol edilmesine imkân tanır. Bu sayede modelin genel kompozit yapısı tek bir merkezden düzenlenir, malzeme ve yönelim bilgileri tutarlı bir şekilde analiz modülüne aktarılır.



Şekil 5. 13 : ACP (Pre) modülünde kompozit yapının kuvvet eksenine göre (a) 0° , (b) 15° , (c) 30° , (d) 45° , (e) 60° , (f) 75° ve (g) 90° fiber yönelim açıları.

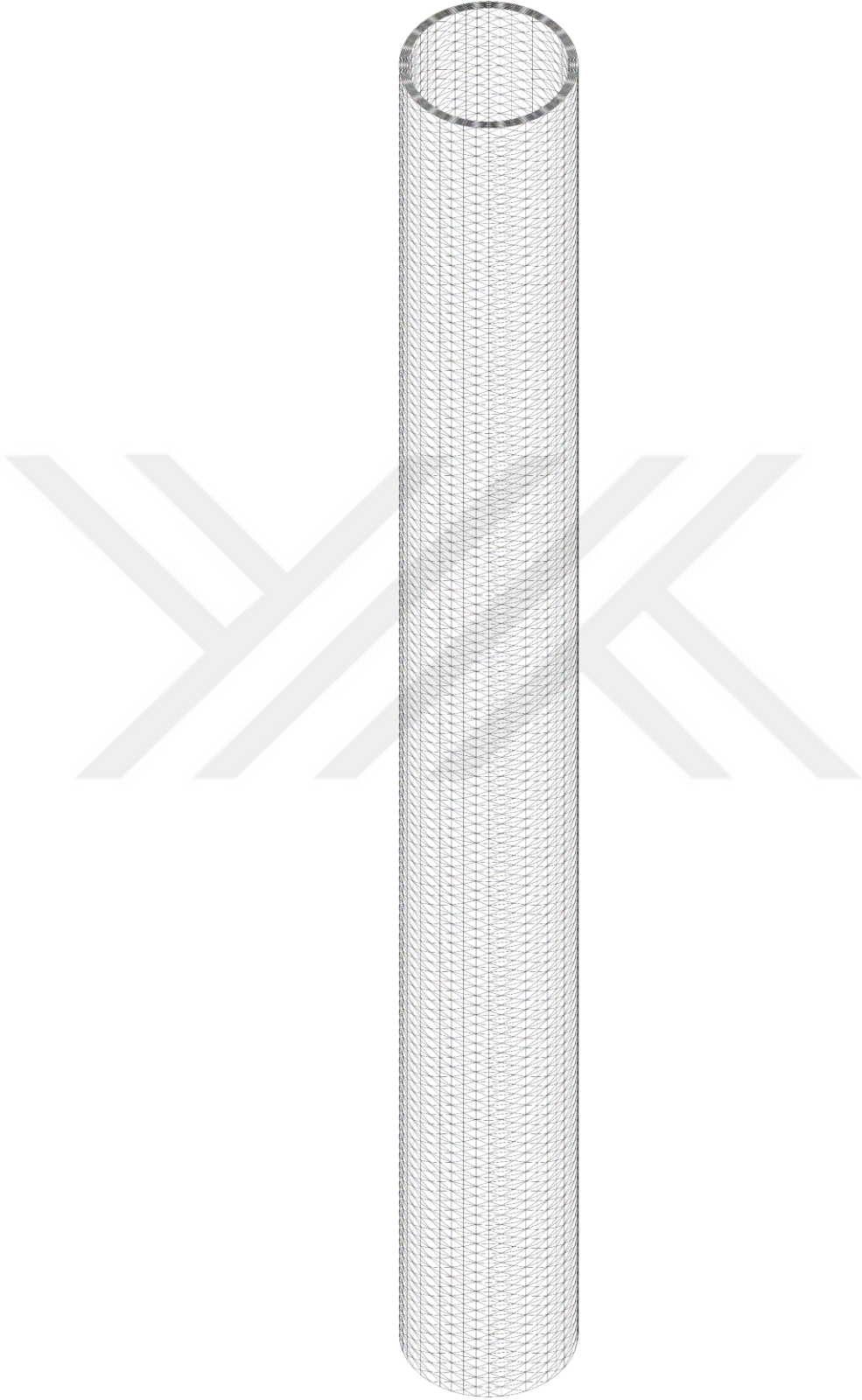
Bu tanımlamaların ardından “Create Ply After” komutu kullanılarak toplam altı katmandan (6 ply) oluşan bir kompozit yapı oluşturulmuştur. Katmanların fiber yönelim açıları sırasıyla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, fiber yöneliminin kolonun burkulma dayanımı üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak inceleyebilmek amacıyla kullanılmıştır.

Şekil 5.13'te bu altı katmanlı yapının fiber yönelimleri genel görünümü verilmiştir. Her katman farklı fiber yönelimiyle modellenmiş olup, açıları eksenel yüke göre düzenlenmiştir. Böylece kompozit kolonun burkulma davranışı, fiber açısına bağlı olarak değişen rijitlik etkileriyle birlikte detaylı biçimde analiz edilebilmiştir.

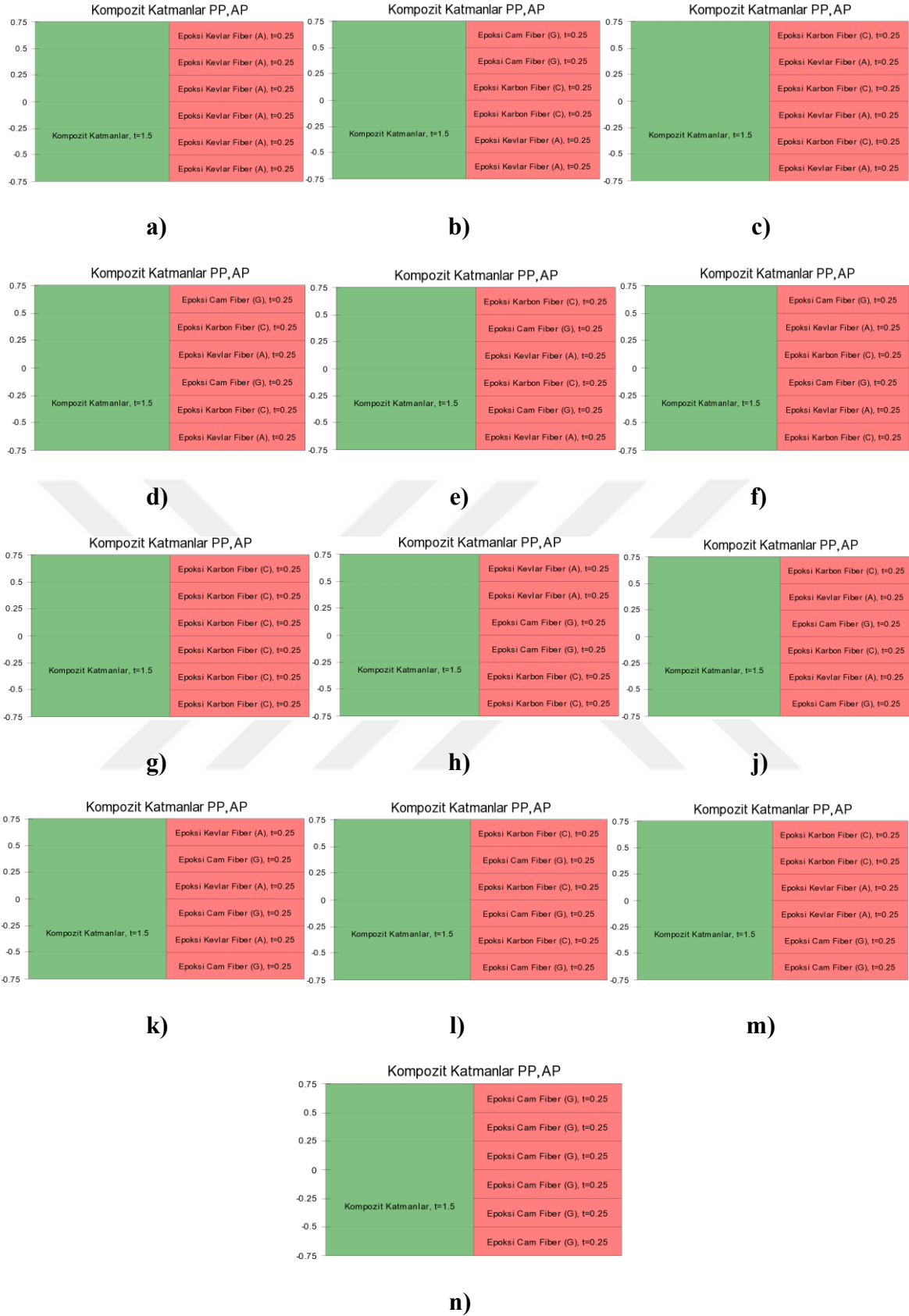


Şekil 5. 14 : ACP (Pre) modülünde kompozit kaplama görünümü.

Şekil 5.14'te ACP (Pre) modülünde oluşturulan kompozit kaplamanın Şekil 5.15'de çizgisel görünümü verilmiştir. Görüntüde kolonun dış yüzeyine uygulanan altı kompozit katmanın, silindirik geometriye uygun biçimde homojen ve düzgün bir şekilde yerleştirildiği görülmektedir. Şekil 5.16'da verilen kompozit malzeme tabaka modellerinde görüldüğü gibi katman 0,25 mm kalınlıkta olacak şekilde modellenmiş ve dış kaplamanın toplam kalınlığı 1.5 mm olarak elde edilmiştir.



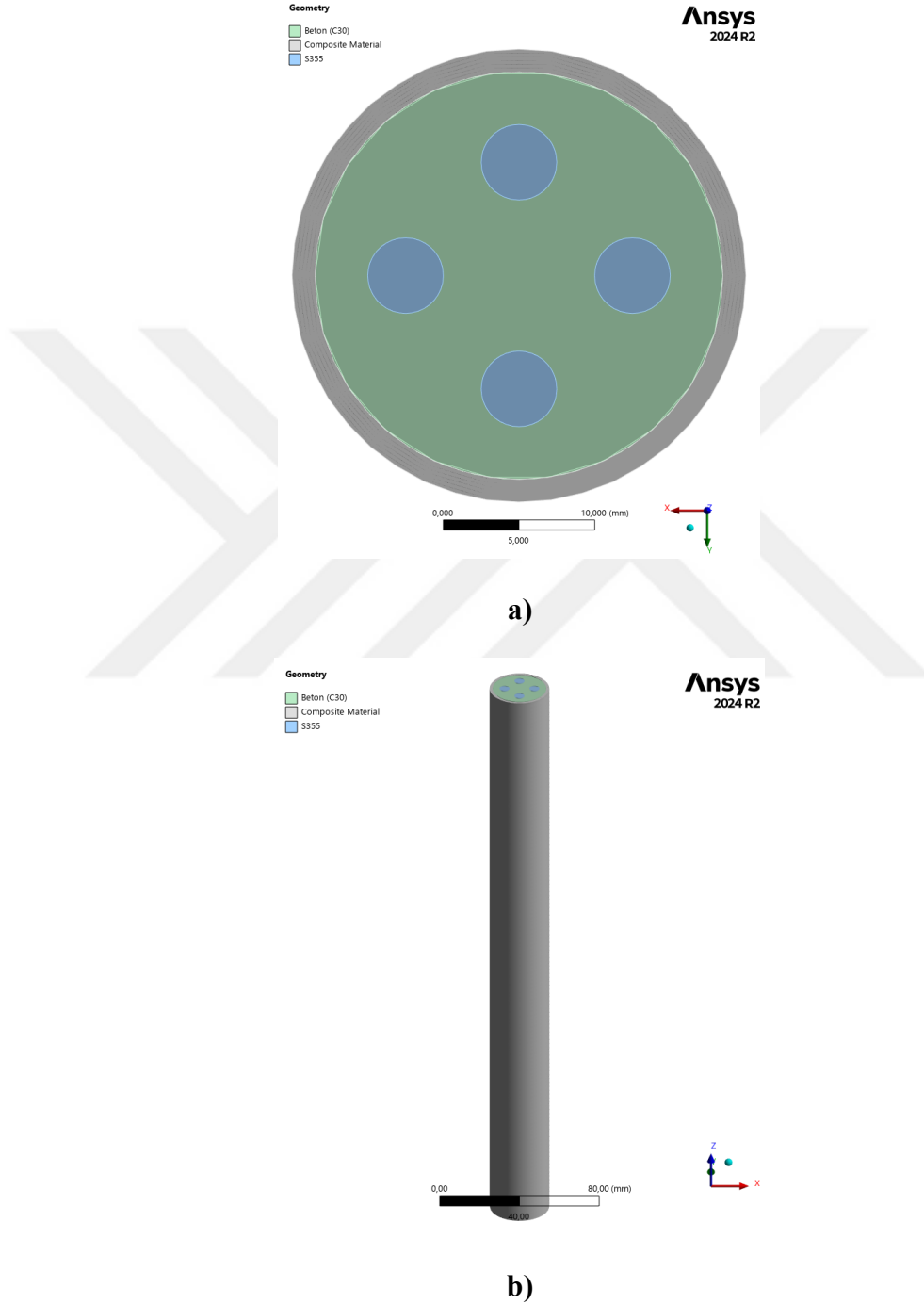
Şekil 5. 15 : Kompozit kaplamanın çizgisel görünümü.



Şekil 5. 16 : (a) AAAAAA, (b) AACCGG, (c) ACACAC, (d) ACGACG, (e) AGCAGC, (f) CAGCAG, (g) CCCCCC, (h) CCGGAA, (j) GACGAC, (k) GAGAGA, (l) GCGCGC, (m) GGAACC, (n) GGGGGG kompozit malzeme tabaka modelleri.

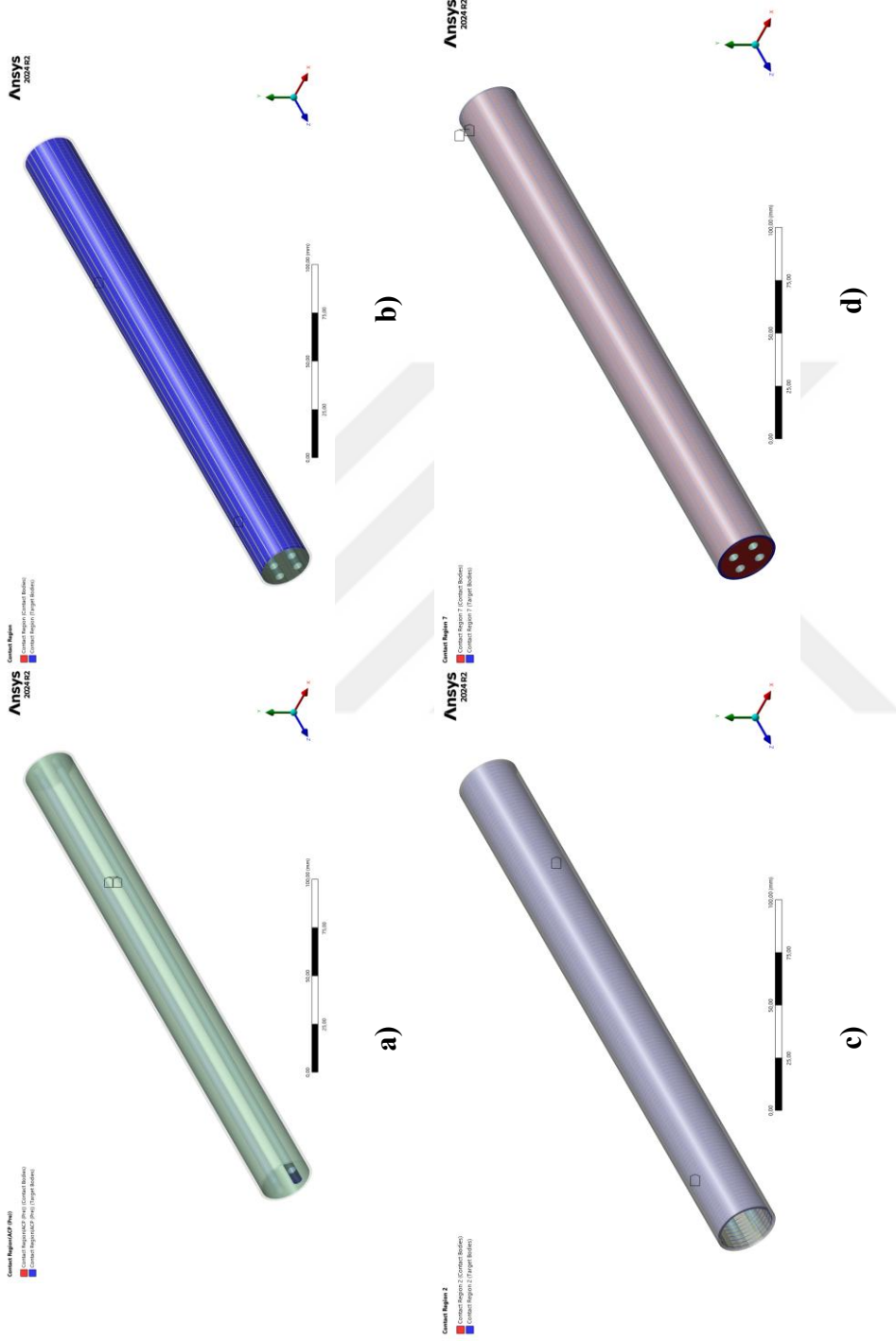
5.5. Statik Yapısal Analiz (Static Structural) – Sınır Şartları ve Analiz

ACP (Pre) modülünde tanımlanan çok katmanlı hibrit kompozit kaplama, beton çekirdek ve S355 çelik donatıları içeren model, Static Structural modülüne aktarılmıştır. Şekil 5.17’de görüldüğü üzere model;



Şekil 5. 17 : Hibrit kompozit kolonun üç boyutlu görünümü (Beton çekirdek yeşil), S355 donatılar(mavi) ve kompozit kaplama(gri) , (a) üstten bakış (b) izometrik görünüm.

5.5.1 Bağlantılar



Şekil 5. 18 : Modelde tanımlanan temas bölgeleri ve bileşenler arası bağlantı ilişkileri (a) C30 beton iler S355 donatı arası bağlantı, (b) hayali yüzey ile C30 beton arasındaki bağlantı, (c) Hayali yüzey ile kompozit kaplama arasındaki bağlantı, (d) C30 beton ile kompozit kaplama arasındaki çoklu yüzey kontaktları.

Modeldeki tüm bileşenler arasındaki temas ilişkileri Connections sekmesi altında tanımlanmış ve Şekil 5.18’de görülen bağlatılar ANSYS tarafından otomatik olarak algılanmıştır. Çekirdek içindeki S355 donatı çubukları ile C30 beton arasında tam bağlantı oluşturulmuştur. Beton çekirdeğin dış yüzeyine eklenen hayali yüzey (ACP Pre), betonla program kontrollü bir şekilde bağlanmış; aynı hayali yüzey aynı zamanda kompozit kaplama için temel temas yüzeyi olarak kullanılmıştır. Bu bağlantı düzeni sayesinde, donatı, beton çekirdek, hayali yüzey ve kompozit kaplamalar arasında yük aktarımı ve rijitlik sürekliliği eksiksiz biçimde sağlanmıştır.

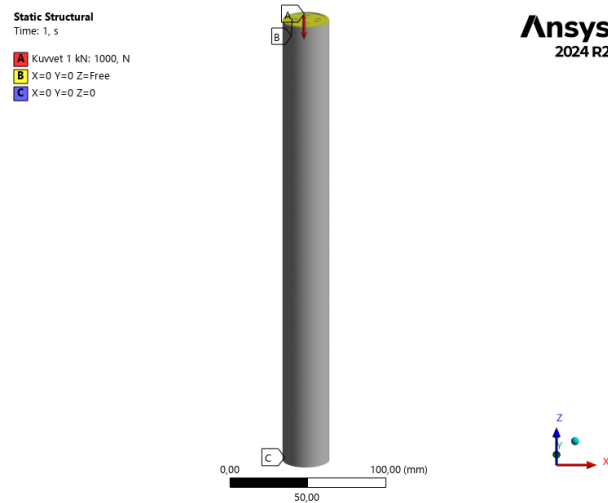
5.5.2 Sınır şartları

Modelin sınır şartları Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Kolon modeli Z eksenini boyunca uzunlamasına konumlandırılmış olup, eksenel basınç yükü altında davranışı incelenmiştir.

Alt yüzey (C bölgesi): Kolonun taban kısmı tamamen sabitlenmiş (*Fixed Support*) olup, X, Y ve Z yönlerindeki tüm yer değiştirme ve dönme serbestlikleri kısıtlanmıştır. Böylece taban bölgesi, rijit bir mesnet koşulu altında tutulmuştur.

Üst yüzey (A bölgesi): Kolonun üst yüzeyine Z eksenini yönünde ($-Z$) olmak üzere 1 kN’luk basınç kuvveti uygulanmıştır. Bu yük, kolonun eksenel yönde sıkıştırılması amacıyla tanımlanmıştır.

Yük uygulama noktası (B bölgesi): Bu noktada X ve Y yönleri kısıtlanmış, ancak Z yönü serbest bırakılmıştır. Böylece yük uygulanan bölgenin yukarı-aşağı hareketine izin verilmiş, dönme serbestliği sağlanmış ve pimli bir mesnet oluşturulmuştur.

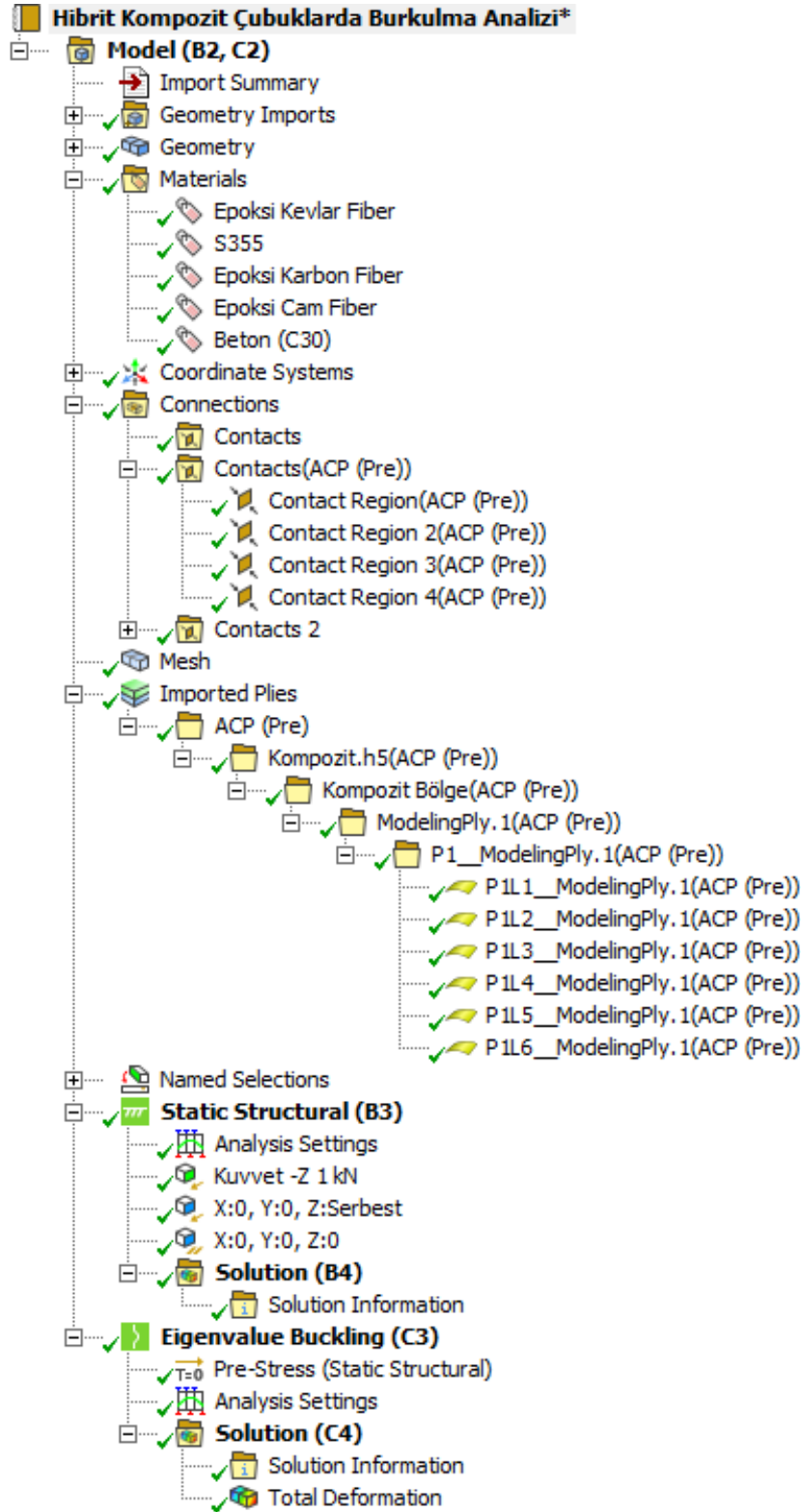


Şekil 5. 19 : Statik yapısal analizde tanımlanan sınır şartları ve yükleme durumu.

5.5.3 Analiz adımları ve analiz akışı

Sınır şartlarının tanımlanmasının ardından modelin çözümü gerçekleştirilmiş ve Static Structural analiz tamamlandıktan sonra sistemin burkulma davranışını incelemek amacıyla Eigenvalue Buckling analizi yapılmıştır. Bu analiz, modelin ilk burkulma moduna karşılık gelen kritik yükü ve mod şekillerini belirlemek için uygulanmıştır. Çözüm aşamasında Solution kısmına *Total Deformation* analizi eklenmiş ve eksenel basınç altında oluşan yer değiştirmeler incelenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen Total Deformation konturları üzerinden kolonun genel deformasyon eğilimi değerlendirilmiş, ayrıca *Total Deformation* sonucu içerisindeki Load Multiplier değerine bakılarak sistemlerin kritik burkulma kuvvetleri (P_{cr}) hesaplanmıştır. Böylece modelin eksenel yük altındaki stabilite davranışı sayısal olarak belirlenmiş ve burkulma dayanımı açısından değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada kompozit kolon modelinin analiz süreci ANSYS Workbench 2024 R2 ortamında yürütülmüştür. Şekil 5.20’de görüldüğü üzere analiz üç aşamadan oluşmaktadır: ACP (Pre), Static Structural ve Eigenvalue Buckling. İlk aşamada ACP (Pre) modülünde kompozit malzeme tanımları, fiber yönelimleri, katman sıraları ve mekanik özellikler belirlenmiş; model C30 beton çekirdek, dört adet S355 çelik çubuk donatı ve altı katmanlı epoksi esaslı kompozit kaplamadan oluşturulmuştur. Bu tanımlar “Imported Piles” başlığı altında ACP (Pre) modülünden Static Structural modülüne aktarılmıştır. İkinci aşamada Static Structural modülünde yükleme koşulları ve sınır şartları tanımlanmış; kolonun alt ucu sabitlenmiş, üst yüzeyine ise Z eksenine yönünde 1 kN’luk eksenel basınç kuvveti uygulanmıştır. Üçüncü aşamada Eigenvalue Buckling analizi gerçekleştirilmiş, Static Structural çözümünden elde edilen ön-gerilme durumu bu modüle aktarılmıştır. Bu adımda modelin burkulma davranışı değerlendirilmiş, Total Deformation sonuçları ve içerdikleri Load Multiplier değerleri üzerinden sistemin kritik burkulma kuvvetleri belirlenmiştir.

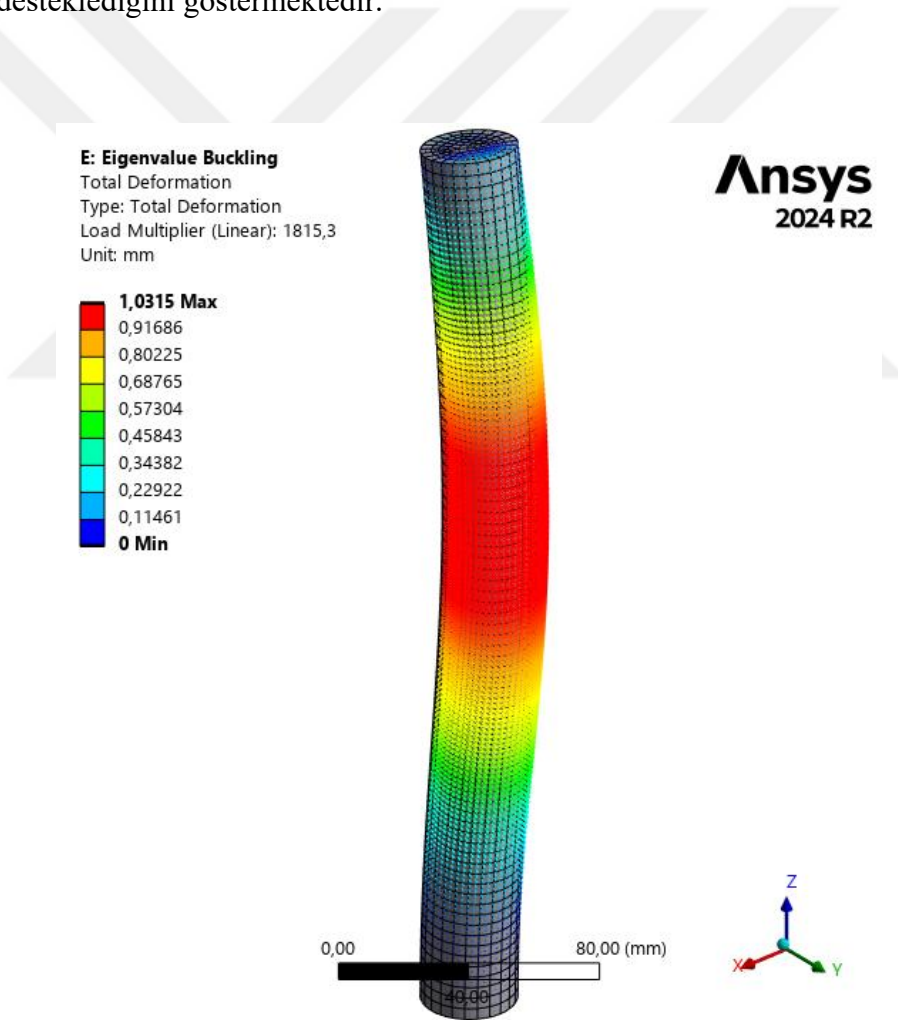


Şekil 5. 20 : *ACP (Pre), Static Structural ve Eigenvalue Buckling* modülleri arasındaki bağlantı ve analiz akışı.

5.6. Modellemenin Doğruluğunun Değerlendirilmesi

Modellemenin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla, Şekil 5.21’de, çapı 30 mm ve uzunluğu 300 mm olan S355 yapı çeliğinden çubuğun Eigenvalue Buckling analizi sonucu elde edilen birinci burkulma modu görülmektedir. Analiz sonucunda, sol üst kısımda yer alan Load Multiplier (1815,3) değeri kullanılarak sistemin kritik burkulma kuvveti (P_{cr}) hesaplanmıştır.

Teorik Euler burkulma denklemiyle hesaplanan $P_{cr} = 1868,681$ kN değeri ile ANSYS analizinden elde edilen $P_{cr} = 1815,300$ kN sonucu karşılaştırıldığında, yaklaşık %97,14 oranında bir uyum gözlemlenmiştir. Bu yüksek uyum, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin doğruluğunu ve güvenilirliğini kanıtlamakta; analitik ve sayısal yöntemlerin birbirini desteklediğini göstermektedir.



Şekil 5. 21 : S355 çelik çubuğun Eigenvalue Buckling analizinde elde edilen burkulma sonucu.

5.7. Referans Modellerin Tanımlanması

Kompozit kaplamanın burkulma dayanımına etkisini değerlendirmek amacıyla, sistemde herhangi bir kompozit tabaka içermeyen referans modeller oluşturulmuştur. Bu modeller yalnızca C30 beton çekirdek ve farklı çaplarda (3 mm, 4 mm ve 5 mm) S355 çelik donatılardan oluşmaktadır.

Referans modellerin geometrik boyutları, kompozit içeren hibrit sistemlerle birebir aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm modeller 30 mm dış çapa ve 300 mm uzunluğa sahiptir. Beton çekirdek merkezinde yer alan S355 çelik donatılar, ana eksene göre simetrik biçimde konumlandırılmıştır. Her bir donatının merkezi, kolonun ana merkezinden 15 mm uzaklıkta yer almakta olup bu düzen, hem simetriyi korumakta hem de yük aktarımının dengeli olmasını sağlamaktadır.

Bu referans modellerin oluşturulmasındaki amaç, kompozit kaplama etkisini diğer tüm parametreler sabit tutularak izole bir şekilde incelemektir. Böylece, kompozit tabakaların eklenmesinin sistemin rijitlik, stabilite ve kritik burkulma yükü (P_{cr}) üzerindeki etkisi doğrudan ve güvenilir biçimde ortaya konulmuştur. Referans modeller, kompozit kaplamalı hibrit sistemlerin performansını değerlendirmek için temel karşılaştırma unsuru olarak kullanılmıştır. Çizelge 5.3'te kompozit kaplama içermeyen referans modeller gösterilmiştir.

Çizelge 5. 3 : Referans modellerin tanımları.

Donatı Çapı	Model Kodu	Açıklama
3 mm	3R	Kompozit kaplama içermeyen, yalnızca C30 beton çekirdek ve S355 çelik donatıdan oluşan model
4 mm	4R	Kompozit kaplama içermeyen, yalnızca C30 beton çekirdek ve S355 çelik donatıdan oluşan model
5 mm	5R	Kompozit kaplama içermeyen, yalnızca C30 beton çekirdek ve S355 çelik donatıdan oluşan model

5.8. Katman Tanımı

Modelde anlaşılabilirliği ve karşılaştırma kolaylığını artırmak amacıyla katman isimleri kısaltmalarla kategorize edilmiştir. Her bir model, içerisinde kullanılan S355 donatı çapına (3 mm, 4 mm, 5 mm) göre numaralandırılmış; kompozit kaplama dizilimleri ise harflerle ifade edilmiştir. Kullanılan malzeme kısaltmaları aşağıda verilmiştir:

A: Epoksi Kevlar Fiber (Aramid)

C: Epoksi Karbon Fiber

G: Epoksi Cam Fiber

Çizelge 5.4'te, S355 donatı çapına ve katman dizilimine göre tanımlanan modellerin açıklamaları sunulmuştur.

Çizelge 5. 4 : Katman dizilimleri ve açıklamaları.

Donatı Çapı	Model Kodu	Katman Sırası (İçten→ Dışa)	Açıklama
3 mm	3AAAAAA	A-A-A-A-A-A	Tüm katmanlar Kevlar
	3CCCCC	C-C-C-C-C-C	Tüm katmanlar Karbon
	3GGGGG	G-G-G-G-G-G	Tüm katmanlar Cam
	3ACACAC	A-C-A-C-A-C	Kevlar-Karbon dizilimi, 3 kez tekrar
	3GAGAGA	G-A-G-A-G-A	Cam-Kevlar dizilimi, 3 kez tekrar
	3GCGCGC	G-C-G-C-G-C	Cam-Karbon dizilimi, 3 kez tekrar
	3AACCGG	A-A-C-C-G-G	İçte Kevlar, ortada Karbon, dışta Cam
	3ACGACG	A-C-G-A-C-G	Kevlar-Karbon-Cam dizilimi, 2 kez tekrar
	3AGCAGC	A-G-C-A-G-C	Kevlar-Cam-Karbon dizilimi, 2 kez tekrar
	3CAGCAG	C-A-G-C-A-G	Karbon-Kevlar-Cam dizilimi, 2 kez tekrar
	3CCGGAA	C-C-G-G-A-A	İçte Karbon, ortada Cam, dışta Kevlar
	3GACGAC	G-A-C-G-A-C	Cam-Kevlar-Karbon dizilimi, 2 kez tekrar
	3GGAACC	G-G-A-A-C-C	İçte Cam, ortada Kevlar, dışta Karbon
4 mm	4XXXXXX	–	4 mm S355 donatılı modeller – aynı dizilimler geçerlidir
5 mm	5XXXXXX	–	5 mm S355 donatılı modeller – aynı dizilimler geçerlidir

6. BULGULAR

Bu bölümde, hibrit kompozit kolonların burkulma davranışına ilişkin sayısal analizlerden elde edilen bulgular sunulmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen modeller, farklı kompozit katman dizilimleri (Epoksi Kevlar, Epoksi Karbon ve Epoksi Cam fiber takviyeli), fiber yönelimleri ve S355 donatı çapları (3 mm, 4 mm ve 5 mm) dikkate alınarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir.

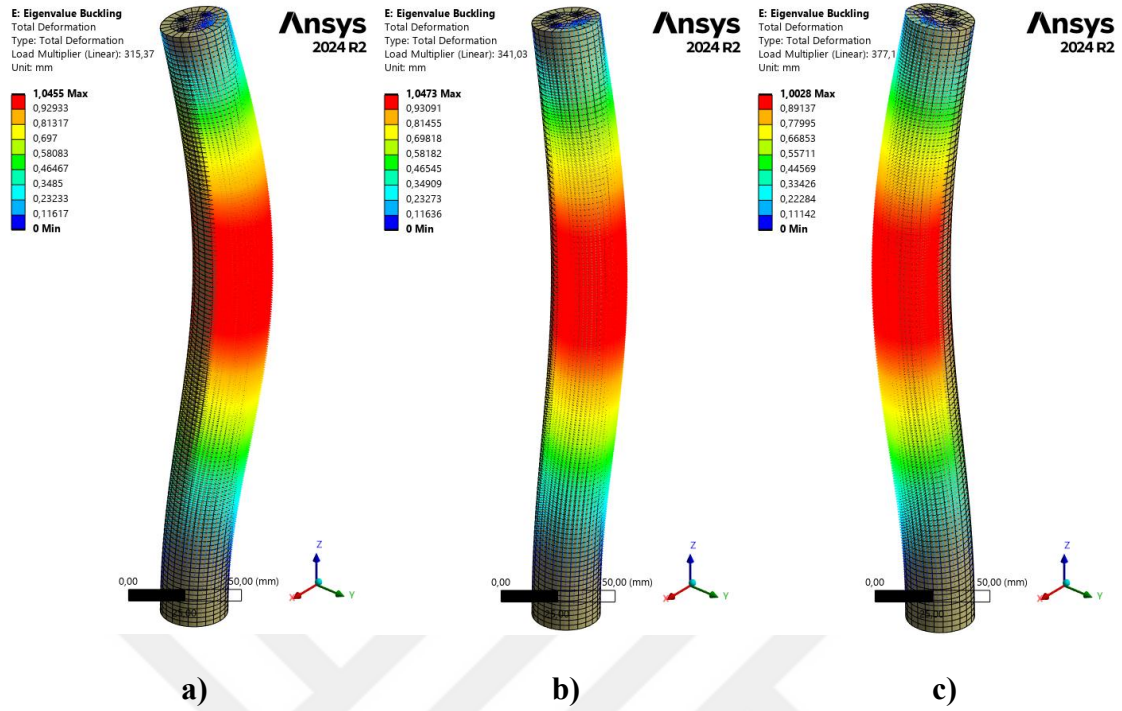
Modelleme sürecinde kolonların çekirdek geometrisi ilk olarak ANSYS Discovery ortamında oluşturulmuştur. Kompozit içeren hibrit modellerde, beton çekirdek 28,5 mm dış çapa ve 300 mm uzunluğa sahiptir. Çekirdek içerisinde, kolon eksenine göre simetrik biçimde yerleştirilen dört adet S355 çelik donatı, ana merkezden 15 mm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, yük aktarımının dengeli olmasını ve kesitte simetrinin korunmasını sağlamıştır.

Referans modeller (3R, 4R, 5R) kompozit kaplama içermemekte olup, sistemin dış çapı 30 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece, kaplamalı ve kaplamasız sistemlerin toplam geometrik boyutları eşit tutulmuş; yalnızca kompozit tabakaların varlığı ve malzeme özellikleri değişken parametre olarak ele alınmıştır.

Analizler ANSYS Workbench 2024 R2 yazılımı kullanılarak yürütülmüş; ACP (Pre) modülünde tanımlanan kompozit katman yapıları Static Structural ve Eigenvalue Buckling modüllerine aktarılmıştır. Her model için sistemin kritik burkulma yükü (P_{cr}) belirlenmiş ve bu değerler farklı kombinasyonlar için karşılaştırılmıştır.

Eigenvalue Buckling analizlerinden elde edilen mod şekilleri, Load Multiplier değerleri ve kritik burkulma kuvvetleri (P_{cr}) grafiksel olarak sunulmuştur. Farklı fiber açıları, katman dizilimleri ve donatı çaplarının sistem rijitliği üzerindeki etkileri sayısal olarak değerlendirilmiştir.

6.1 Referans Modellerin Burkulma Analizleri



Şekil 6. 1 : (a) 3R, (b) 4R, (c) 5R modellerinin burkulma analizi sonuç görüntüsü.

Yapılan Eigenvalue Buckling analizleri sonucunda elde edilen kritik burkulma kuvvetleri (P_{cr}) şu şekildedir:

3R modeli: 315,37 kN

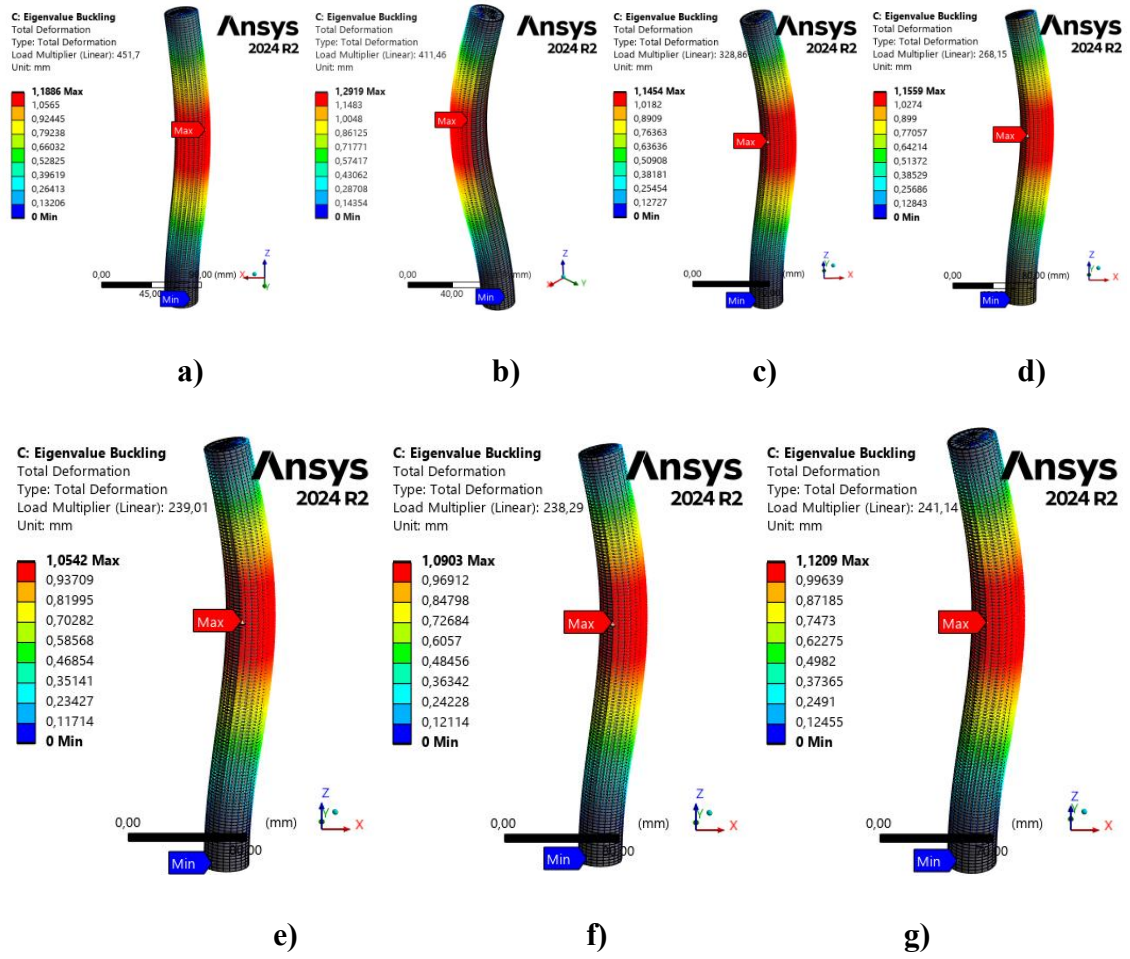
4R modeli: 341,03 kN

5R modeli: 377,1 kN

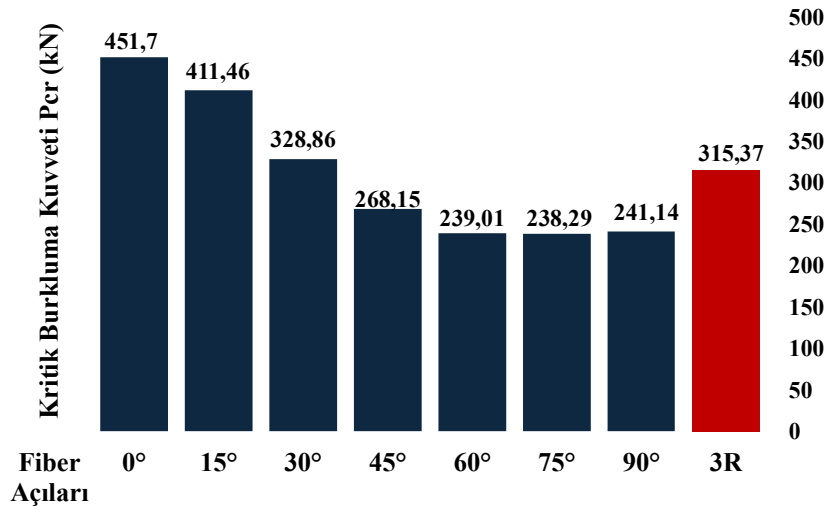
Bu değerler, donatı çapındaki artışın kolon rijitliğini artırarak burkulma dayanımını yükselttiğini göstermektedir. Elde edilen bu kritik yük değerleri, aynı donatı çapına sahip kompozit kaplamalı modeller için referans niteliği taşımakta ve hibrit kompozit sistemlerin burkulma dayanımı üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasında temel alınmaktadır.

6.2 Hibrit Kompozit Malzemelerin Burkulma Analizleri

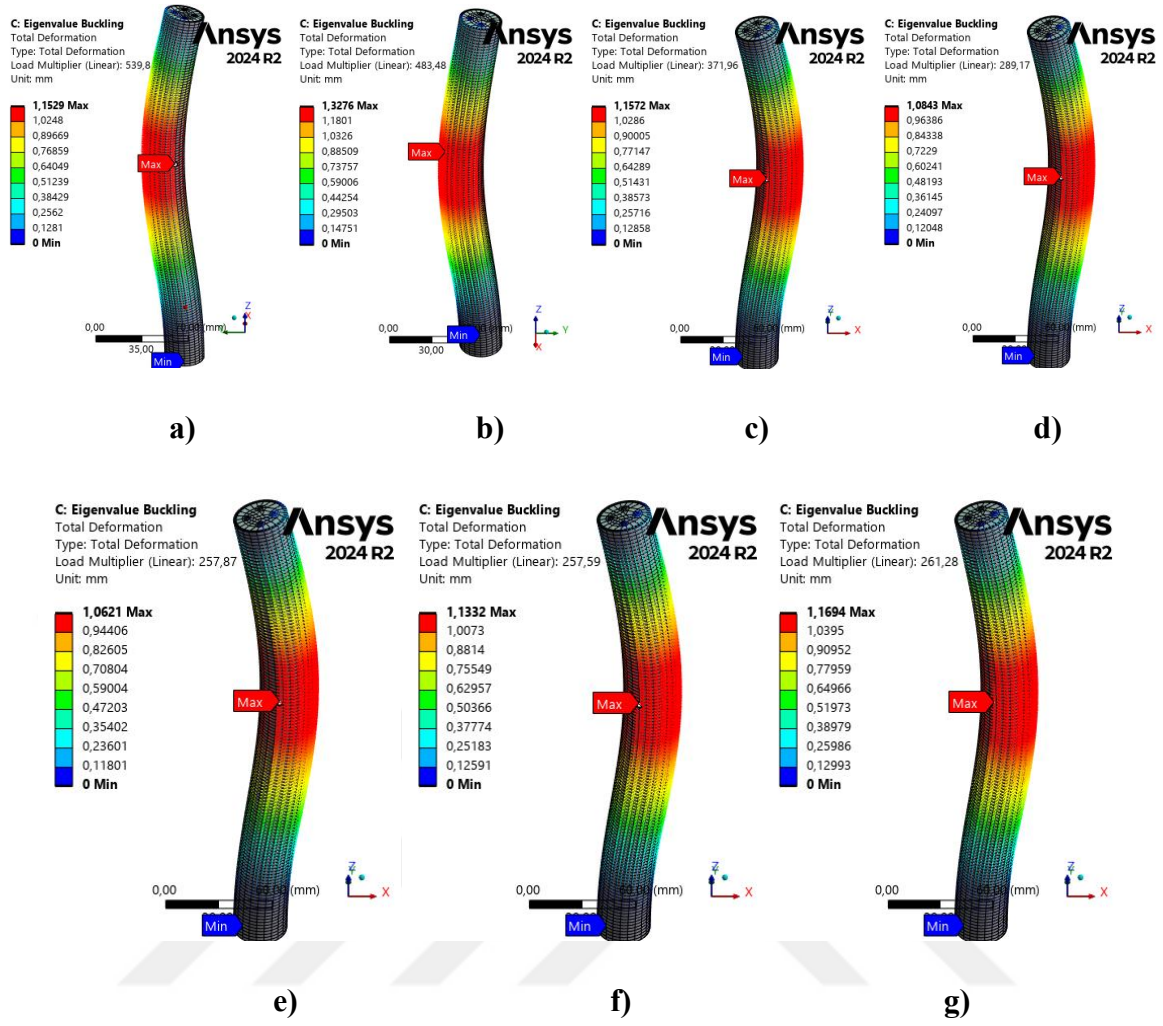
6.2.1 Donatı çapı 3 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri



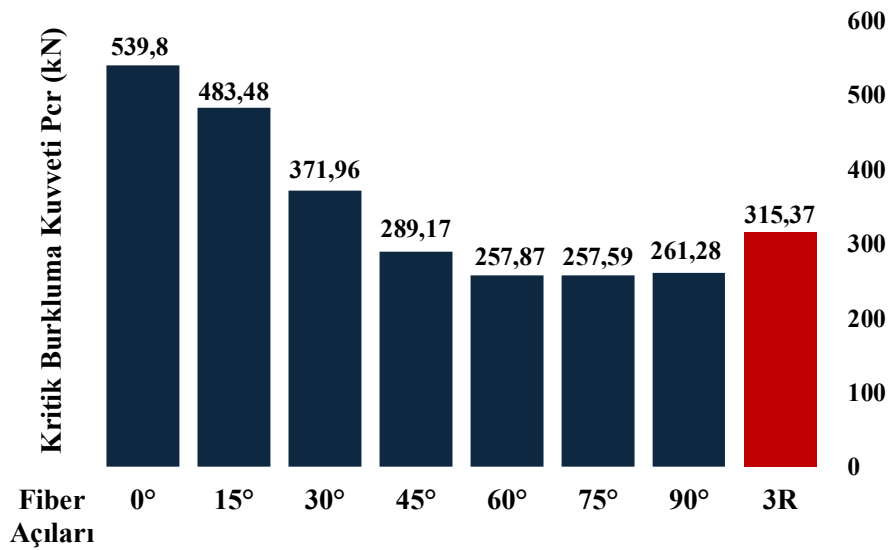
Şekil 6. 2 : 3AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



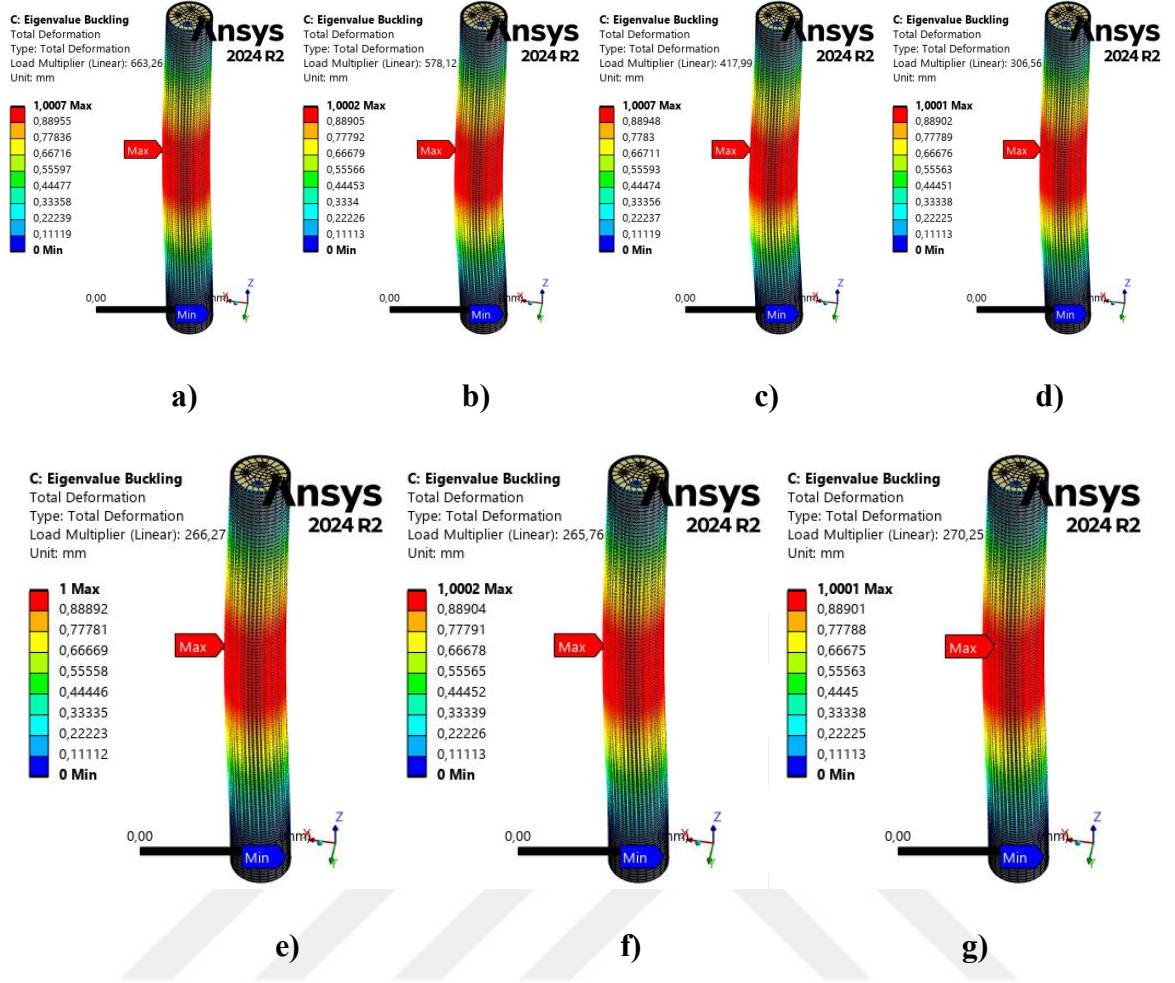
Şekil 6. 3 : 3AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



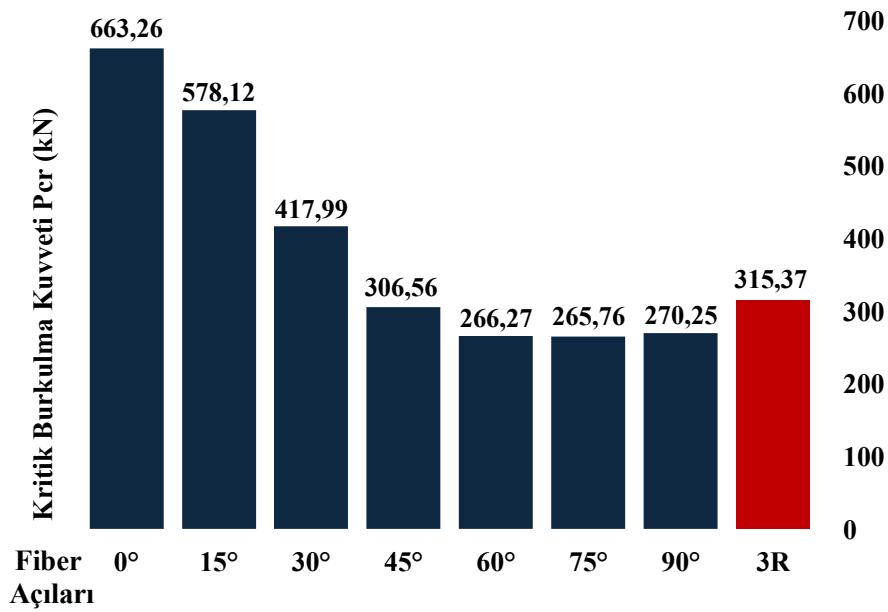
Şekil 6. 4 : 3AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



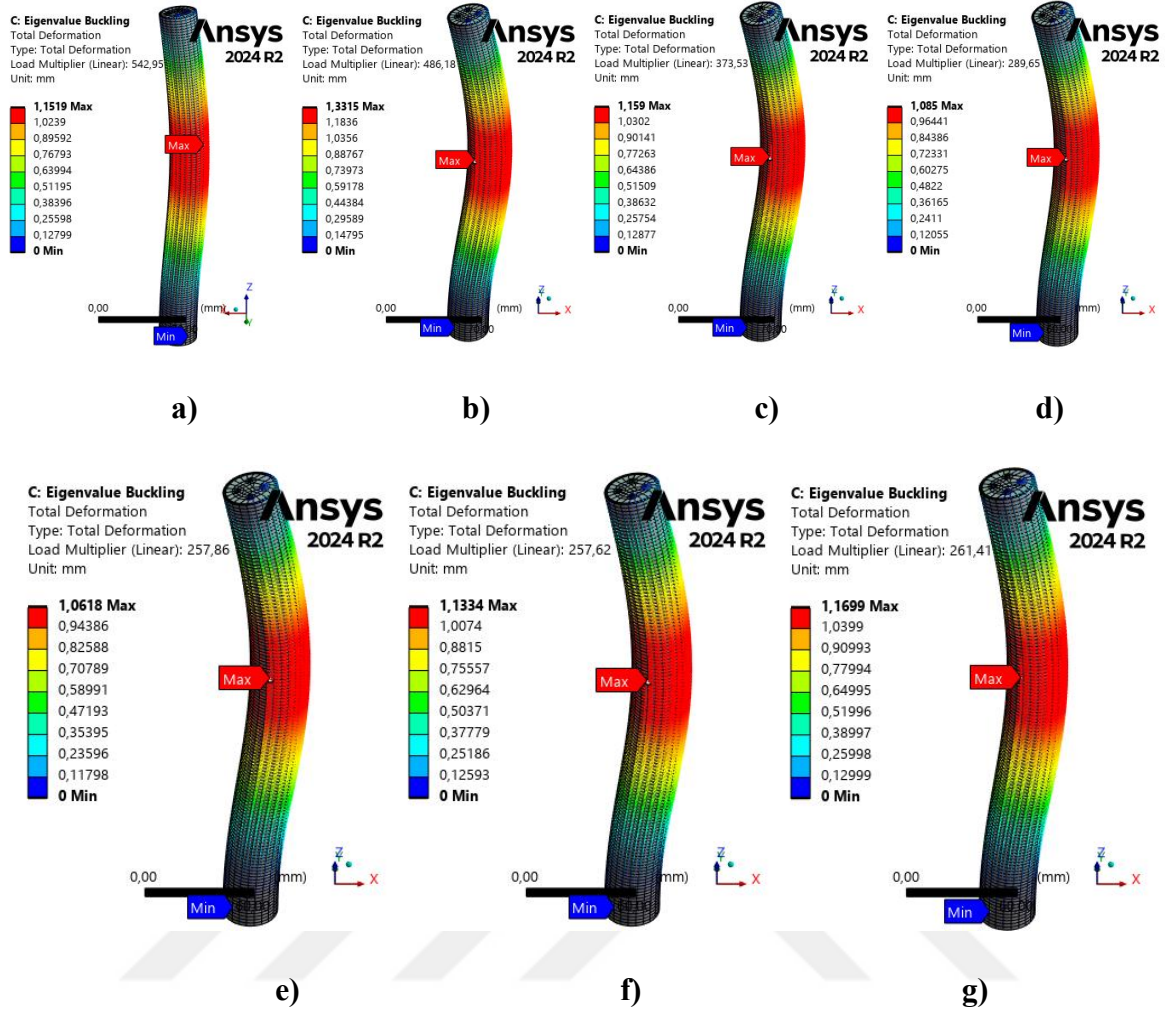
Şekil 6. 5 : 3AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



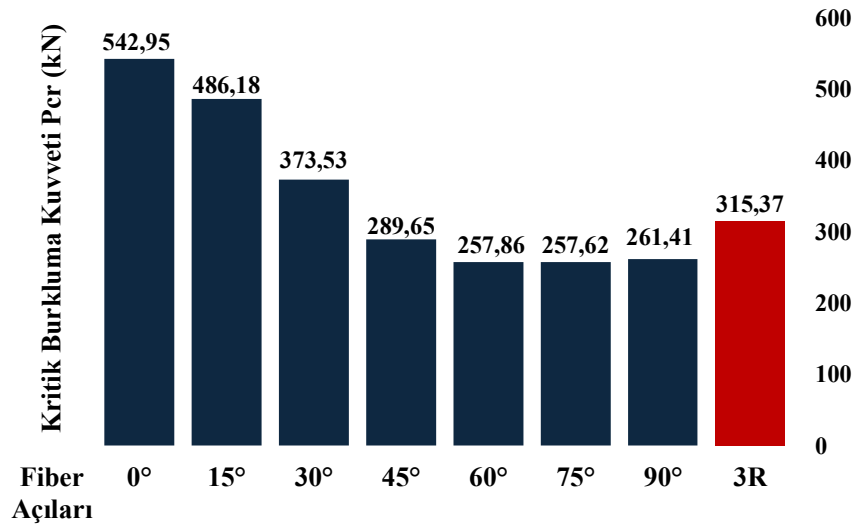
Şekil 6. 6 : 3ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



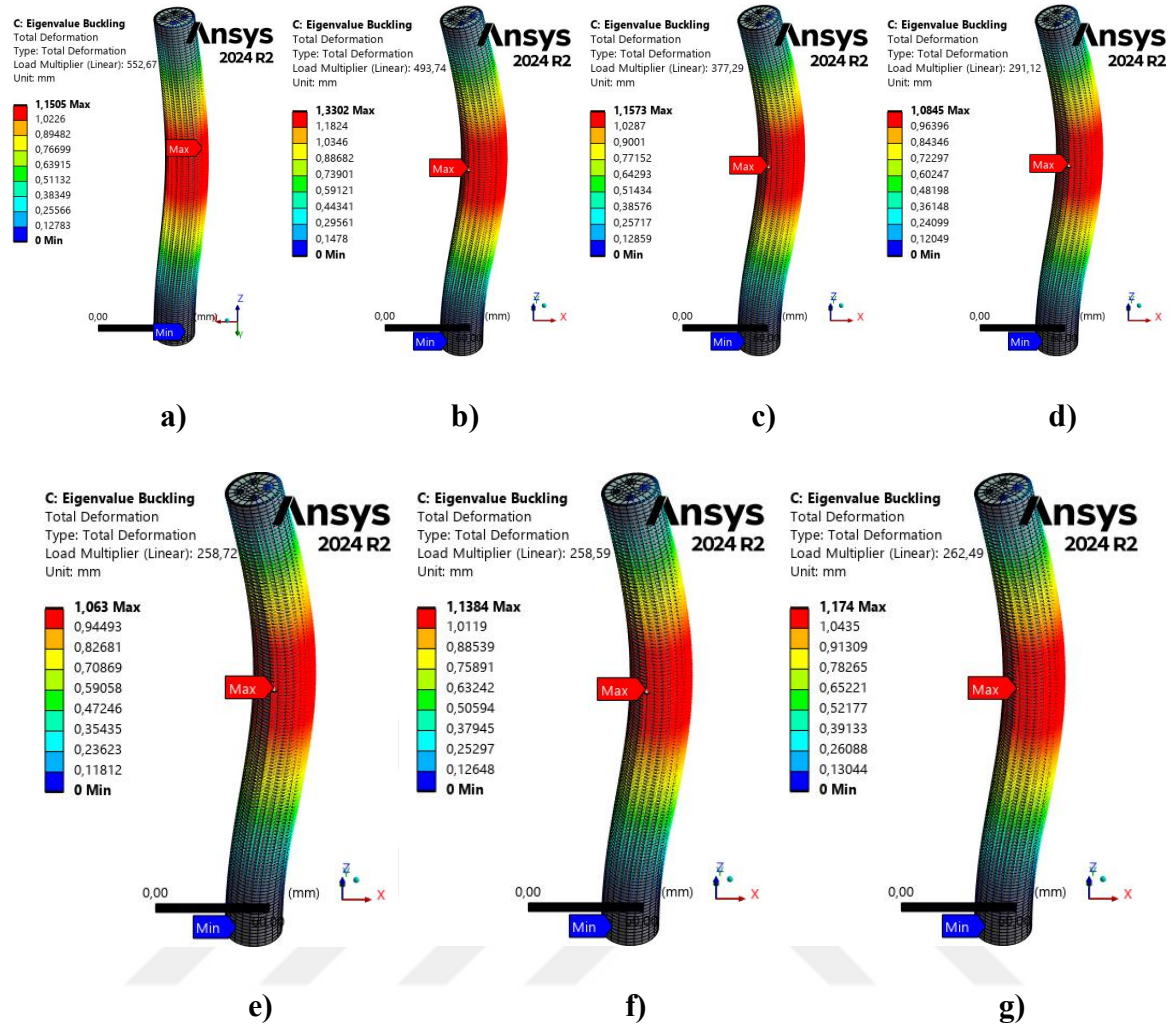
Şekil 6. 7 : 3ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



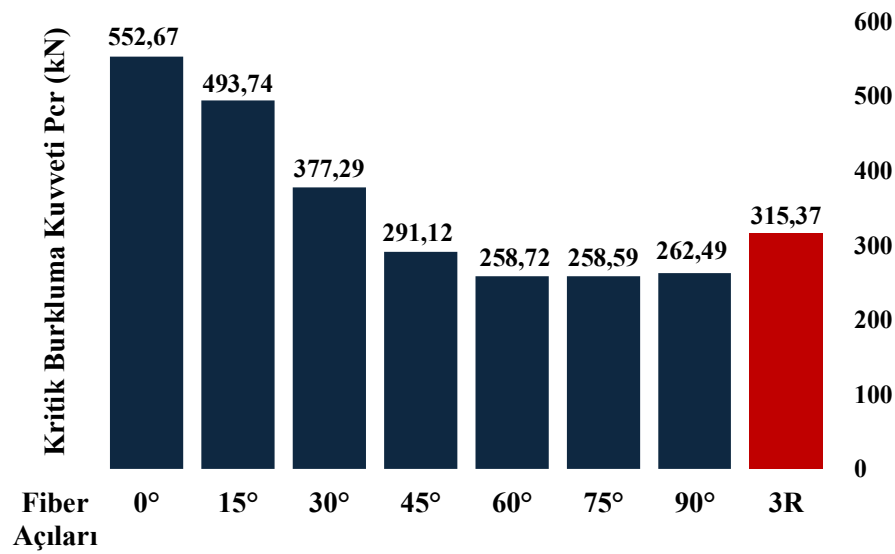
Şekil 6. 8 : 3ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



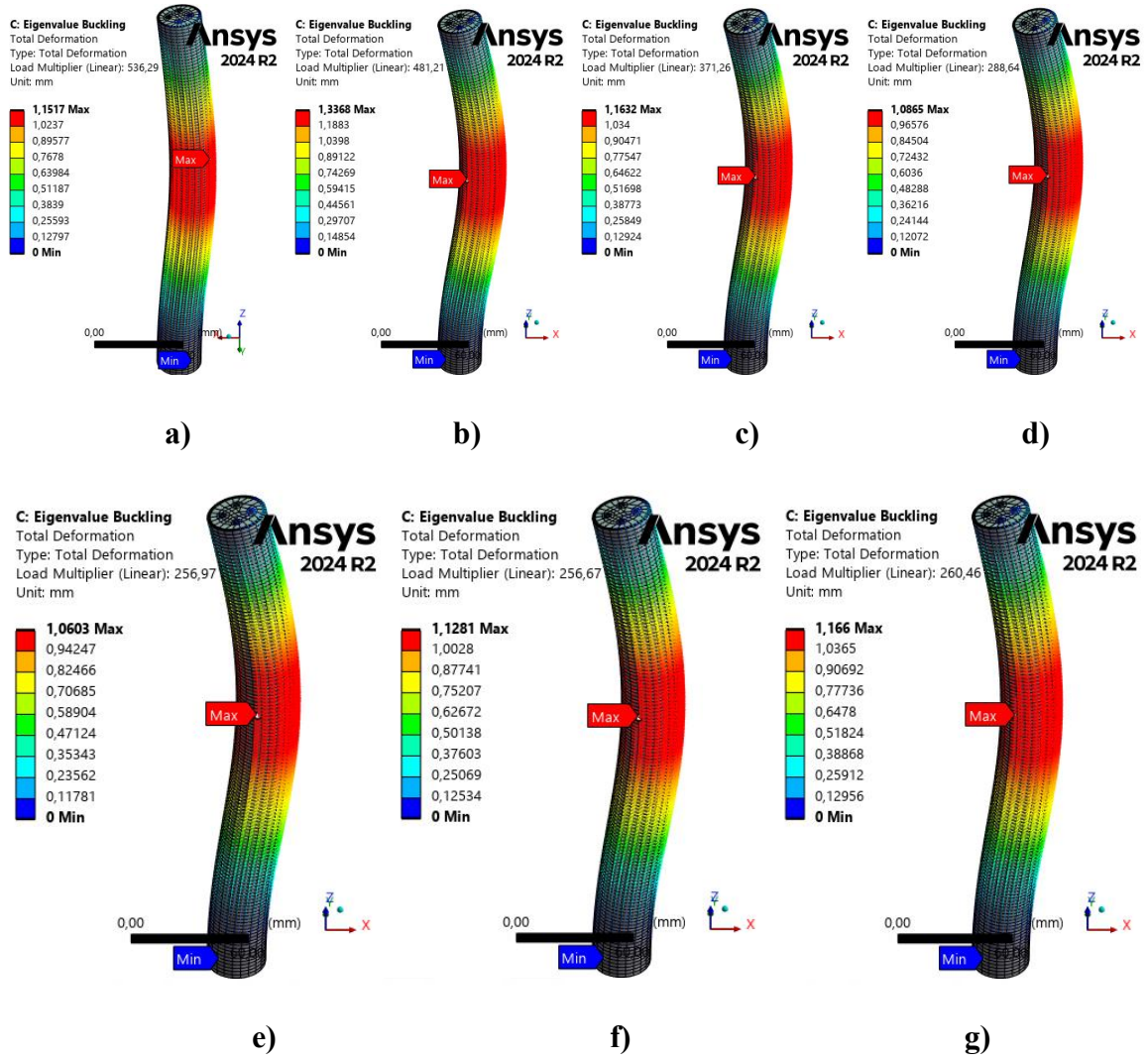
Şekil 6. 9 : 3ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



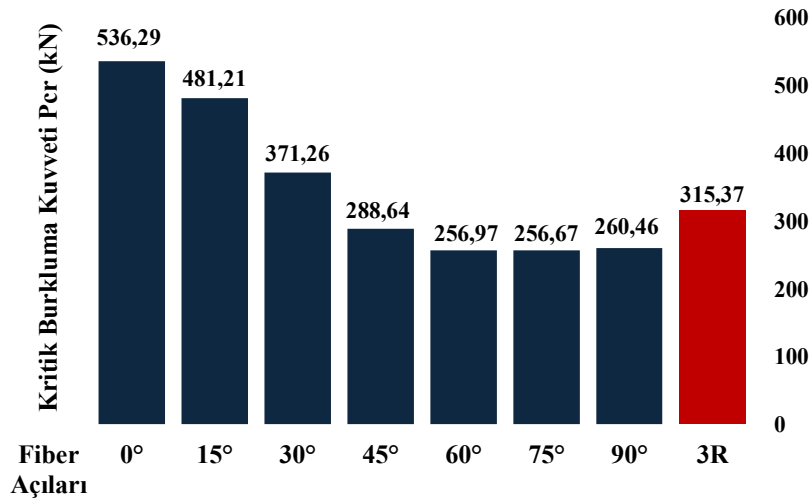
Şekil 6. 10 : 3AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



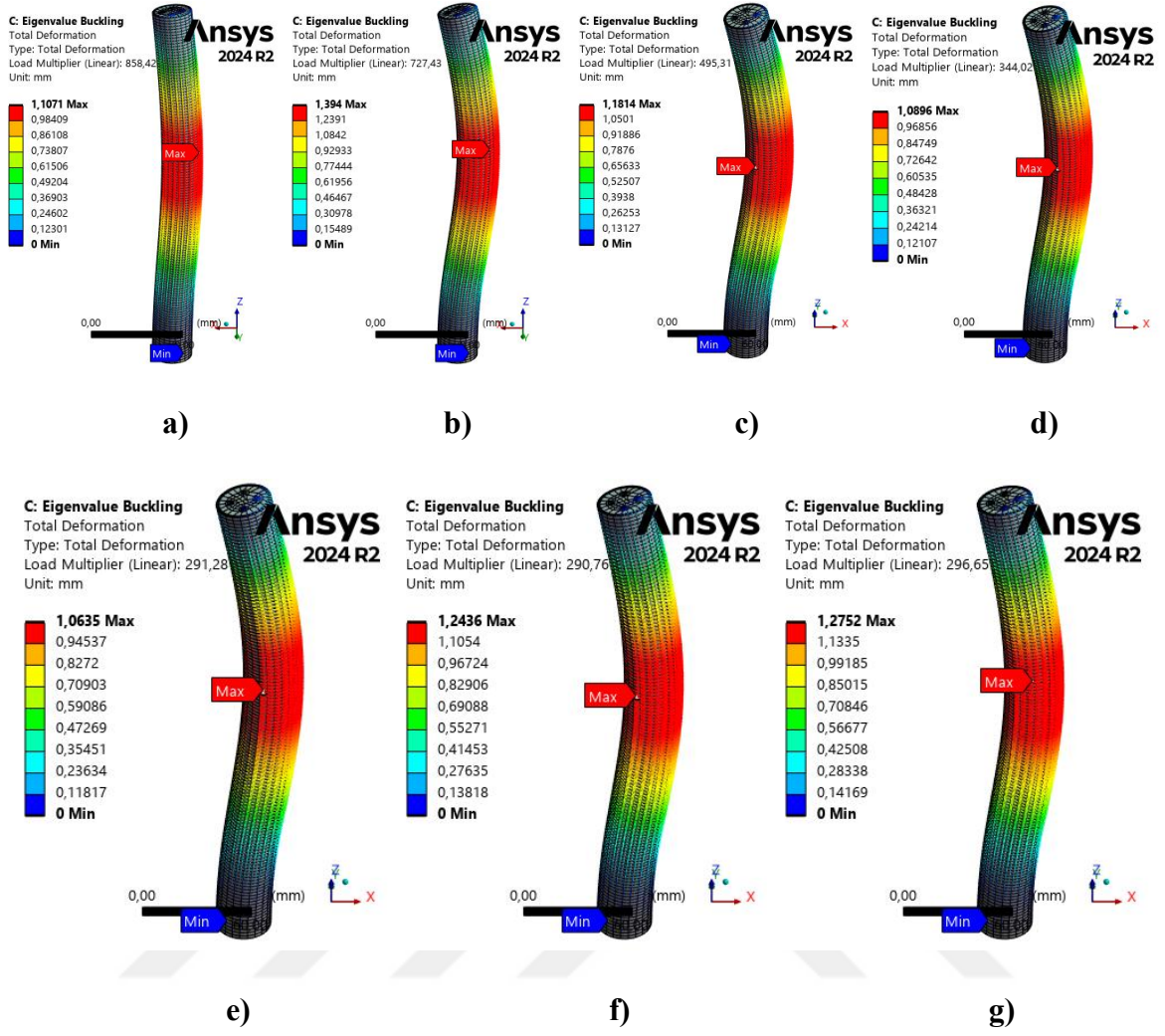
Şekil 6. 11 : 3AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



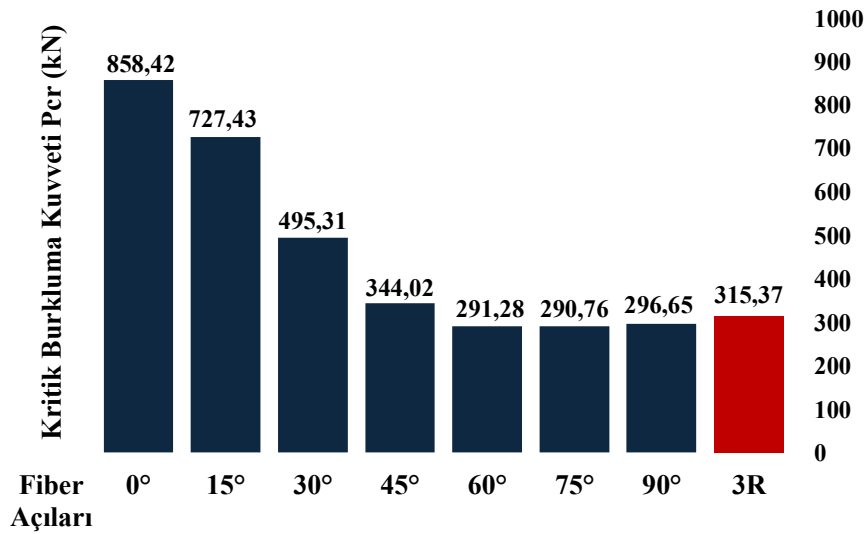
Şekil 6. 12 : 3CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



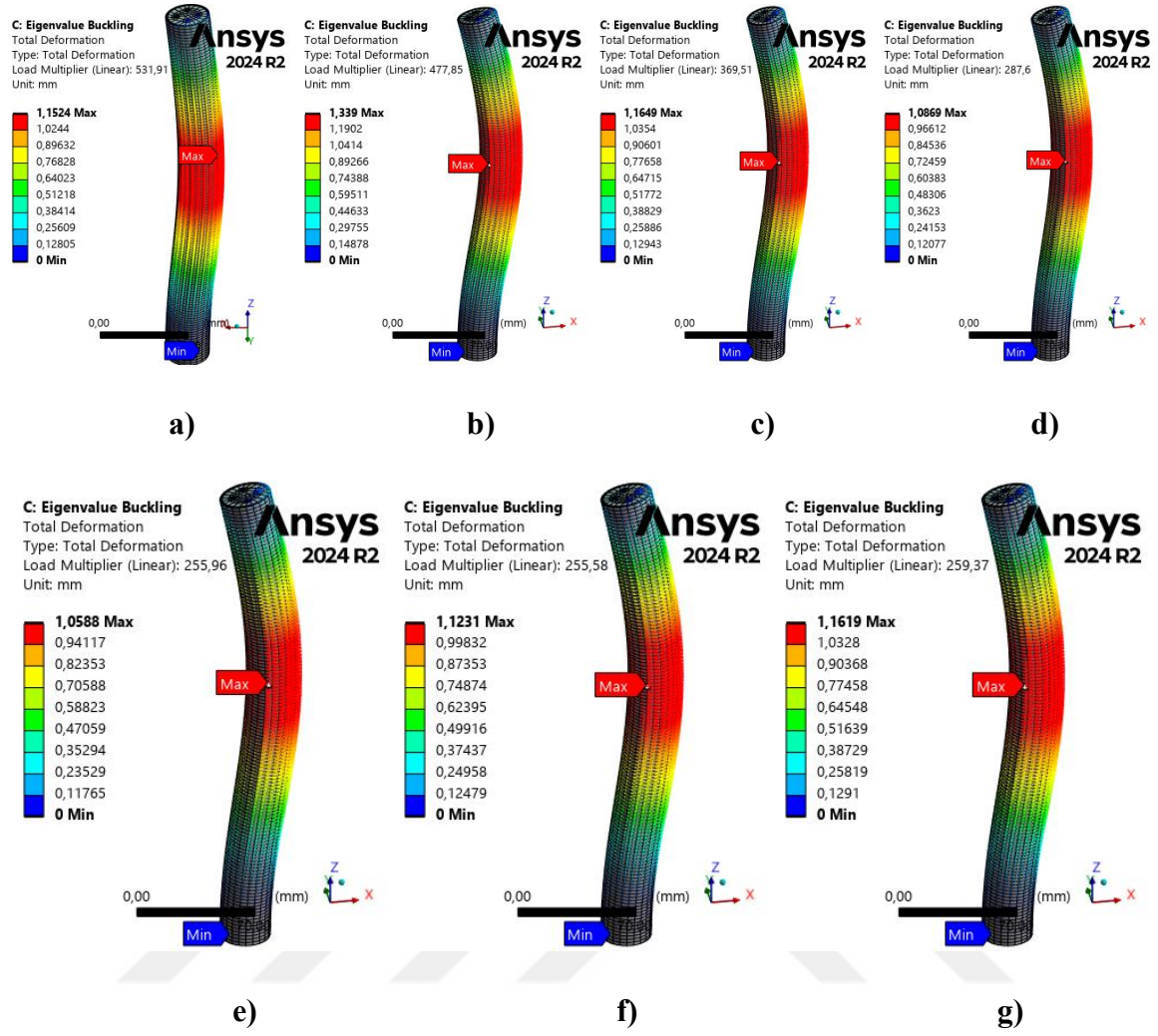
Şekil 6. 13 : 3CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



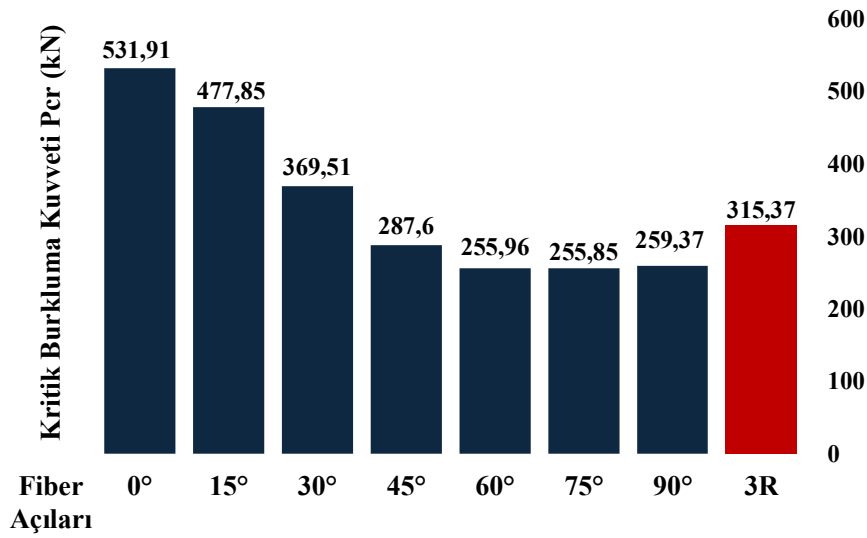
Şekil 6. 14 : 3CCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



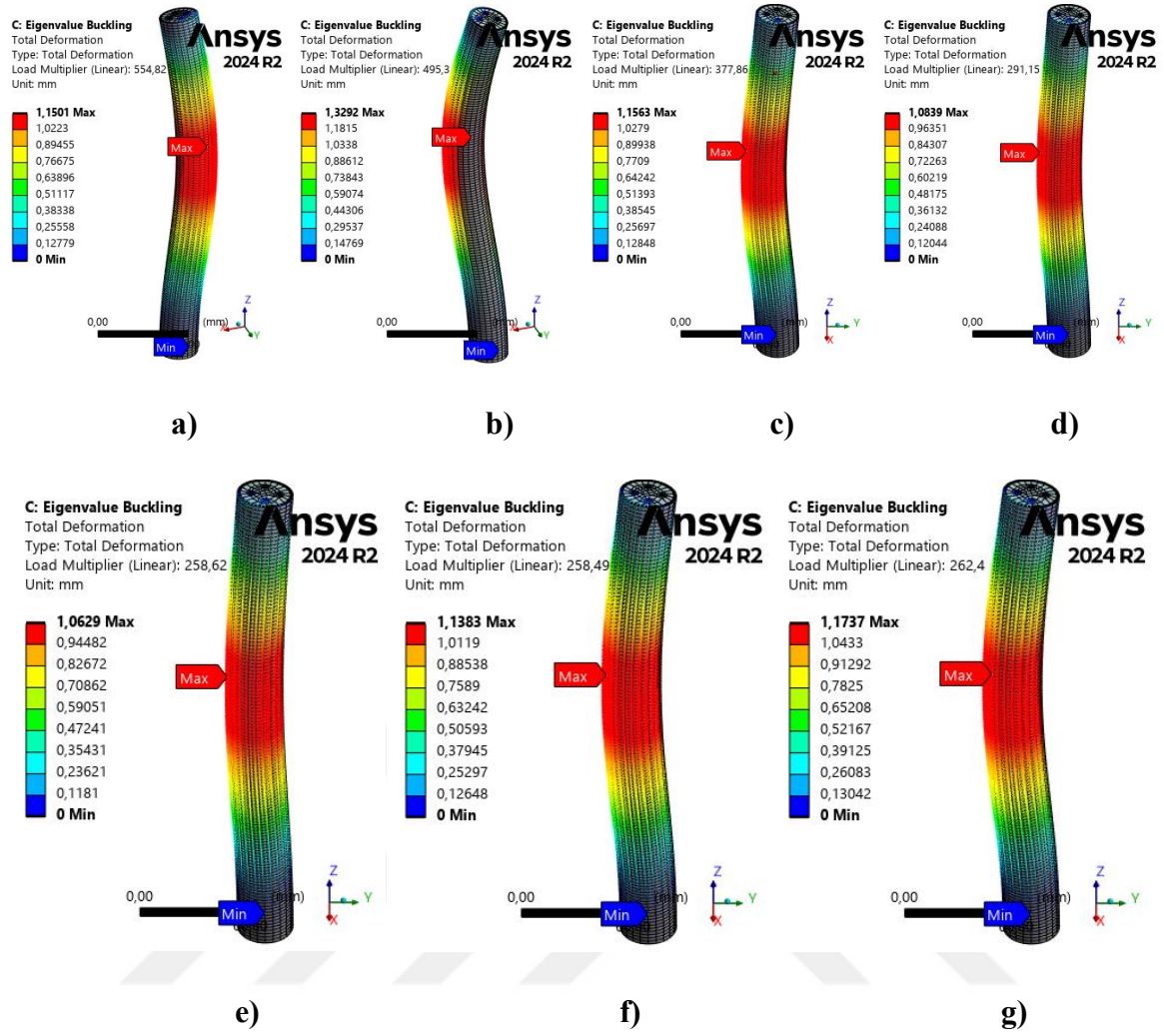
Şekil 6. 15 : 3CCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



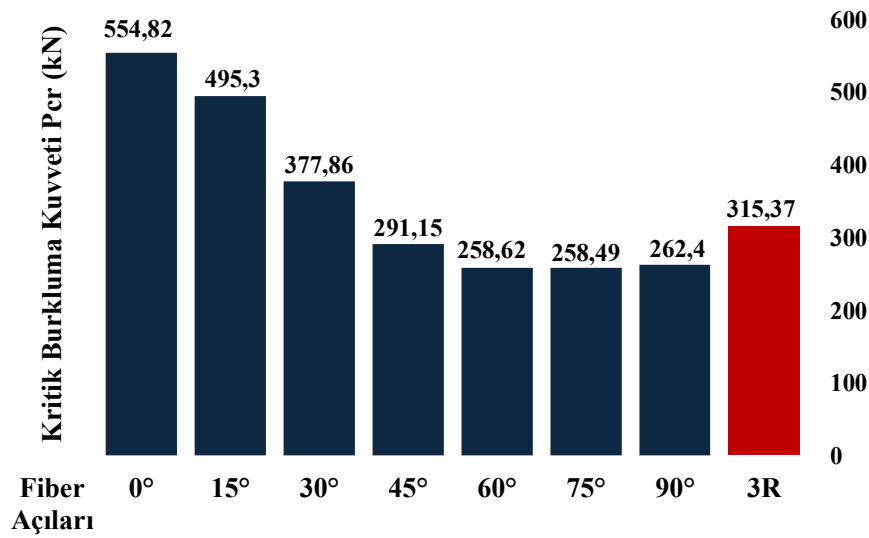
Şekil 6. 16 : 3CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



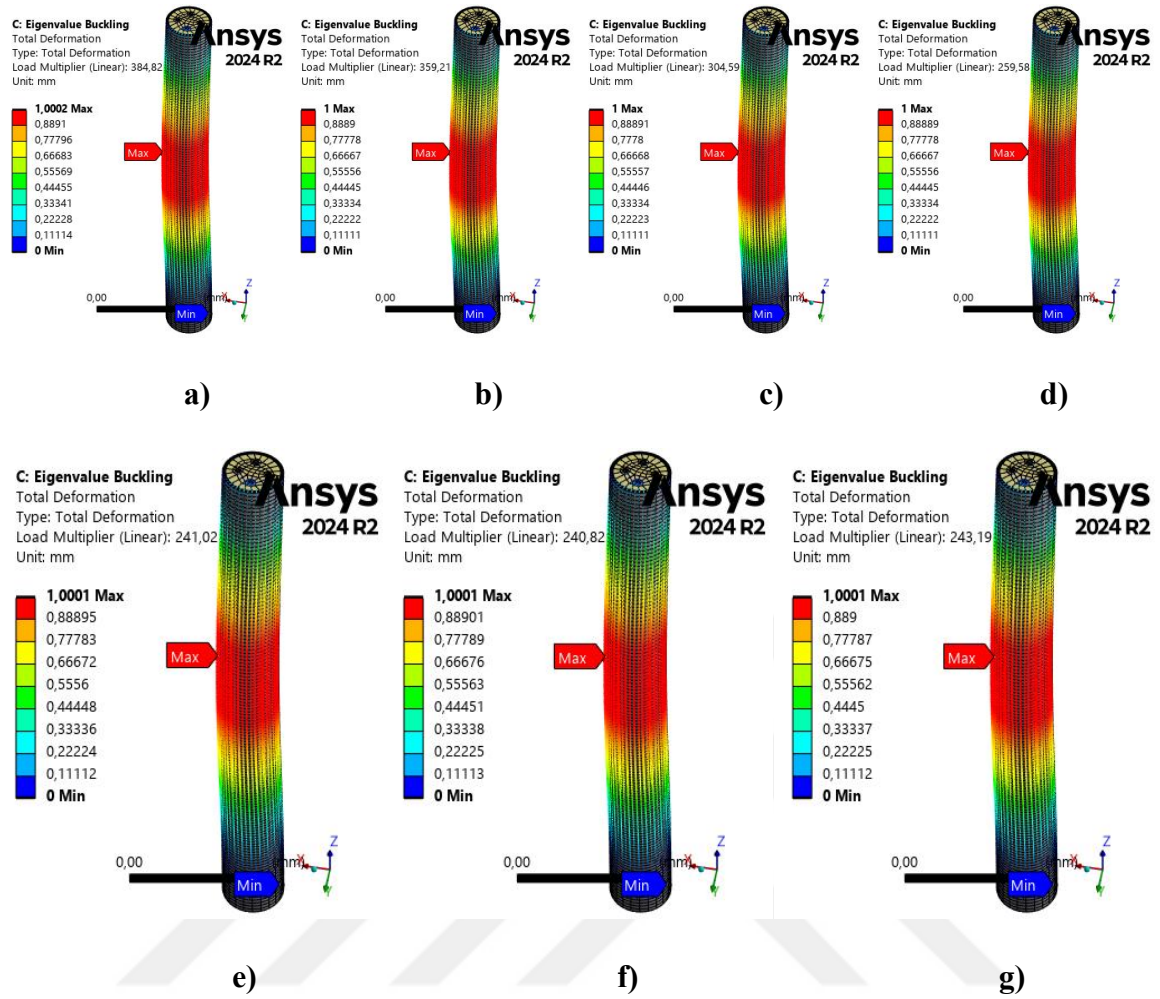
Şekil 6. 17 : 3CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



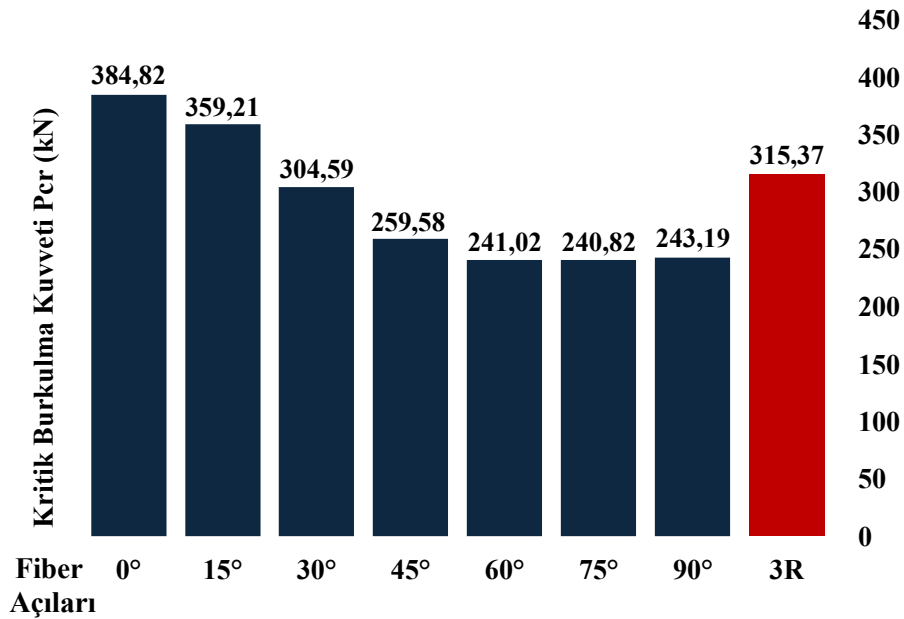
Şekil 6. 18 : 3GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



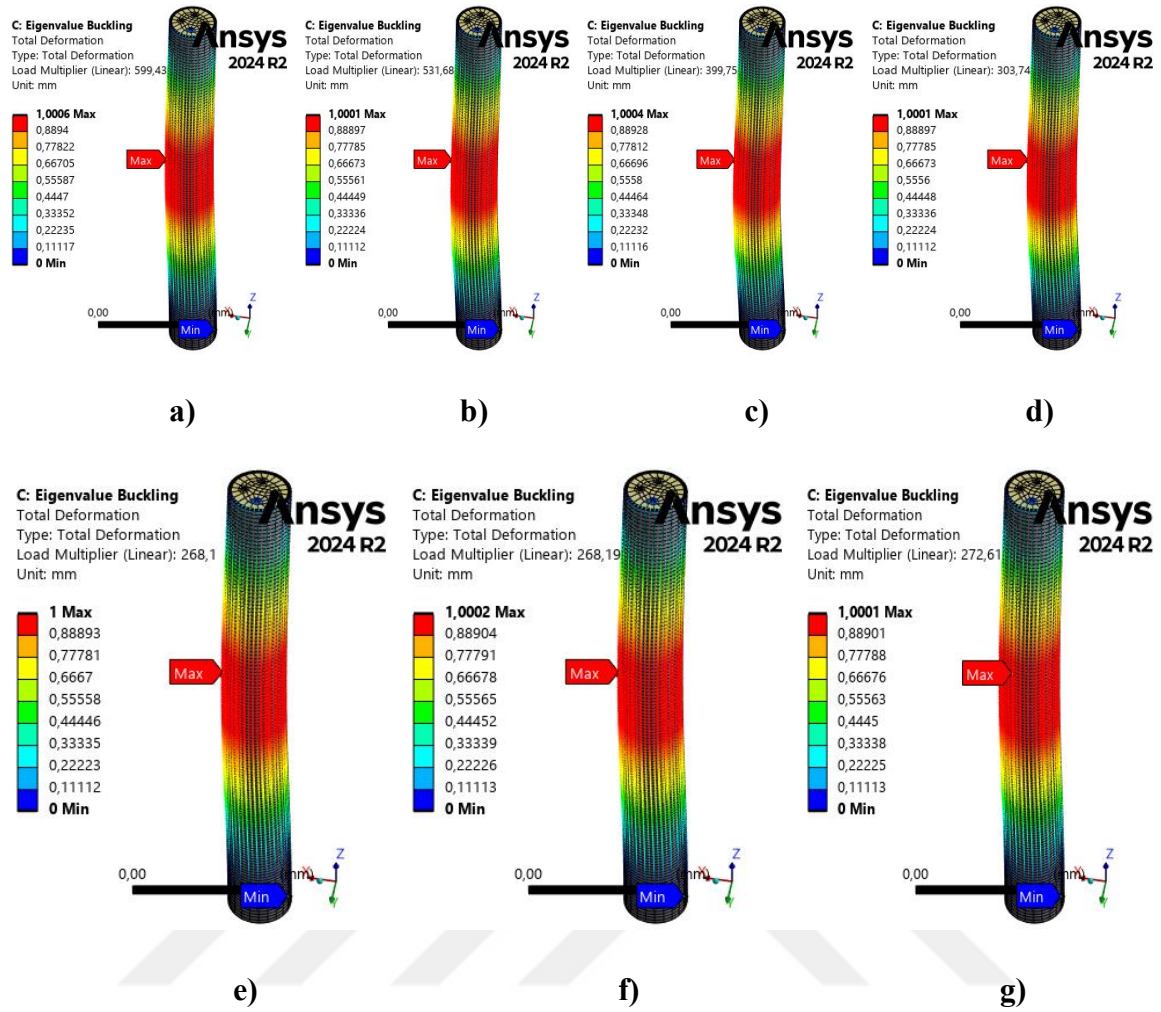
Şekil 6. 19 : 3GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



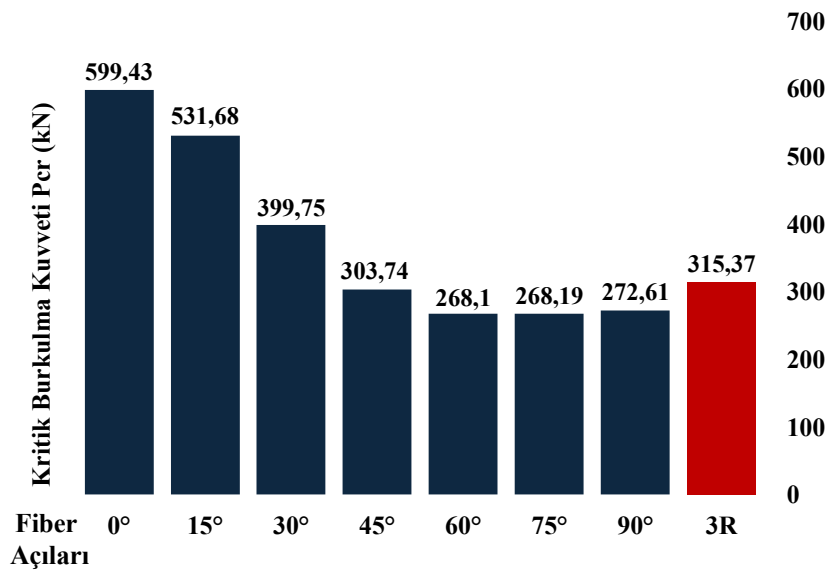
Şekil 6. 20 : 3GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



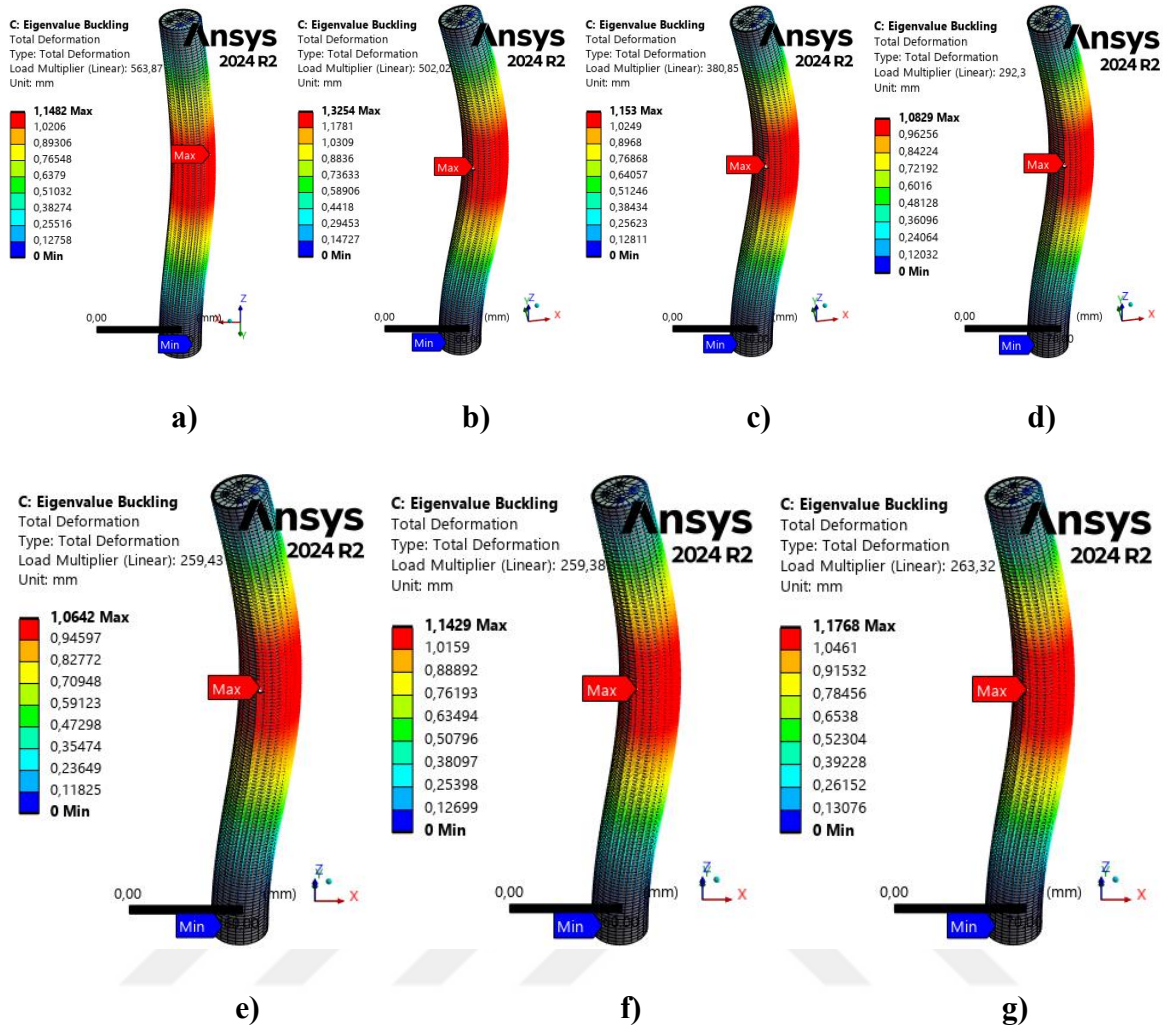
Şekil 6. 21 : 3GAGAGA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



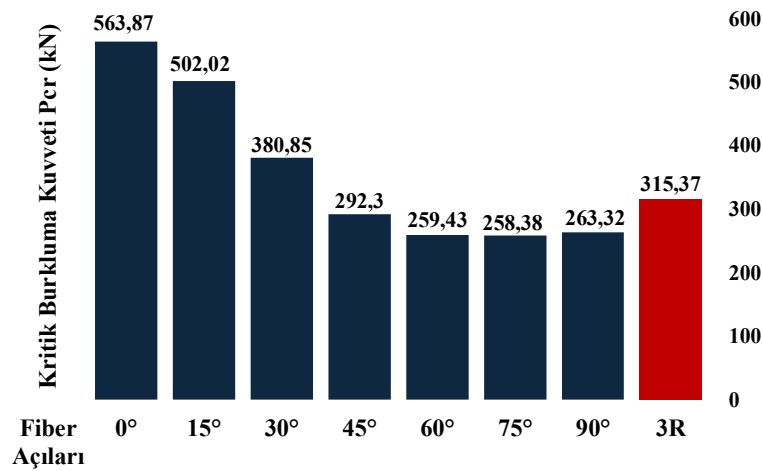
Şekil 6. 22 : 3GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



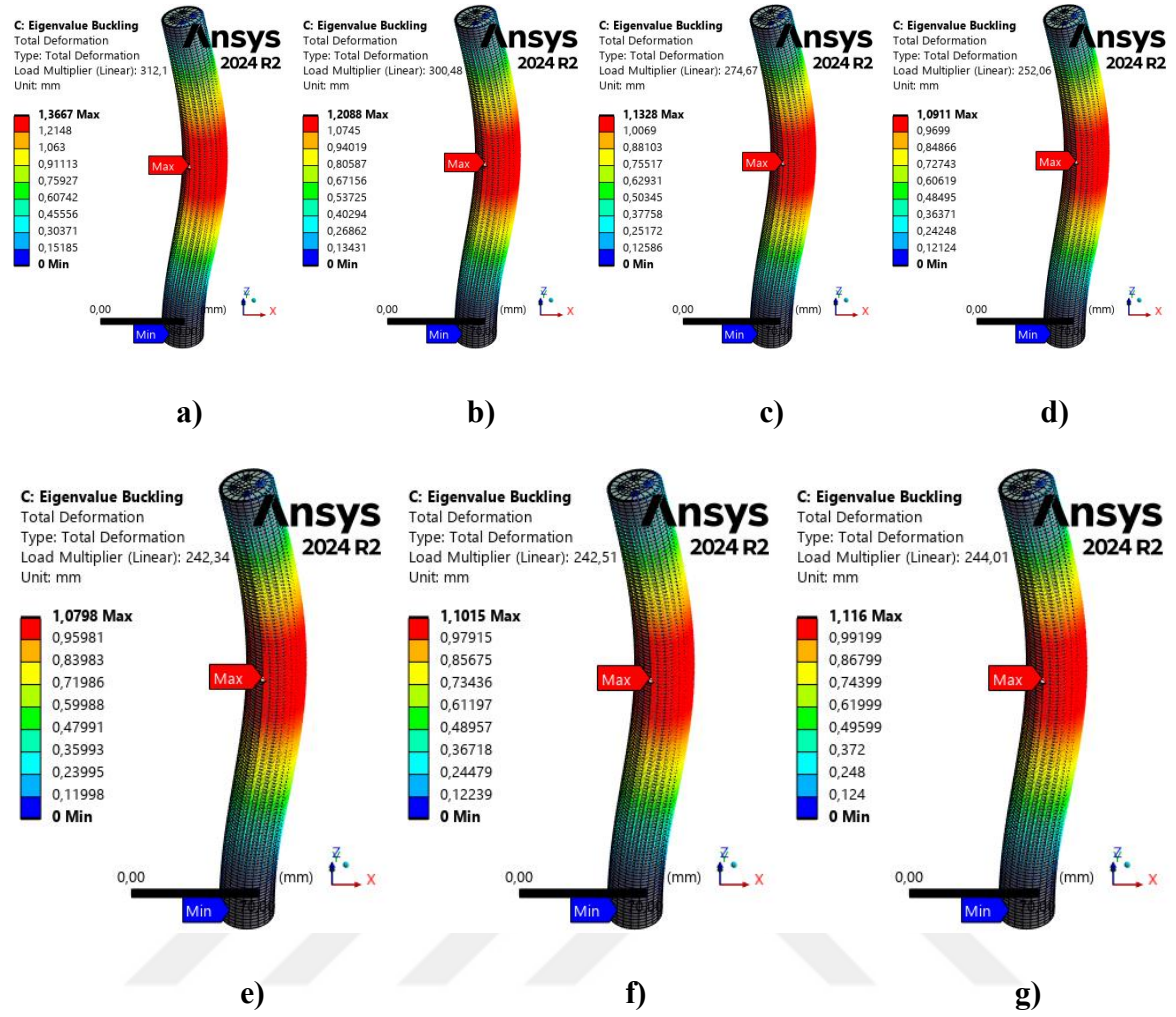
Şekil 6. 23 : 3GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



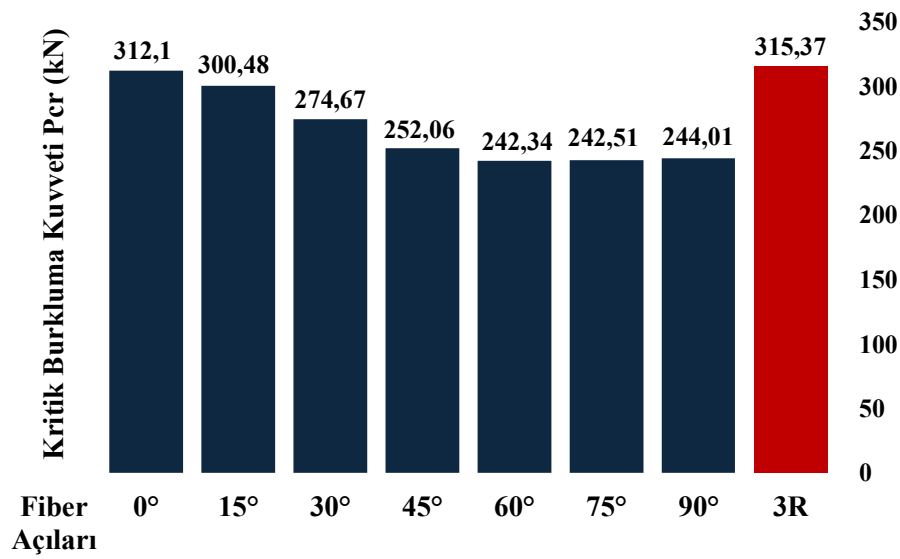
Şekil 6. 24 : 3GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 25 : 3GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



Şekil 6. 26 : 3GGGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 27 : 3GGGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.

Çizelge 6. 1 : 3 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN)

Fiber Açısı (°)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
3AAAAAA	451,7	411,46	328,86	268,15	239,01	238,29	241,14
3AACCGG	539,8	483,48	371,96	289,17	257,87	257,59	261,28
3ACACAC	663,26	578,12	417,99	306,56	266,27	265,76	270,25
3ACGACG	542,95	486,18	373,53	289,65	257,86	257,62	261,41
3AGCAGC	552,67	493,74	377,29	291,12	258,72	258,59	262,49
3CAGCAG	536,29	481,21	371,26	288,64	256,97	256,67	260,46
3CCCCCC	858,42	727,43	495,31	344,02	291,28	290,76	296,65
3CCGGAA	531,91	477,85	369,51	287,6	255,96	255,85	259,37
3GACGAC	554,82	495,3	377,86	291,15	258,62	258,49	262,4
3GAGAGA	384,82	359,21	304,59	259,58	241,02	240,82	243,19
3GCGCGC	599,43	531,68	399,75	303,74	268,1	268,19	272,61
3GGAACC	563,87	502,02	380,85	292,3	259,43	259,38	263,32
3GGGGGG	312,1	300,48	274,67	252,06	242,34	242,51	244,01
3R	315,37						

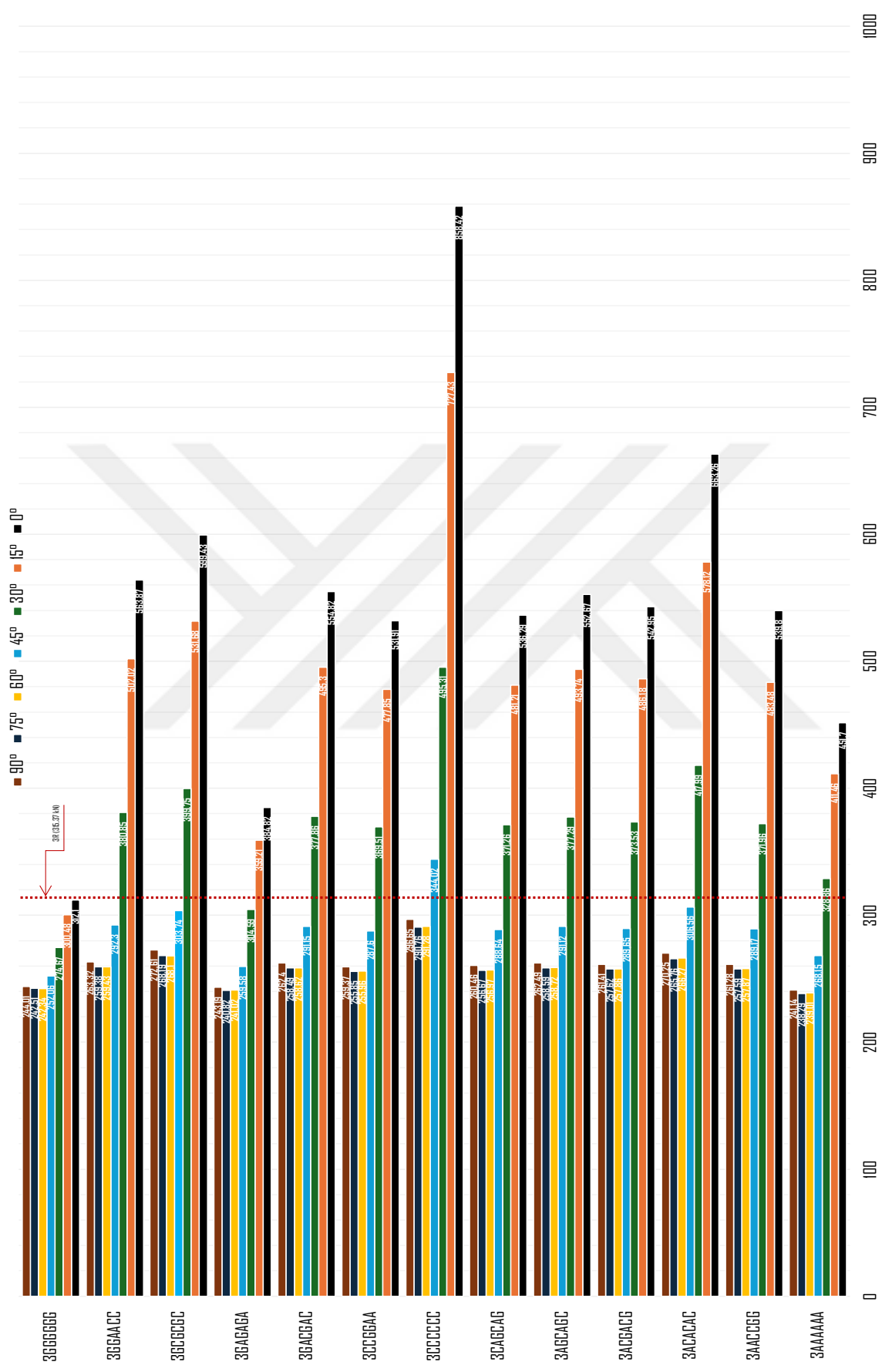
3 mm donatılı modellerin burkulma analizlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1’de verilmiş olup , fiber yönelimi arttıkça (0° – 90°) kritik burkulma kuvvetlerinde genel bir azalma eğilimi olduğunu açıkça göstermektedir. Liflerin eksenel yönde hizalandığı 0° yöneliminde tüm modellerde maksimum dayanım elde edilmiş, fiber açısı arttıkça eksenel rijitlik zayıflamış ve burkulma yükü kademeli olarak azalmıştır. Kompozit kaplama bulunmayan 3R referans modeli (315,37 kN) ile karşılaştırıldığında, 0° yöneliminde en yüksek artış 3CCCCCC modelinde gözlenmiş ve yaklaşık %172 oranında bir dayanım artışı sağlanmıştır. Bu önemli artış, karbon fiberin yüksek elastisite modülü sayesinde sistemin eksenel yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde artırdığını ve burkulma öncesi deformasyonları sınırlandırdığını göstermektedir. Karbon ağırlıklı periyodik dizilim yapısına sahip 3ACACAC modeli de 0° yöneliminde oldukça yüksek bir dayanım sergilemiş ve hibrit dizilimler arasında üst seviyede yer almıştır.

Hibrit dizilimler olan 3GGAACC, 3GACGAC, 3AGCAGC, 3ACGACG, 3AACC GG, 3CAGCAG, 3CCGGAA, 3GCGCGC ve 3GAGAGA modelleri, 0° fiber yöneliminde yaklaşık %68–79 aralığında artış göstermiştir. Bu modellerde karbon tabakalarının kevlar ve Cam fiberlerle birlikte kullanılması, sistemde yük paylaşımını dengeli hale getirmiş ve eksenel rijitliğe anlamlı katkı sağlamıştır. Karbon–cam sıralı dizilime sahip 3GCGCGC modeli hibrit sınıfta güçlü bir performans sergilerken, kevlar–cam esaslı 3GAGAGA modeli elastisite modülünün daha düşük olması nedeniyle sınırlı bir artış göstermiştir. Tam kevlar (3AAAAAA) modeli yaklaşık %43 artış ile orta düzeyde bir iyileşme sunarken, tam Cam fiberli (3GGGGGG) model referans modele çok yakın kalmıştır. Bu durum, Cam fiberlerin düşük elastisite modülüne bağlı olarak eksenel yük taşıma kapasitesinin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Fiber yöneliminin 15°–30° aralığına yükselmesiyle, karbon oranı yüksek modellerin dayanım artış oranları azalmış olsa da hâlen pozitif değerlerde kalmıştır. Bu eğilim, 3ACACAC ve 3GCGCGC modellerinde de belirgin şekilde görülmektedir. Buna karşın kevlar ve cam esaslı dizilimlerde bu aralıkta burkulma dayanımı hızlı biçimde azalmıştır. Fiberlerin eksenel sapması, yük aktarımının bir kısmının kesme doğrultusuna yönelmesine neden olmuş ve sistemin eksenel rijitliği azalmıştır. 45° yöneliminde yalnızca 3CCCCC modeli 3R'ye göre pozitif farkını koruyabilmiş, diğer tüm dizilimlerde burkulma dayanımı referansın altına düşmüştür. 3ACACAC modeli ise karbon katkısının etkisiyle bu açıya kadar rekabetçi sonuçlarını büyük ölçüde korumuştur.

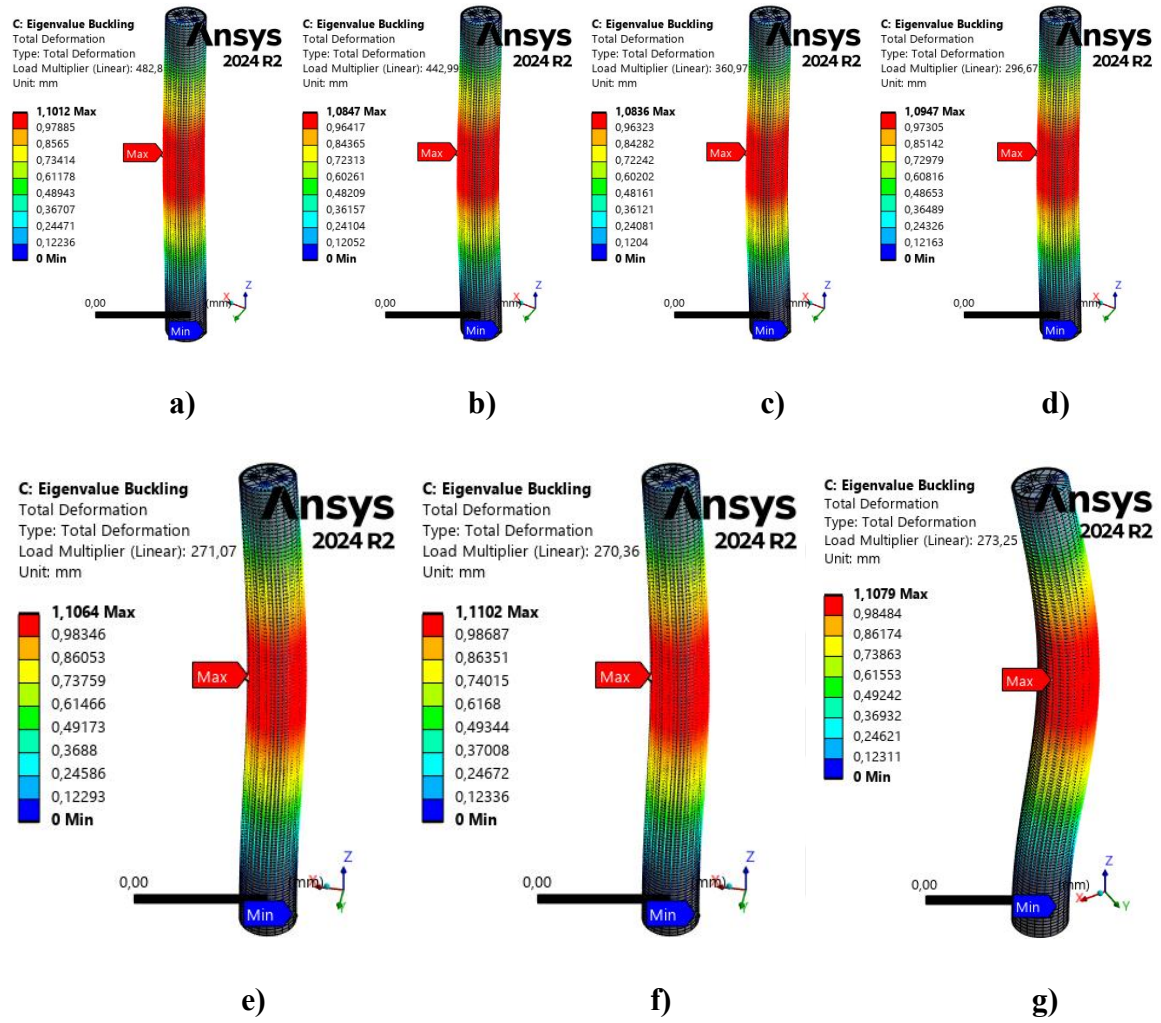
60° ve üzeri fiber açılarında tüm modellerde burkulma dayanımı azalmaya devam etmiş ancak karbon oranı yüksek dizilimlerde bu düşüş sınırlı kalmıştır. Örneğin 3CCCCC modeli 60°–90° aralığında yalnızca %6–8 civarında azalma göstermiştir. Benzer şekilde 3ACACAC ve 3GCGCGC modelleri de yüksek açılarda dayanımı görece daha iyi korumuştur. Buna karşılık kevlar ve cam fiberli sistemlerde (özellikle 3GAGAGA ve 3AAAAAA) burkulma dayanımı bu açı aralığında %20–25 civarında azalmıştır. Özellikle 75° yöneliminde tüm modellerde en düşük burkulma dayanımı değerleri elde edilmiştir. Bu durum, liflerin yük taşıma doğrultusundan uzaklaşması sonucu eksenel taşıma kapasitesinin düşmesiyle açıklanmaktadır.

90° yöneliminde liflerin tamamen çevresel hizalanmasıyla sistemde kısmi bir rijitlik artışı gözlenmiş ve burkulma dayanımı 75°teki minimum noktadan sonra hafifçe toparlanmıştır. Bu toparlanma, çevresel yöndeki fiberlerin dış katmanlarda gerilme dağılımını dengelemesi ve dış yüzeyde halkasal bir sıkıştırma etkisi oluşturmasıyla ilgilidir.

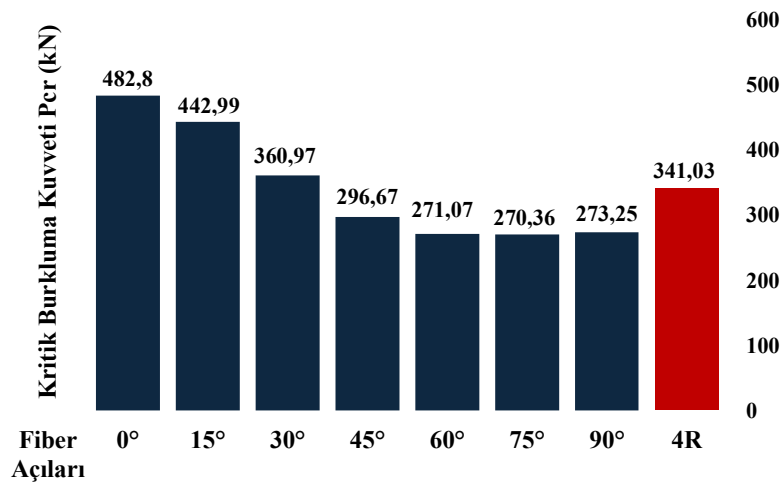


Şekil 6. 28 : 3 mm donatılı tüm konfigürasyonların fiber açılarna göre kritik burkulma kuvvetlerinin (P_{kr} , kN) genel karşılaştırma grafiği.

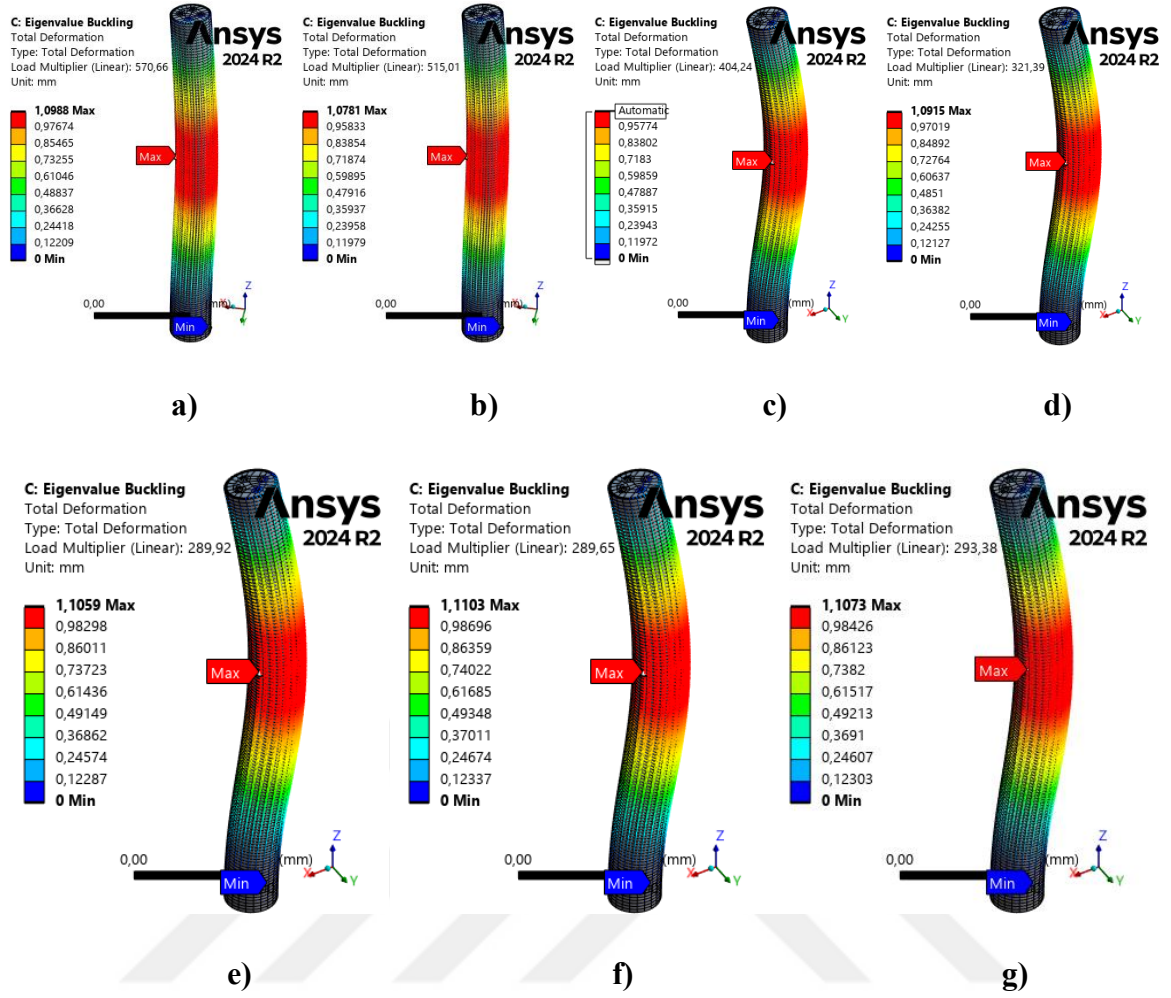
6.2.2 Donatı çapı 4 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri



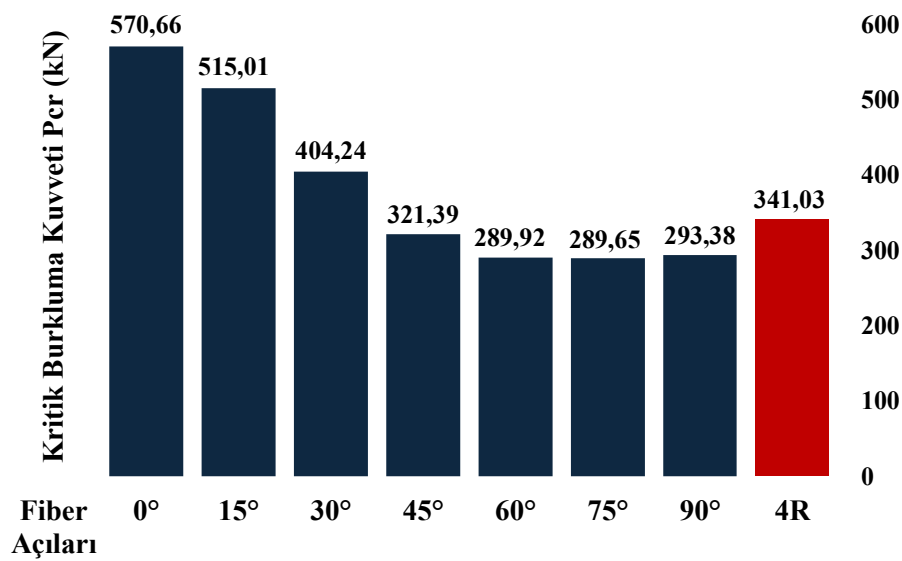
Şekil 6. 29 : 4AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



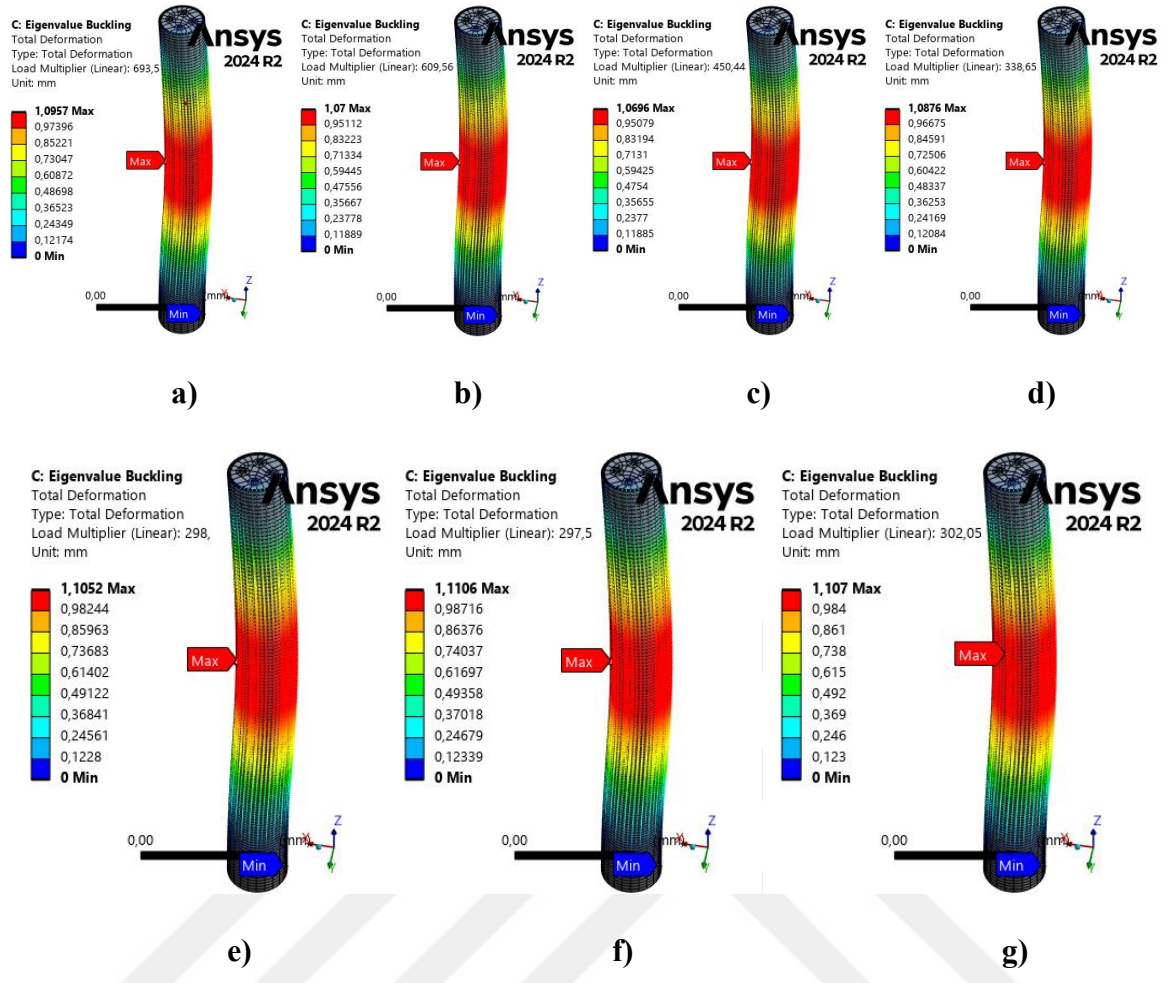
Şekil 6. 30 : 4AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



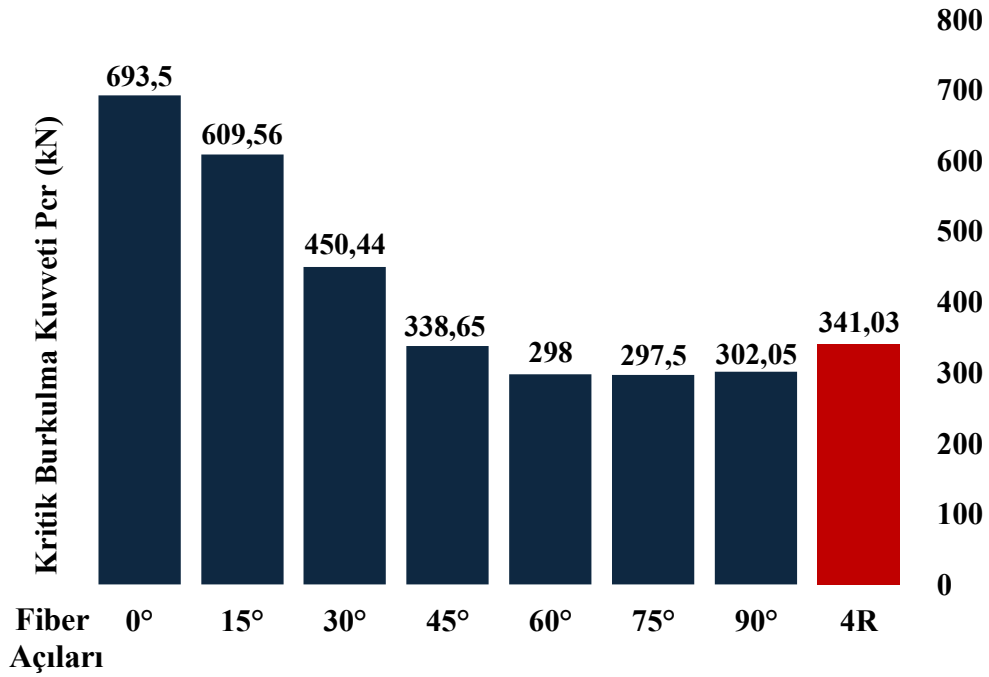
Şekil 6. 31 : 4AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



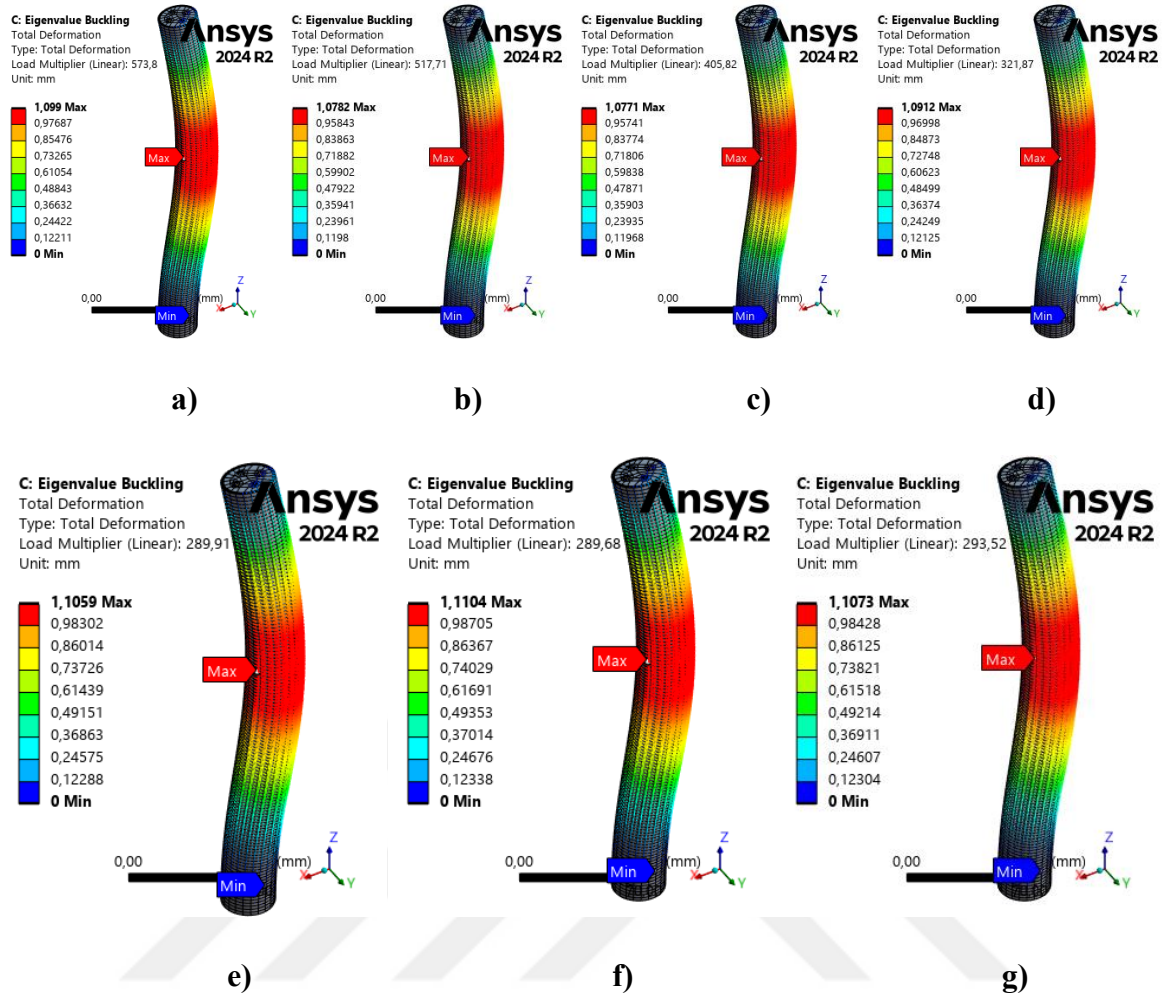
Şekil 6. 32 : 4AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



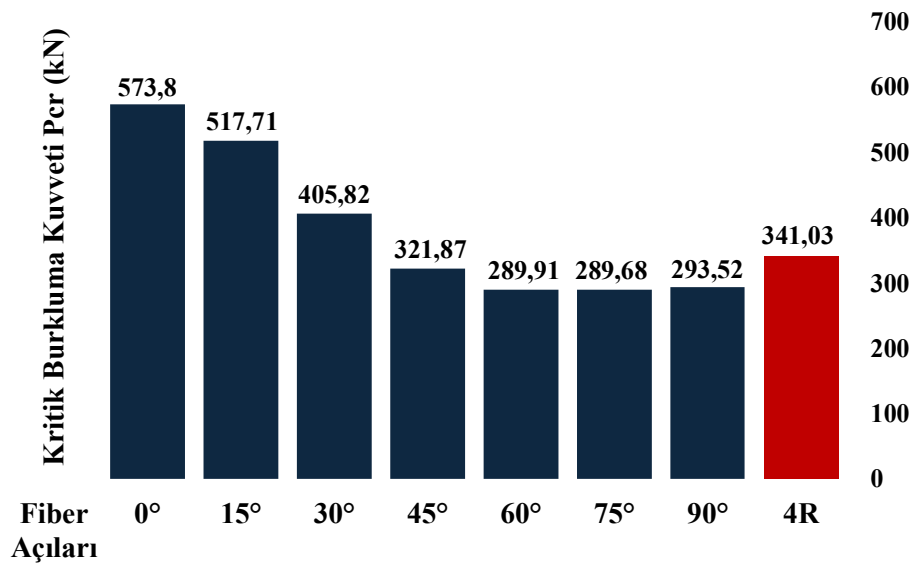
Şekil 6. 33 : 4ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



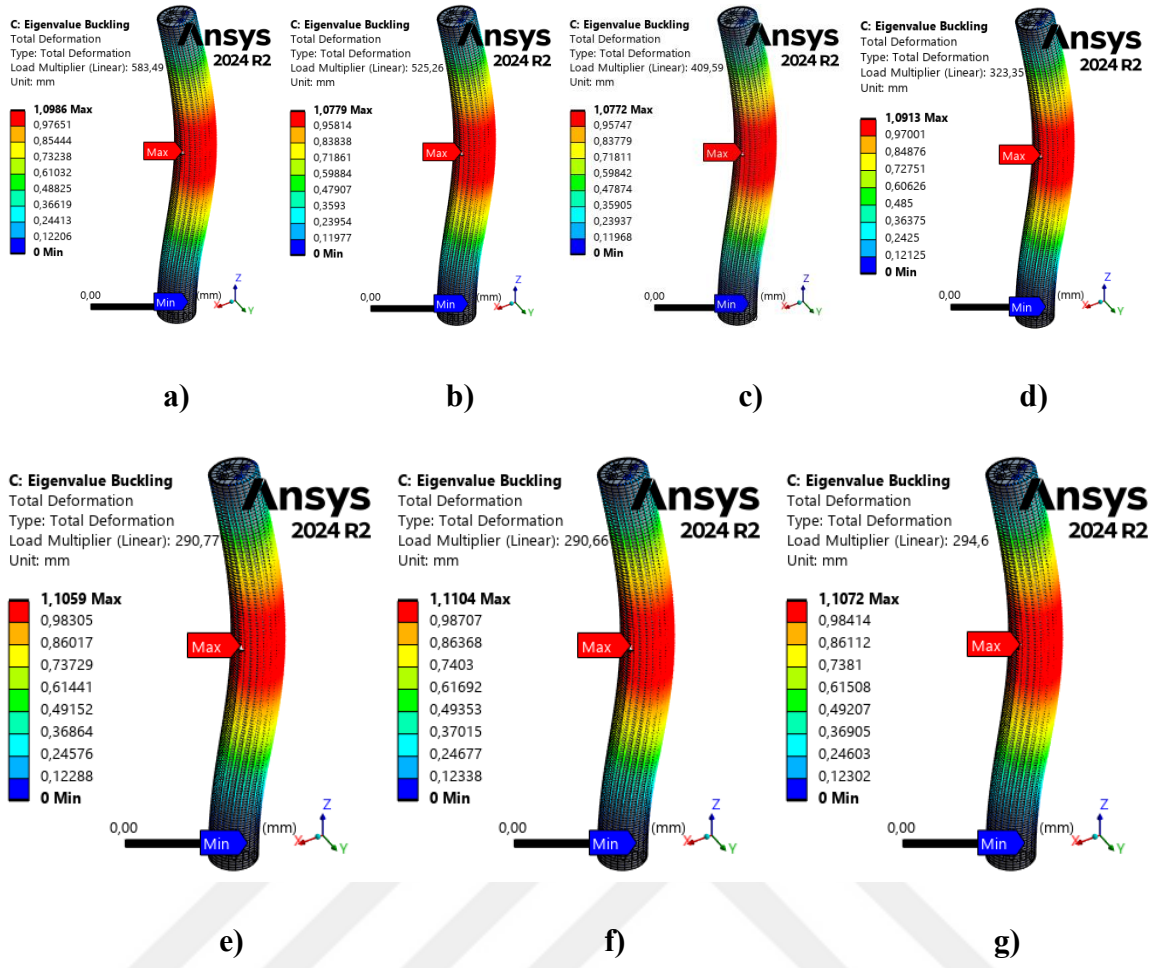
Şekil 6. 34 : 4ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



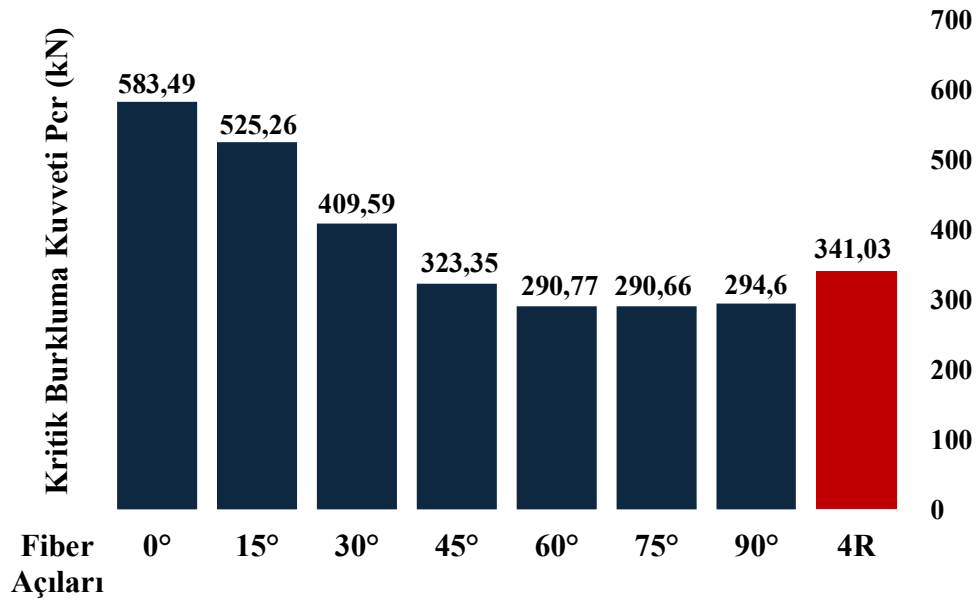
Şekil 6. 35 : 4ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



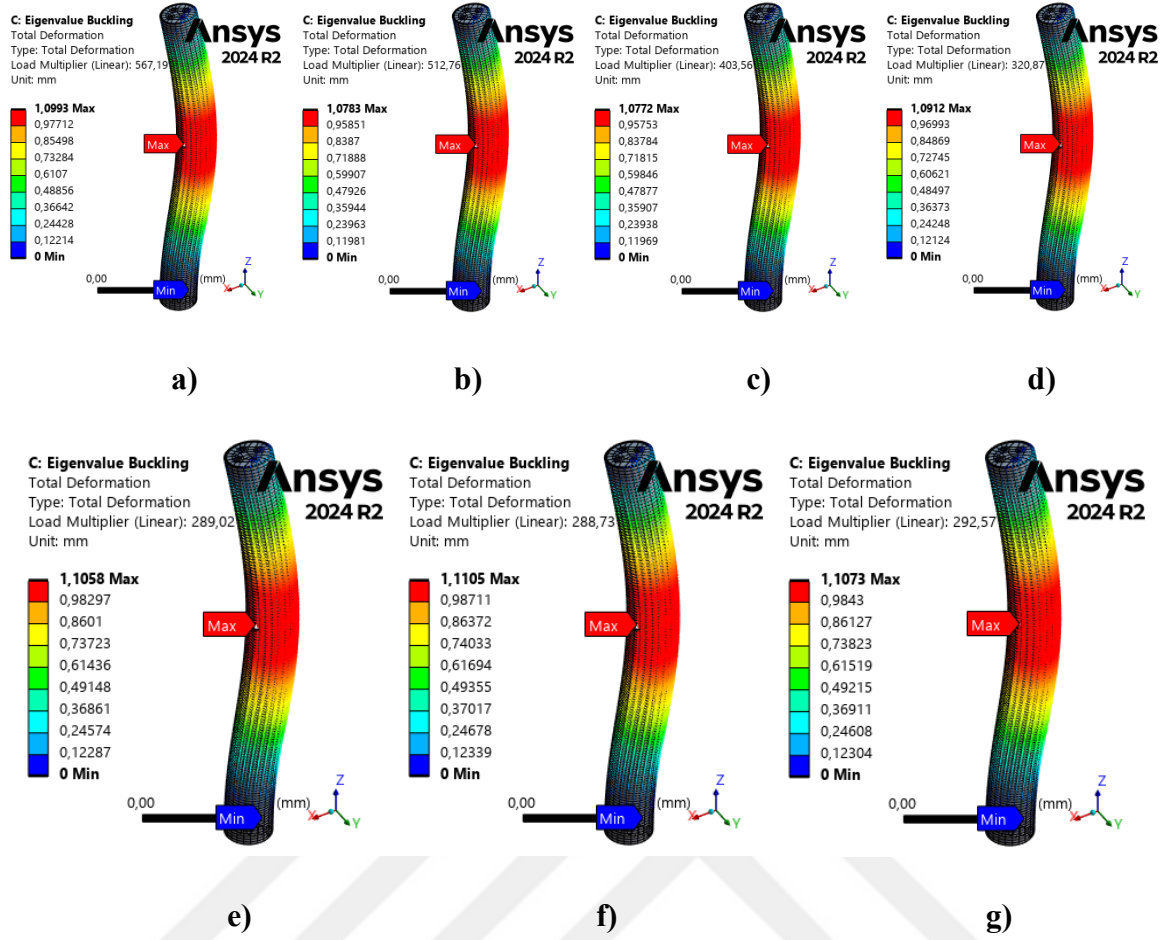
Şekil 6. 36 : 4ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



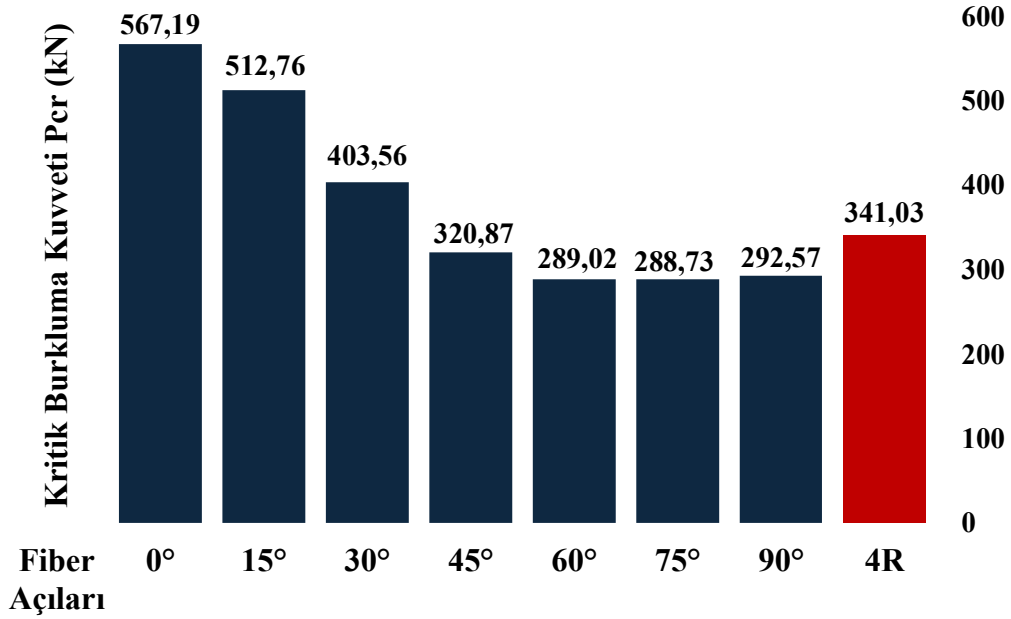
Şekil 6. 37 : 4AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



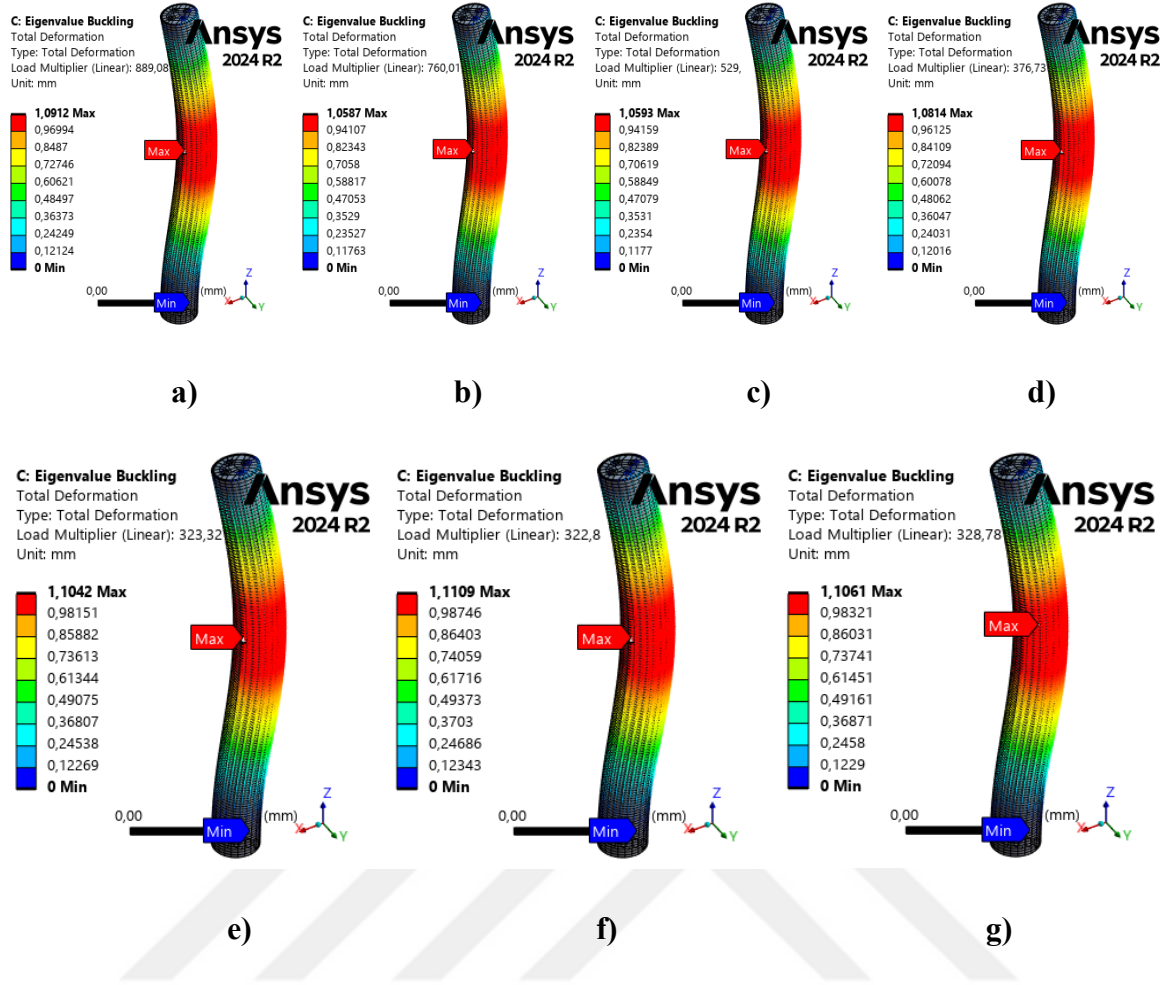
Şekil 6. 38 : 4AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



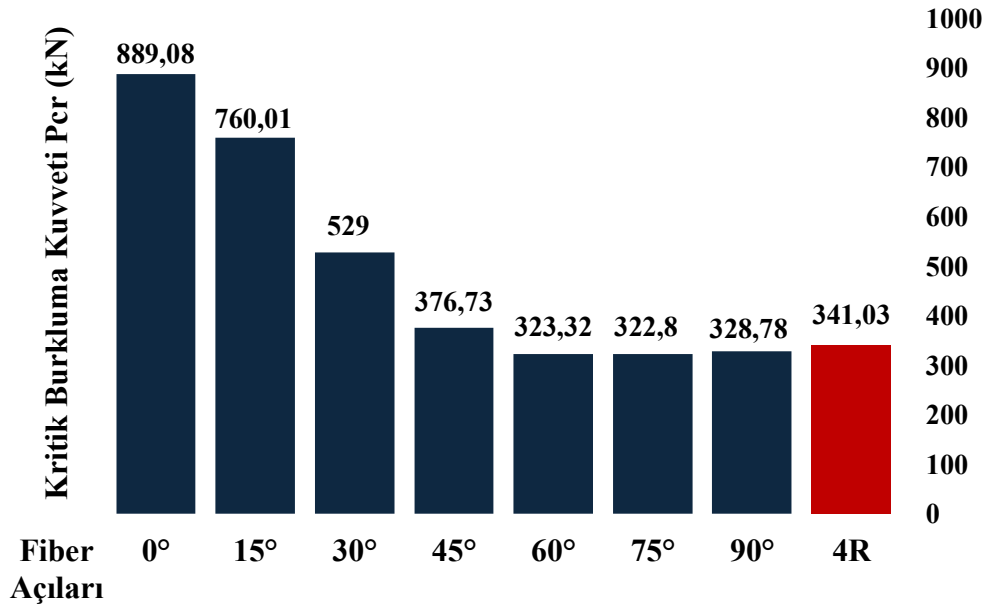
Şekil 6. 39 : 4CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



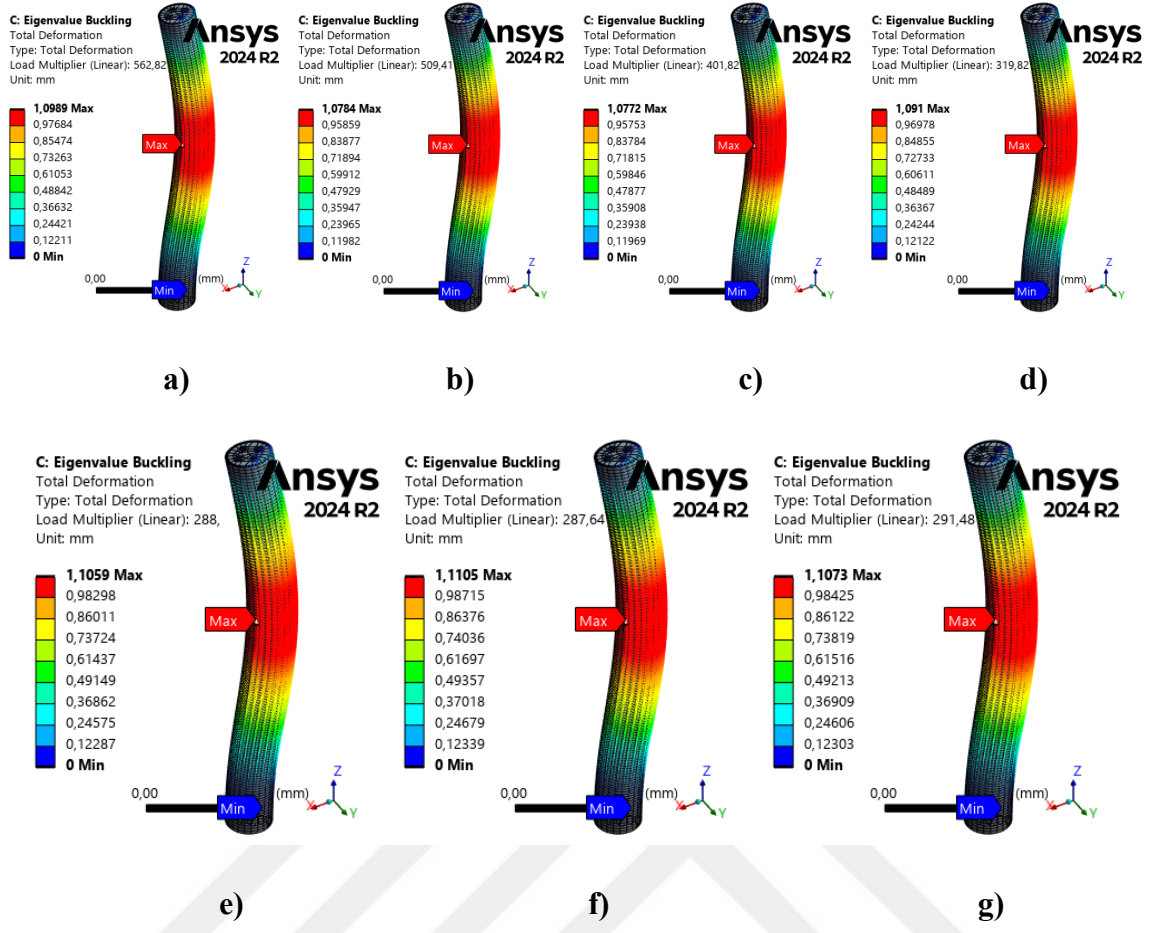
Şekil 6. 40 : 4CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



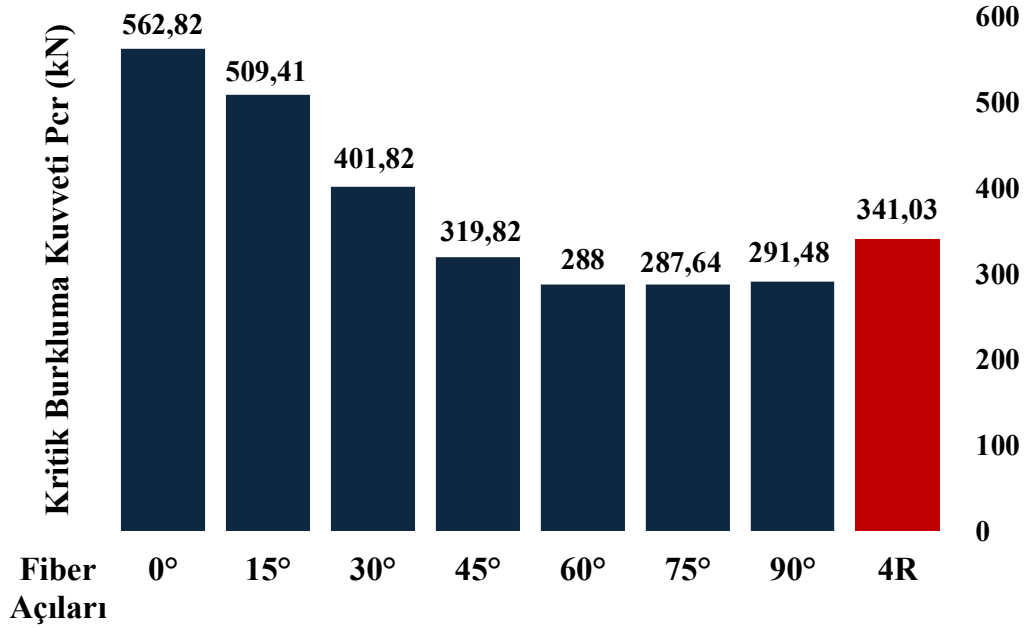
Şekil 6. 41 : 4CCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



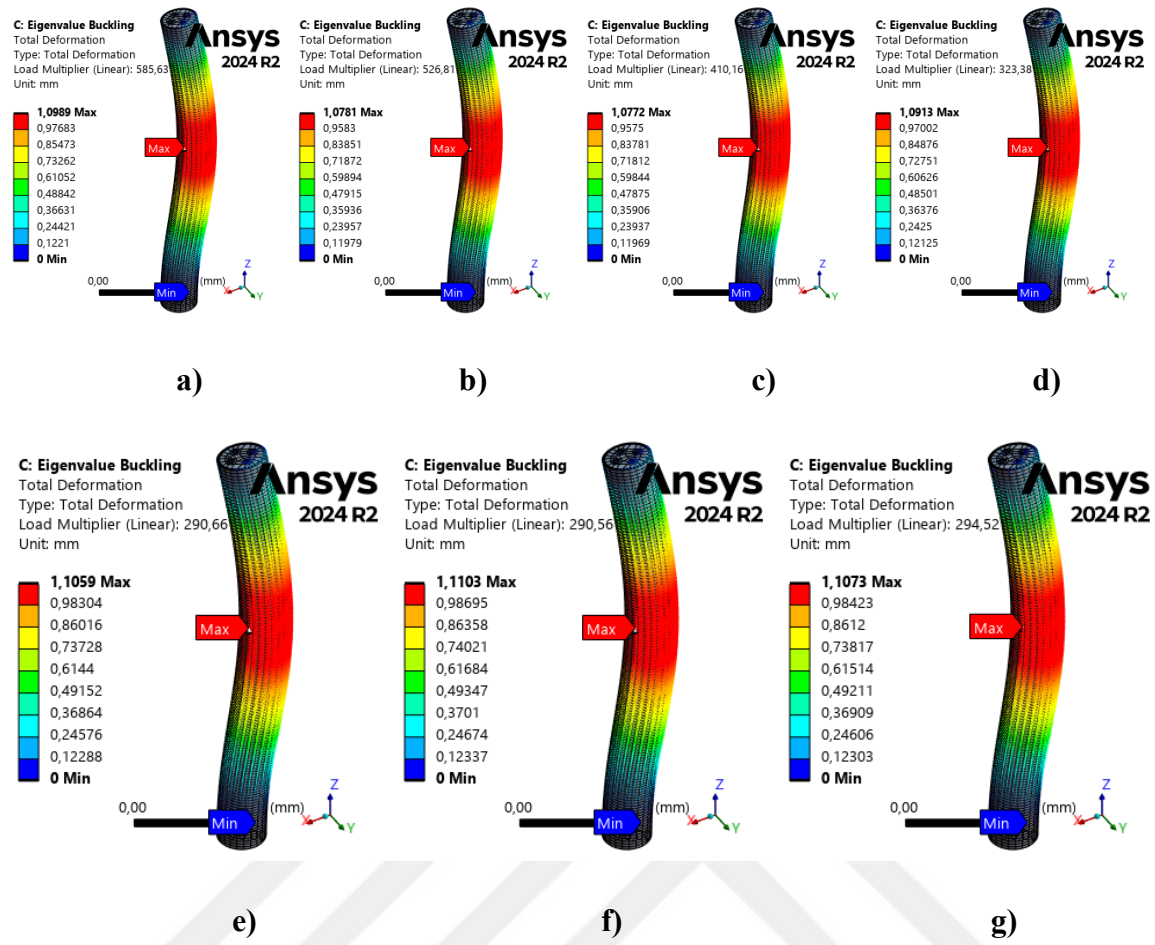
Şekil 6. 42 : 4CCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



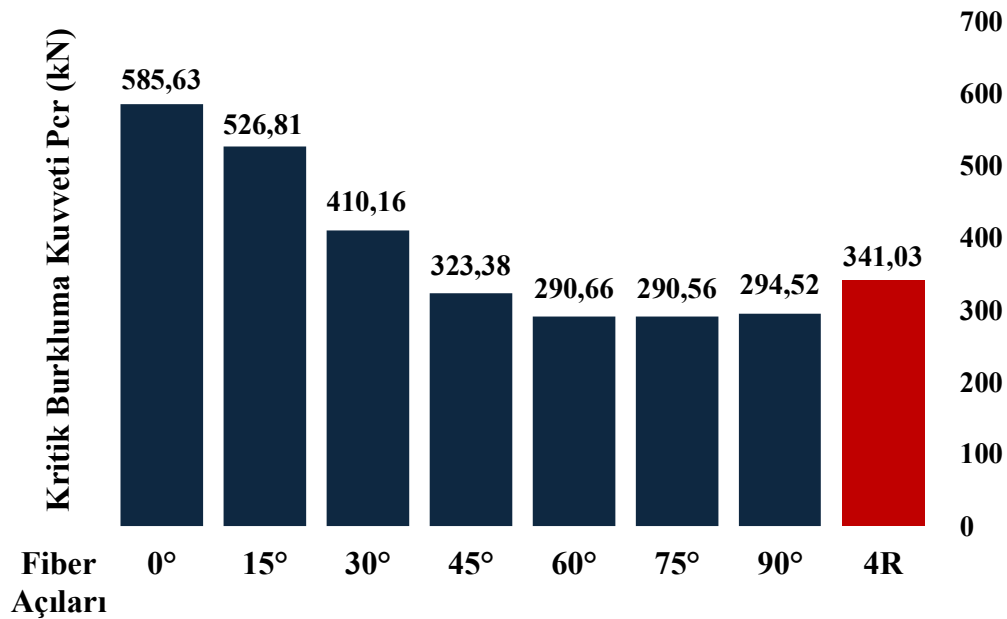
Şekil 6. 43 : 4CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



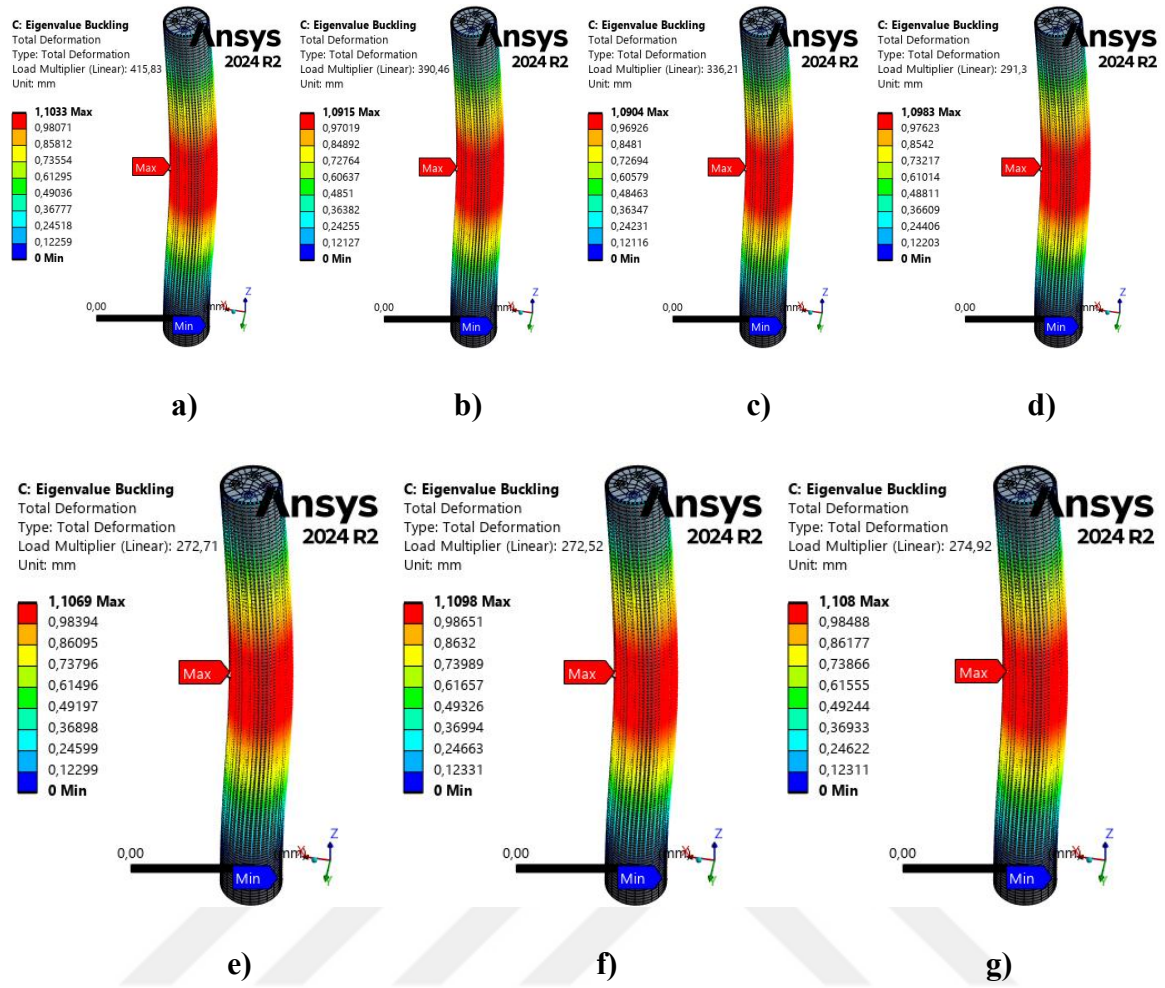
Şekil 6. 44 : 4CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



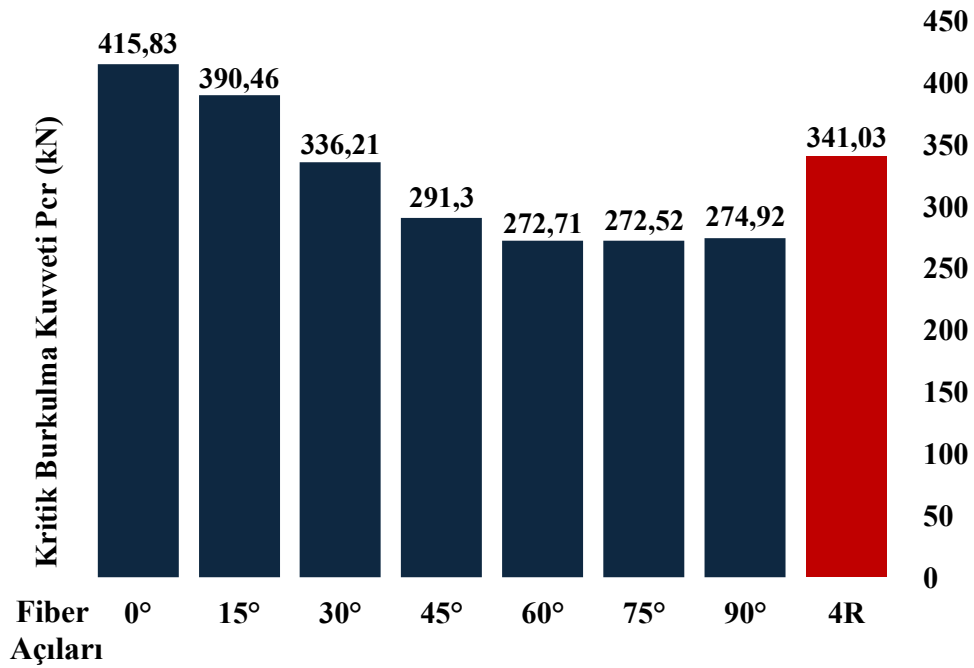
Şekil 6. 45 : 4GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



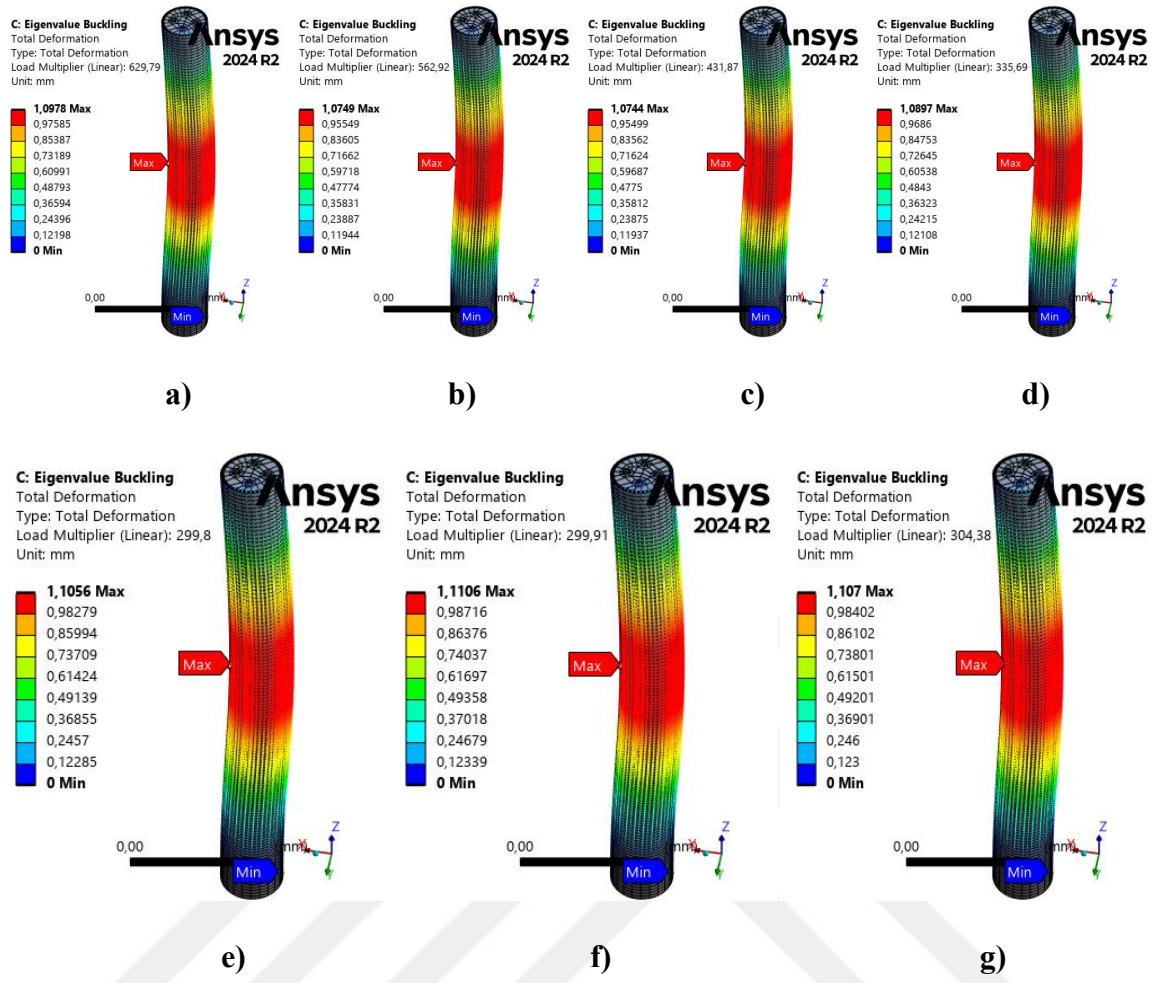
Şekil 6. 46 : 4GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



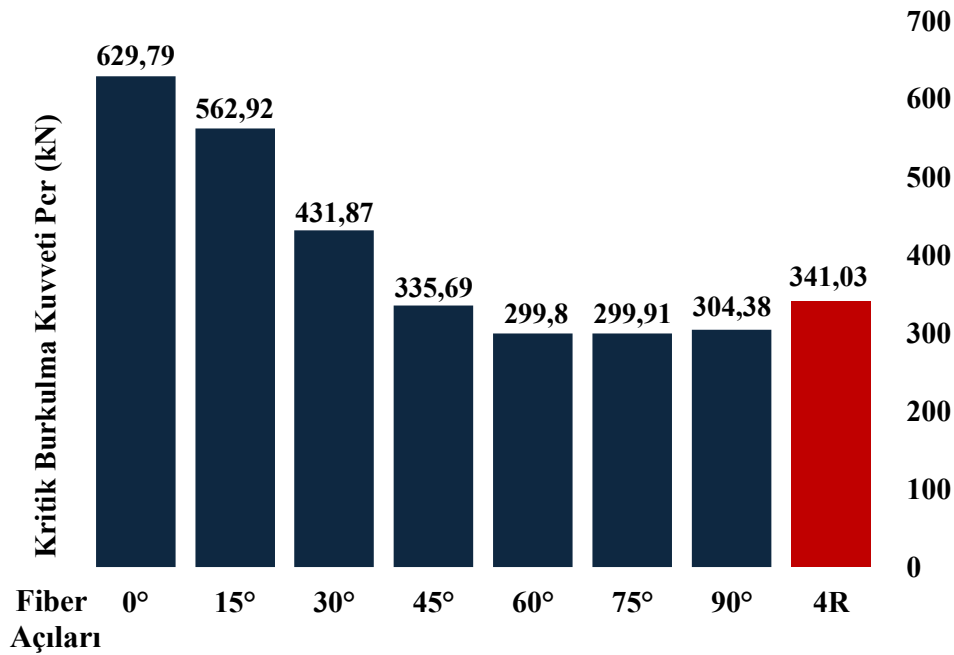
Şekil 6. 47 : 4GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



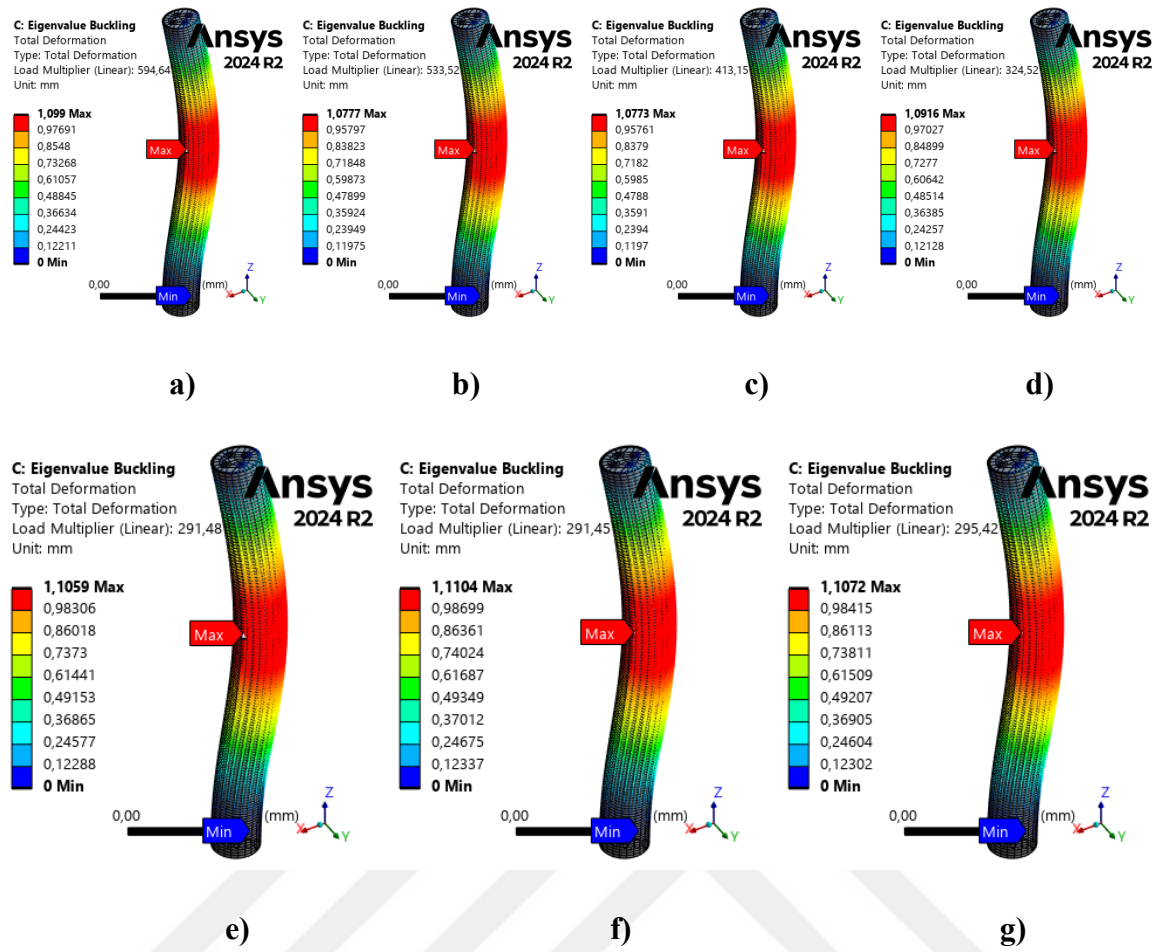
Şekil 6. 48 : 4GAGAGA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



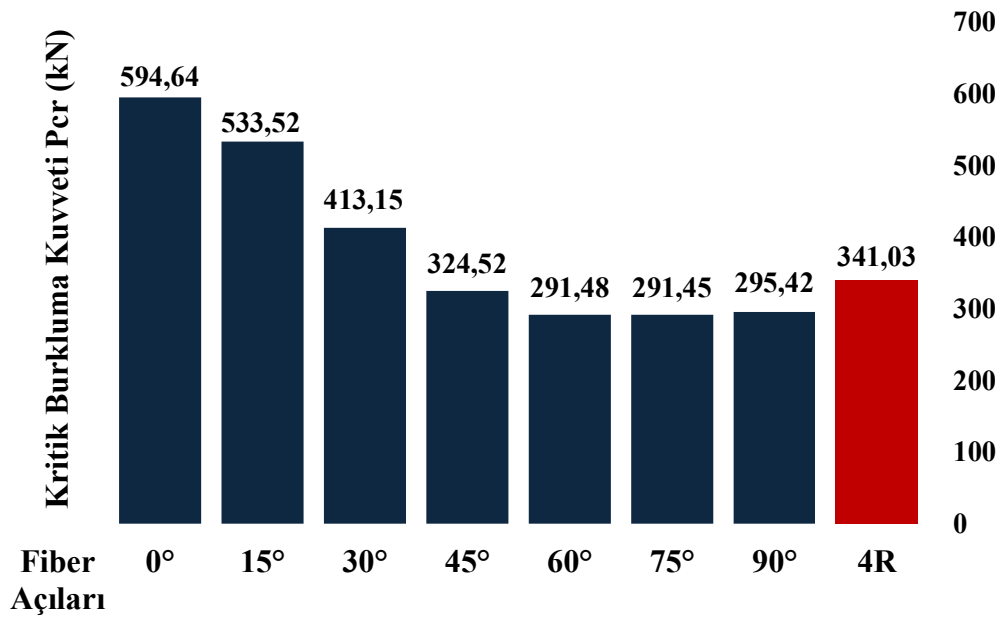
Şekil 6. 49 : 4GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



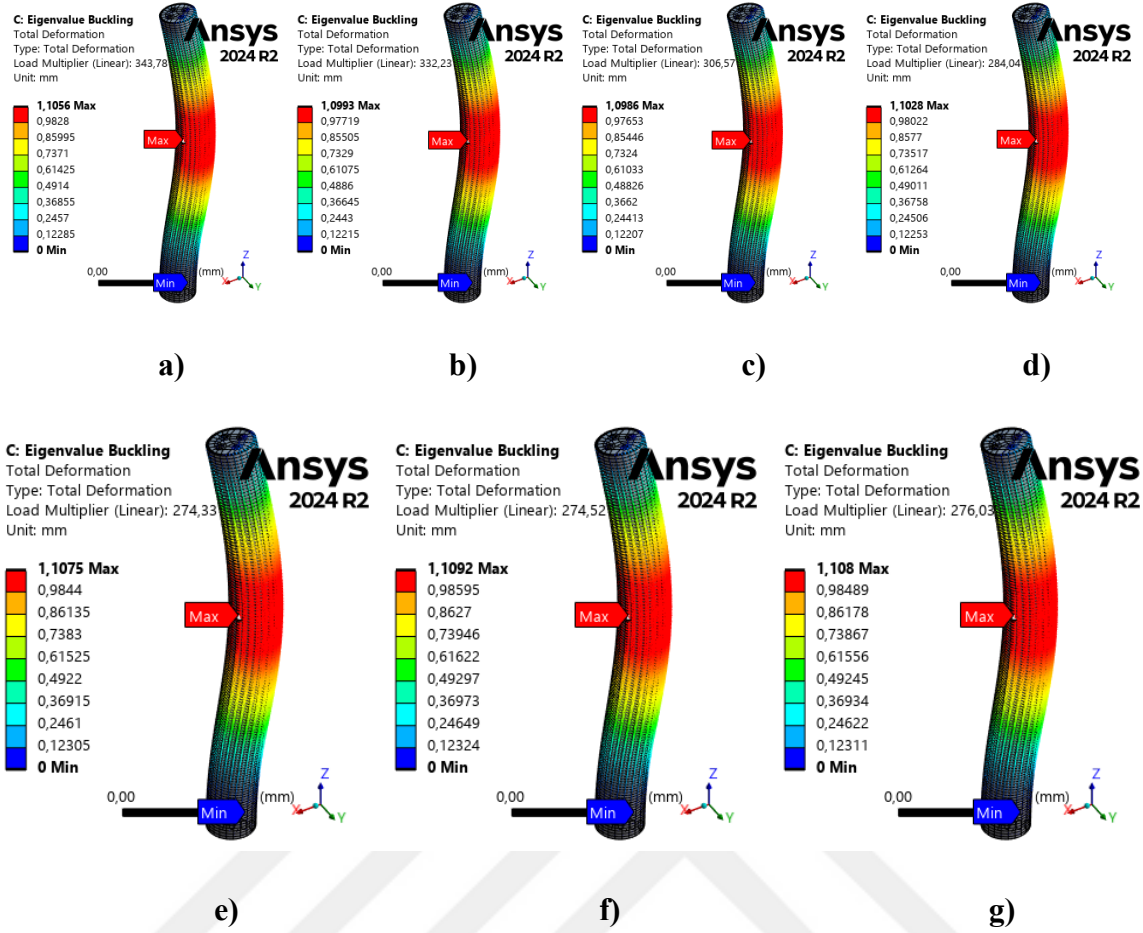
Şekil 6. 50 : 4GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



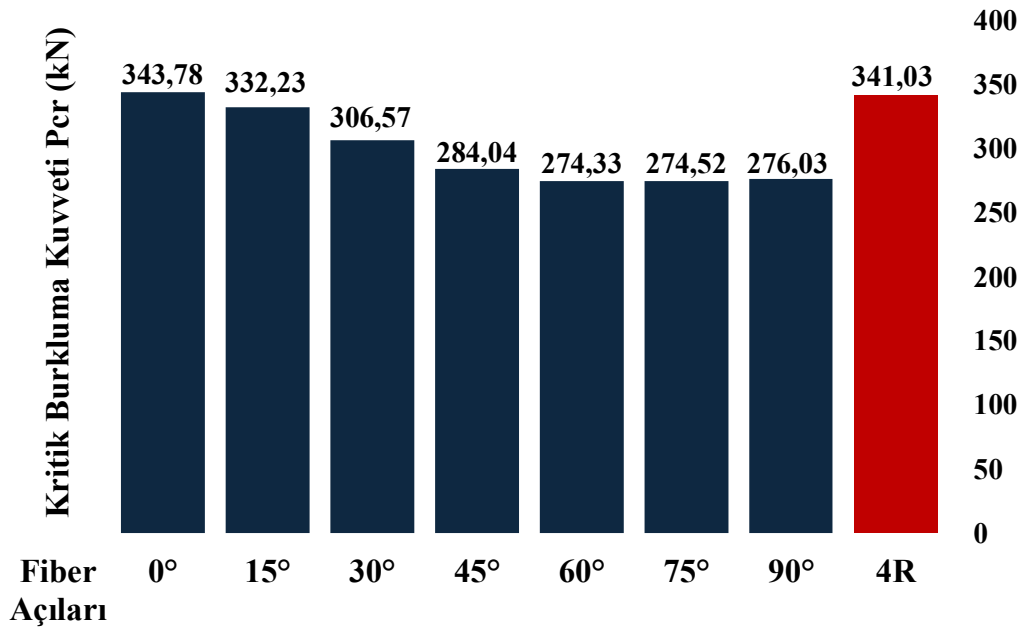
Şekil 6. 51 : 4GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 52 : 4GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



Şekil 6. 53 : 4GGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 54 : 4GGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.

Çizelge 6. 2 : 4 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN)

Fiber Açısı (°)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
4AAAAAA	482,8	442,99	360,97	296,67	271,07	270,36	273,25
4AACCGG	570,66	515,01	404,24	321,39	289,92	289,65	293,38
4ACACAC	693,5	609,56	450,44	338,65	298	297,5	302,05
4ACGACG	573,8	517,71	405,82	321,87	289,91	289,68	293,52
4AGCAGC	583,49	525,26	409,59	323,35	290,77	290,66	294,6
4CAGCAG	567,19	512,76	403,56	320,87	289,02	288,73	292,57
4CCCCCC	889,08	760,01	529	376,73	323,32	322,8	328,78
4CCGGAA	562,82	509,41	401,82	319,82	288	287,64	291,48
4GACGAC	585,63	526,81	410,16	323,38	290,66	290,56	294,52
4GAGAGA	415,83	390,46	336,21	291,3	272,71	272,52	274,92
4GCGCGC	629,79	562,92	431,87	335,69	299,8	299,91	304,38
4GGAACC	594,64	533,52	413,15	324,52	291,48	291,45	295,42
4GGGGGG	343,78	332,23	306,57	284,04	274,33	274,52	276,03
4R	341,037						

4 mm donatılı modellerin burkulma analizlerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de verilmiş olup, fiber yönelimi arttıkça (0°–90°) kritik burkulma kuvvetlerinde genel bir azalma eğilimi olduğunu açıkça göstermektedir. Liflerin eksenel yönde hizalandığı 0° yöneliminde tüm modellerde en yüksek dayanım değerleri elde edilmiş, fiber açısının artmasıyla birlikte eksenel rijitlik zayıflamış ve burkulma yükü kademeli olarak azalmıştır. Kompozit kaplama bulunmayan 4R referans modeli (341,03 kN) ile karşılaştırıldığında, 0° fiber yöneliminde en yüksek artış 4CCCCCC modelinde gözlenmiş ve yaklaşık %160 oranında bir dayanım artışı sağlanmıştır. Bu durum, karbon fiberin yüksek elastisite modülü sayesinde sistemin eksenel yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ve burkulma öncesi deformasyonları sınırladığını ortaya koymaktadır. Karbon ağırlıklı periyodik dizilim

yapısına sahip 4ACACAC modeli de 0° yöneliminde hibrit dizilimler arasında üst seviyede yer almıştır.

Hibrit dizilimler olan 4GGAACC, 4GACGAC, 4AGCAGC, 4ACGACG, 4AACCGG, 4CAGCAG, 4CCGGAA, 4GCGCGC ve 4GAGAGA modelleri de 0° yöneliminde yaklaşık %65–75 aralığında artış göstermiştir. Bu modellerde karbon tabakalarının kevlar ve cam fiberlerle dengeli şekilde kombinasyonu, sistemde yük paylaşımını optimize etmiş ve eksenel rijitliğe kayda değer katkı sağlamıştır. Karbon–Cam sıralı dizilime sahip 4GCGCGC modeli hibrit dizilimler arasında güçlü bir performans sergilerken, kevlar–cam esaslı 4GAGAGA modeli elastisite modülünün daha düşük olması nedeniyle daha sınırlı bir artış sunmuştur. Tam kevlar (4AAAAAA) modeli yaklaşık %41 artış ile orta düzeyde bir performans sergilemiş, tam cam fiberli (4GGGGGG) model ise neredeyse referans model ile aynı seviyede kalmıştır. Bu durum, cam fiberin düşük elastisite modülüne bağlı olarak eksenel yük taşıma kapasitesinin sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır.

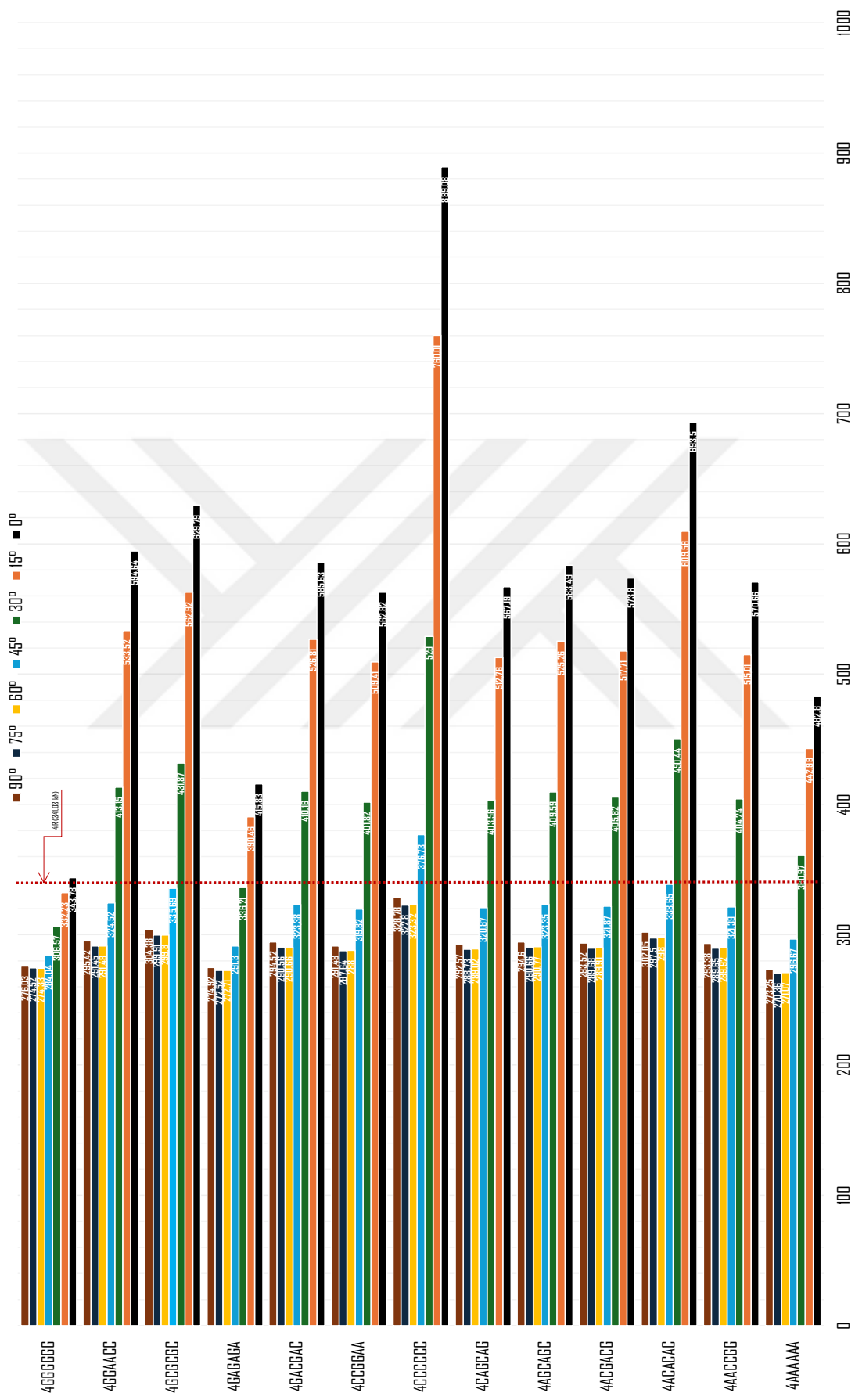
Fiber yöneliminin 15°–30° aralığına yükselmesiyle, karbon içeriği yüksek modellerde dayanım artışı azalmış olsa da hâlen pozitif seviyede kalmıştır. Bu davranış, 4ACACAC ve 4GCGCGC modellerinde belirgin şekilde gözlenmektedir. Buna karşın Kevlar ve Cam esaslı dizilimlerde bu aralıkta burkulma dayanımı hızlı biçimde düşmüştür. Bu eğilim, fiberlerin eksenden sapmasıyla yük aktarımının kısmen kesme doğrultusuna yönelmesinden ve sistemin eksenel rijitliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. 45° yöneliminde ise yalnızca 4CCCCC modeli 4R'ye kıyasla pozitif farkını koruyabilmiş, diğer tüm modellerin dayanımı referansın altına düşmüştür. Karbon tabakalarının belirgin etkisi sayesinde 4ACACAC modeli bu açıya kadar dayanımını nispeten daha iyi seviyede korumuştur.

60° ve üzeri fiber açılarında tüm modellerde burkulma dayanımı azalmaya devam etmiş, ancak karbon oranı yüksek dizilimler bu düşüşü sınırlı seviyede tutmuştur. Örneğin 4CCCCC modeli, 60°–90° aralığında yalnızca %4–6 civarında bir azalma göstermiştir. Bu eğilim 4ACACAC ve 4GCGCGC modellerinde de benzer şekilde izlenmiştir. Buna karşılık kevlar ve cam fiberli sistemlerde (özellikle 4GAGAGA ve 4AAAAAA) burkulma dayanımı bu açılarda %20'nin üzerinde azalmıştır. Özellikle 75° yöneliminde tüm modellerde minimum dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu düşüş, liflerin yük taşıma doğrultusundan uzaklaşması ve yük aktarımının büyük ölçüde matris malzeme tarafından karşılanmasıyla

ilişkilidir. Bu açı aralığında liflerin eksenel yönde taşıyıcı rolü zayıfladığı için sistemin genel rijitliği azalmakta, burkulma kapasitesi minimuma inmektedir.

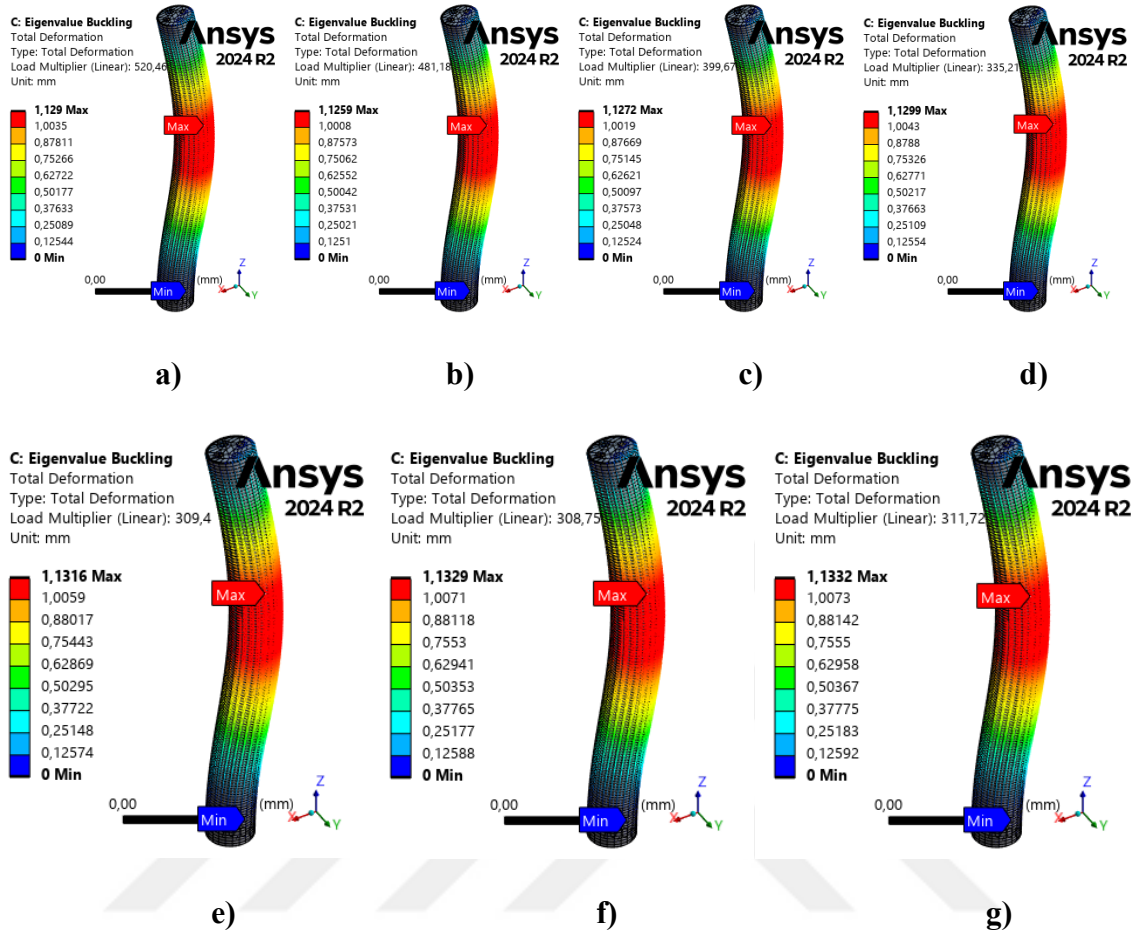
90° yöneliminde, liflerin tamamen çevresel hizalanması sonucunda sistemde kısmi bir rijitlik artışı gözlenmiş ve dayanım 75°'teki minimum noktadan sonra hafifçe toparlanmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 4 mm donatılı hibrit kompozit kolonlarda karbon oranının artırılması ve fiber yöneliminin eksenel bileşene yakın seçilmesi burkulma dayanımını belirgin biçimde yükseltmektedir. 4CCCCC modeli tüm açılarda en yüksek performansı gösterirken, hibrit modellerden 4GGAACC, 4GACGAC ve karbon ağırlıklı 4ACACAC modeli özellikle 0°–30° aralığında en dengeli sonuçları sunmuştur. Buna karşın kevlar ve cam ağırlıklı modellerde artış oranları düşük kalmış ve yüksek açılarda belirgin dayanım kayıpları görülmüştür. Sonuçlar, liflerin yönelimi ve kompozit tabaka diziliminin burkulma davranışının belirlenmesinde en kritik tasarım parametreleri arasında olduğunu ortaya koymaktadır.

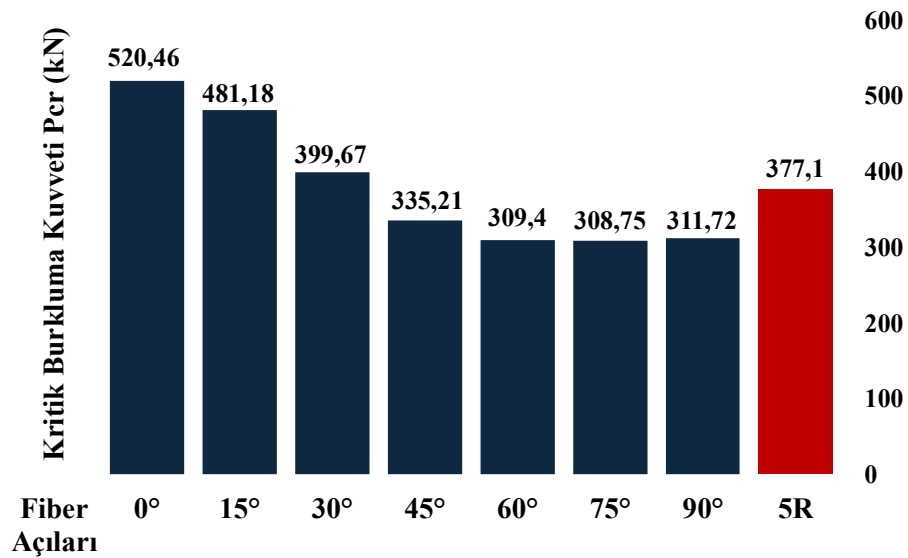


Şekil 6. 55 : 4 mm donatılı tüm konfigürasyonların fiber açılmasına göre kritik burkulma kuvvetlerinin (P_{krit} , kN) genel karşılaştırma grafiği.

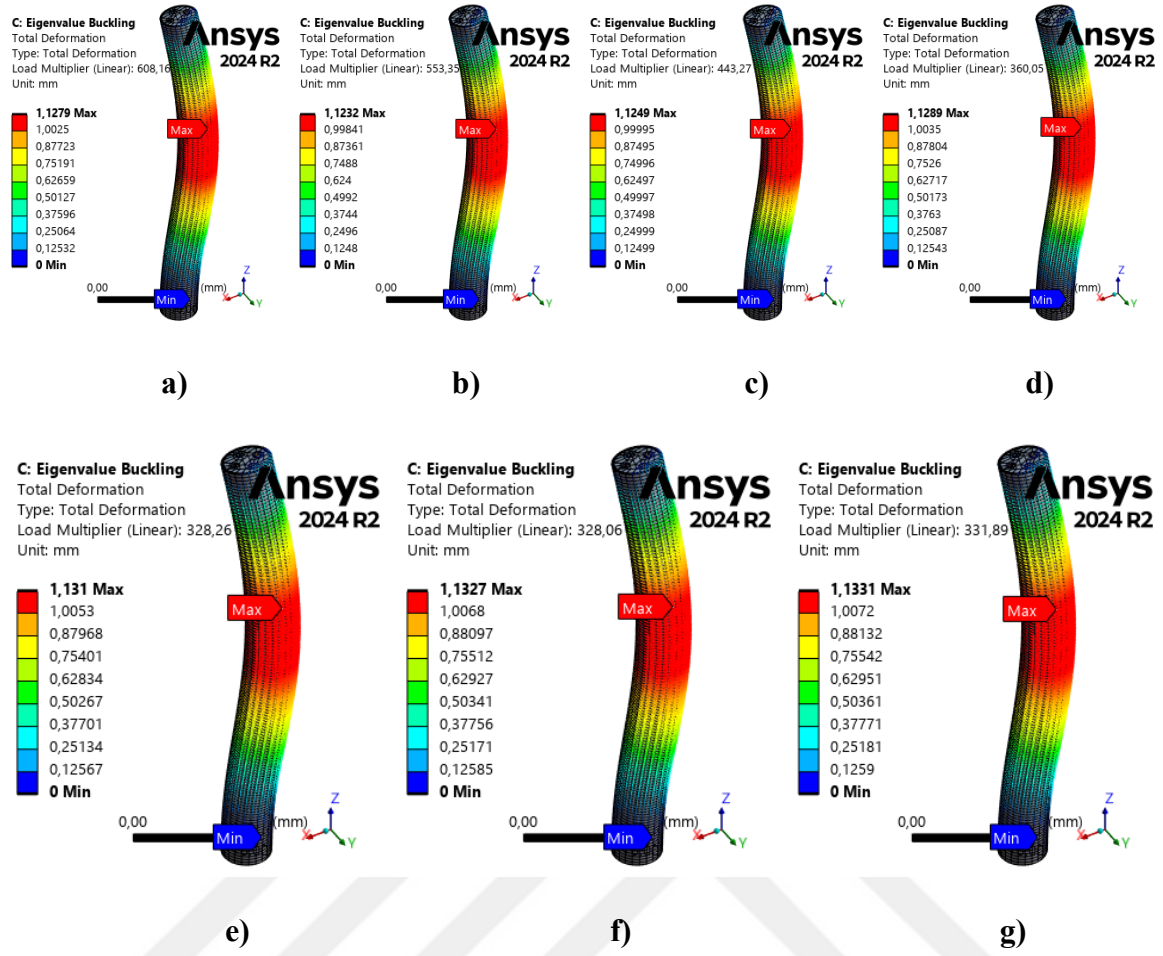
6.2.3 Donatı çapı 5 mm olan kompozit yapıların burkulma analizleri



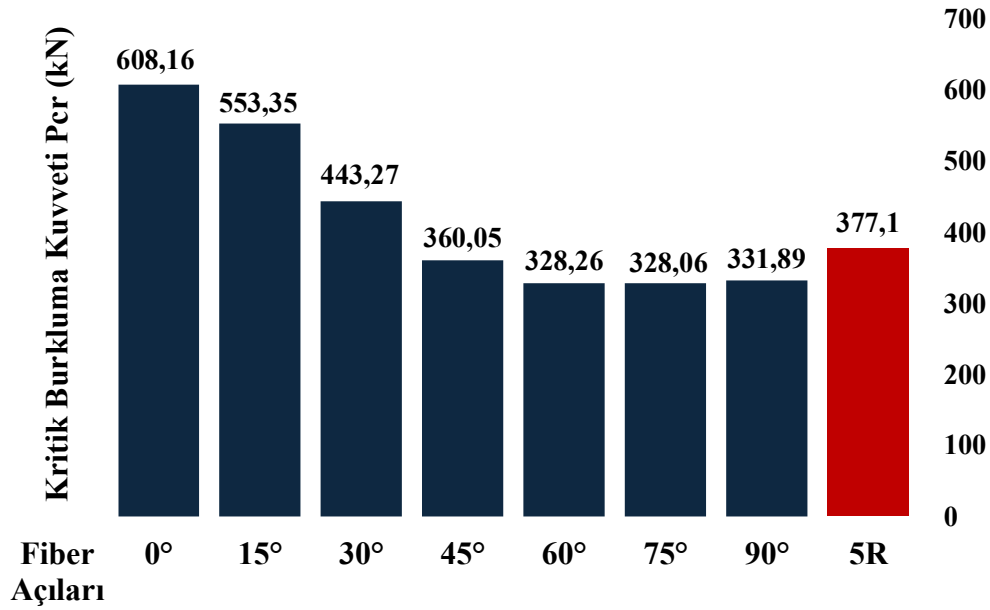
Şekil 6. 56 : 5AAAAAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



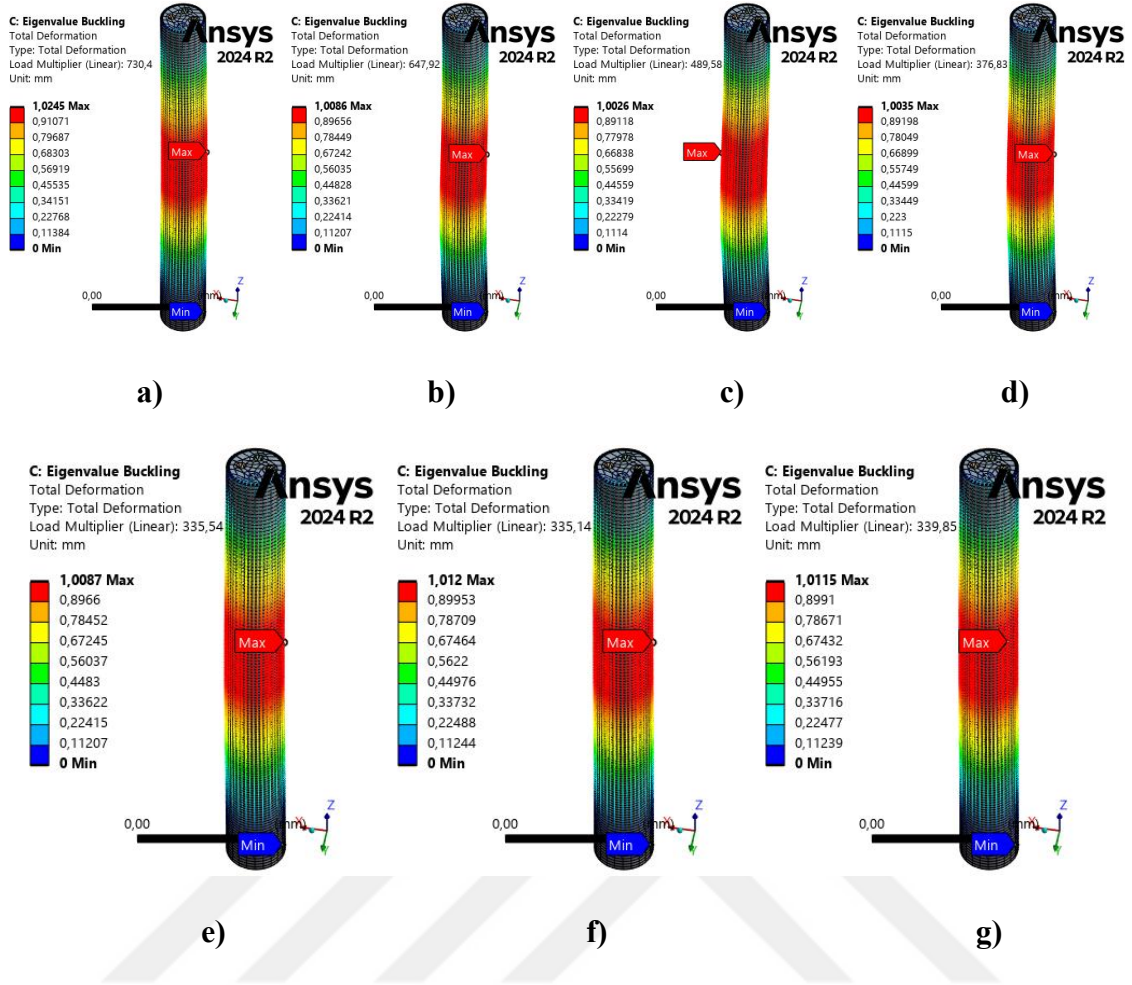
Şekil 6. 57 : 5AAAAAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



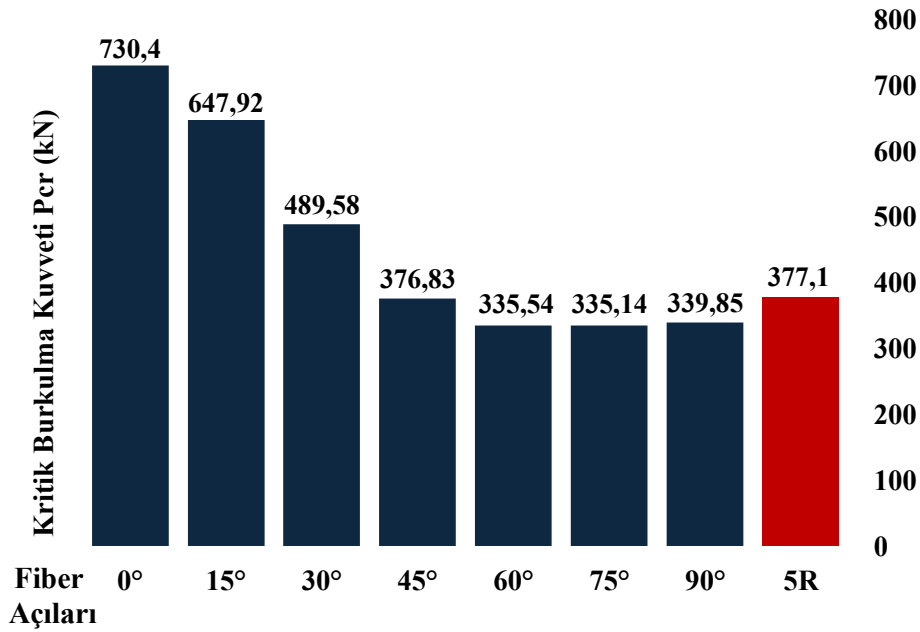
Şekil 6. 58 : 5AACCGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



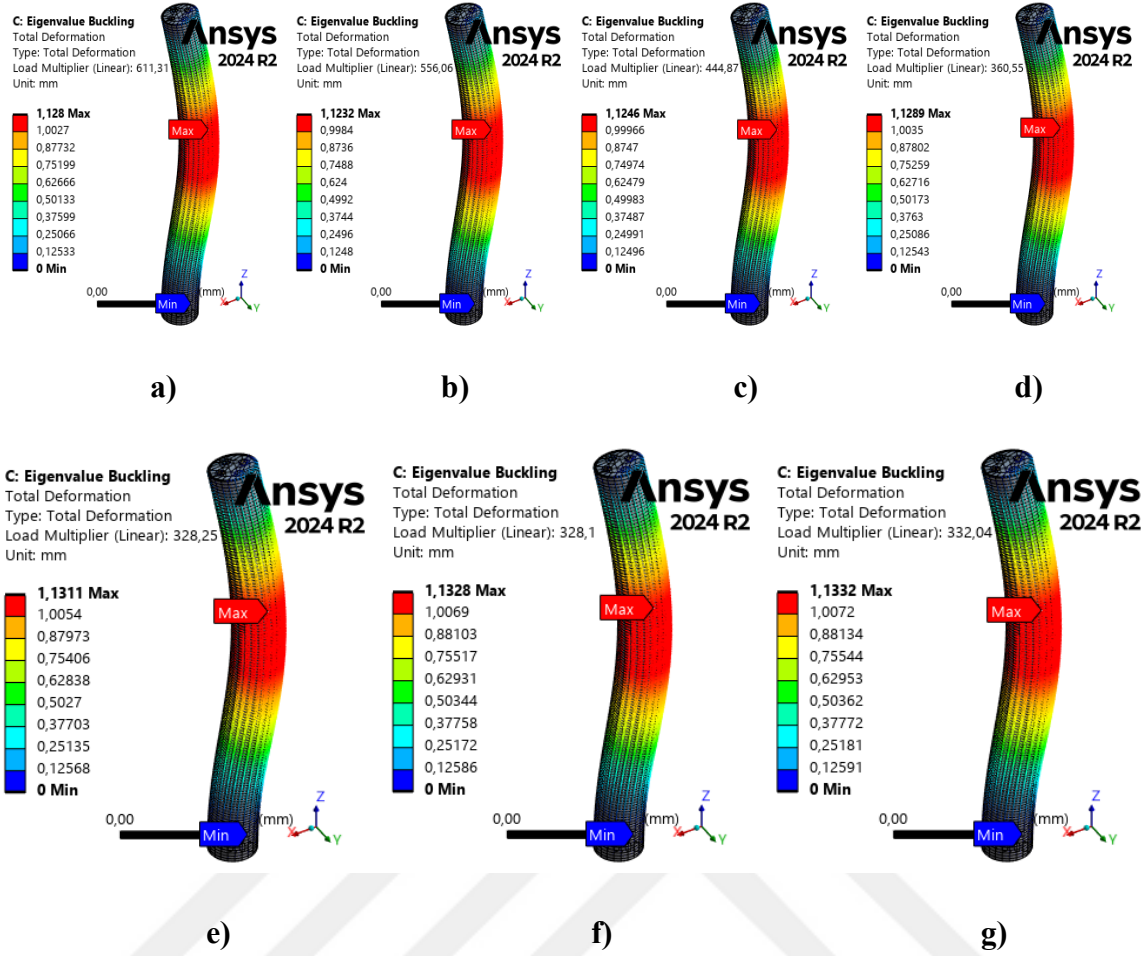
Şekil 6. 59 : 5AACCGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



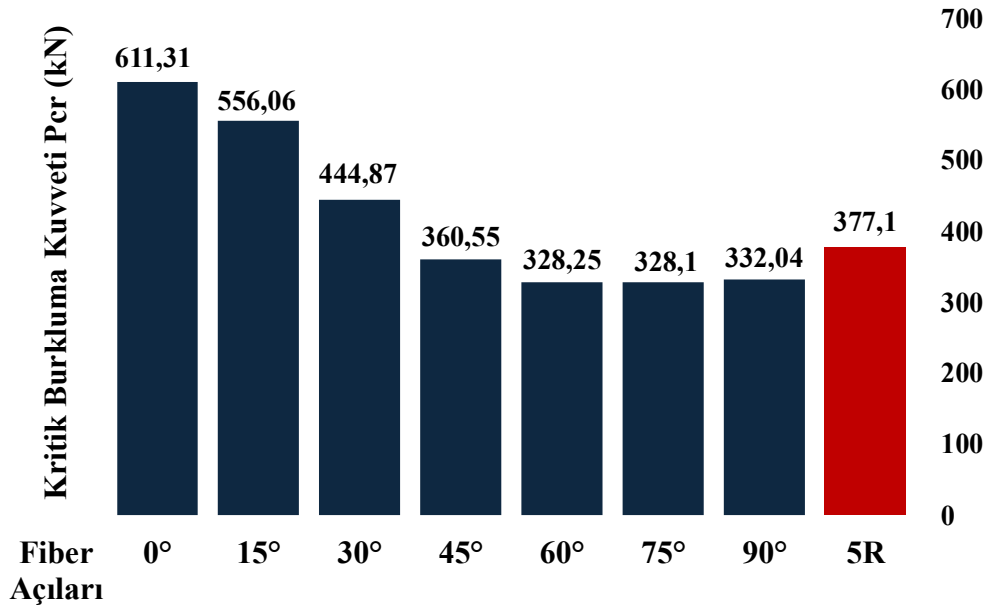
Şekil 6. 60 : 5ACACAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



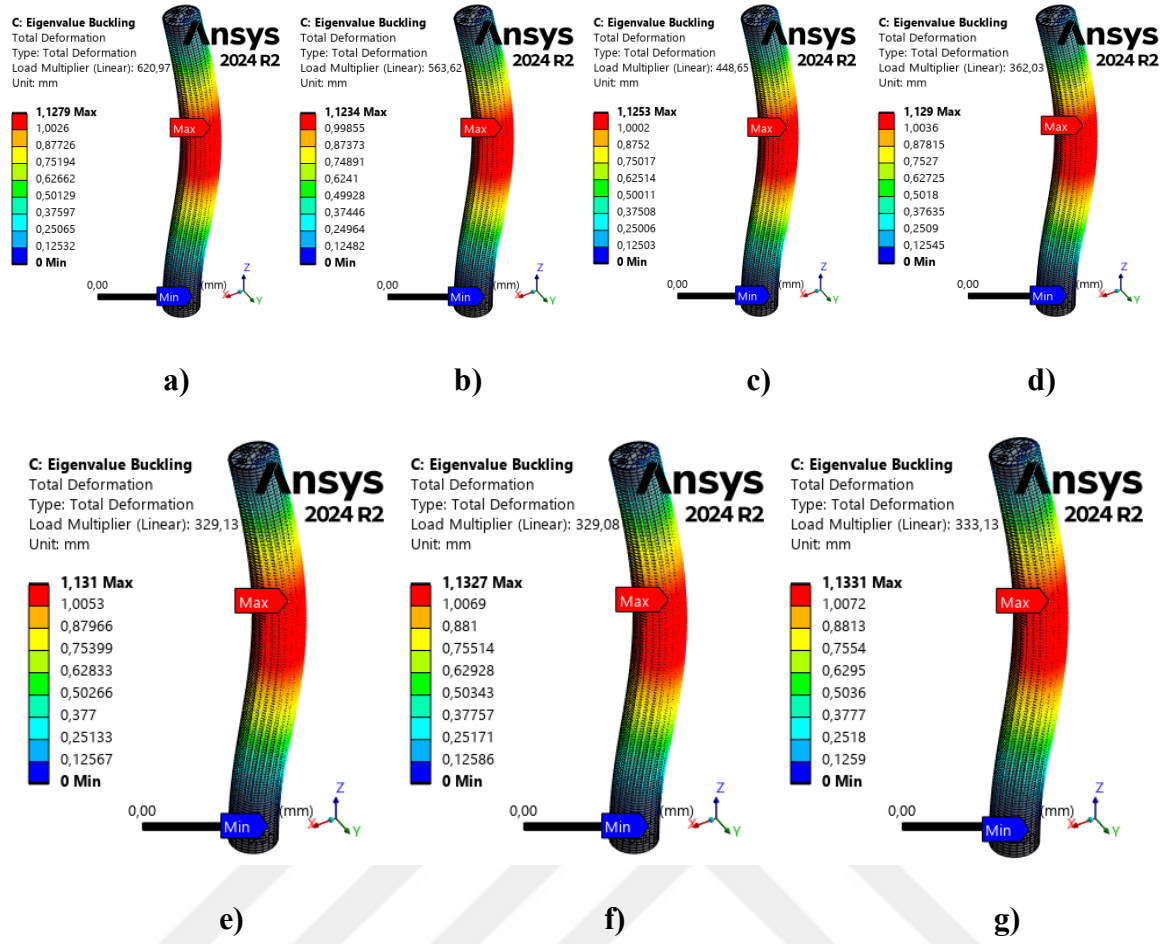
Şekil 6. 61 : 5ACACAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



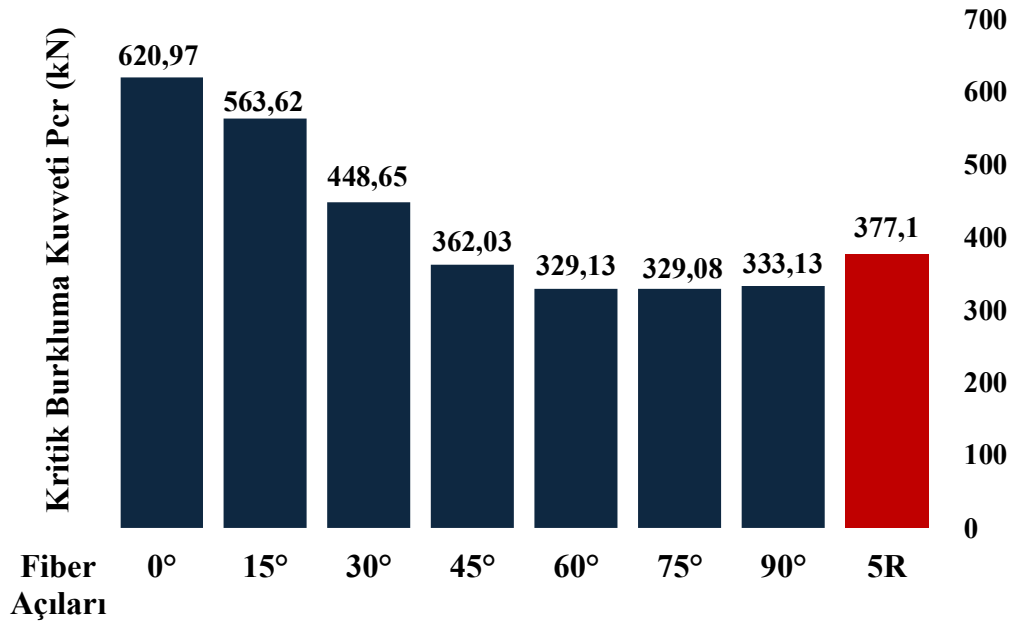
Şekil 6. 62 : 5ACGACG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



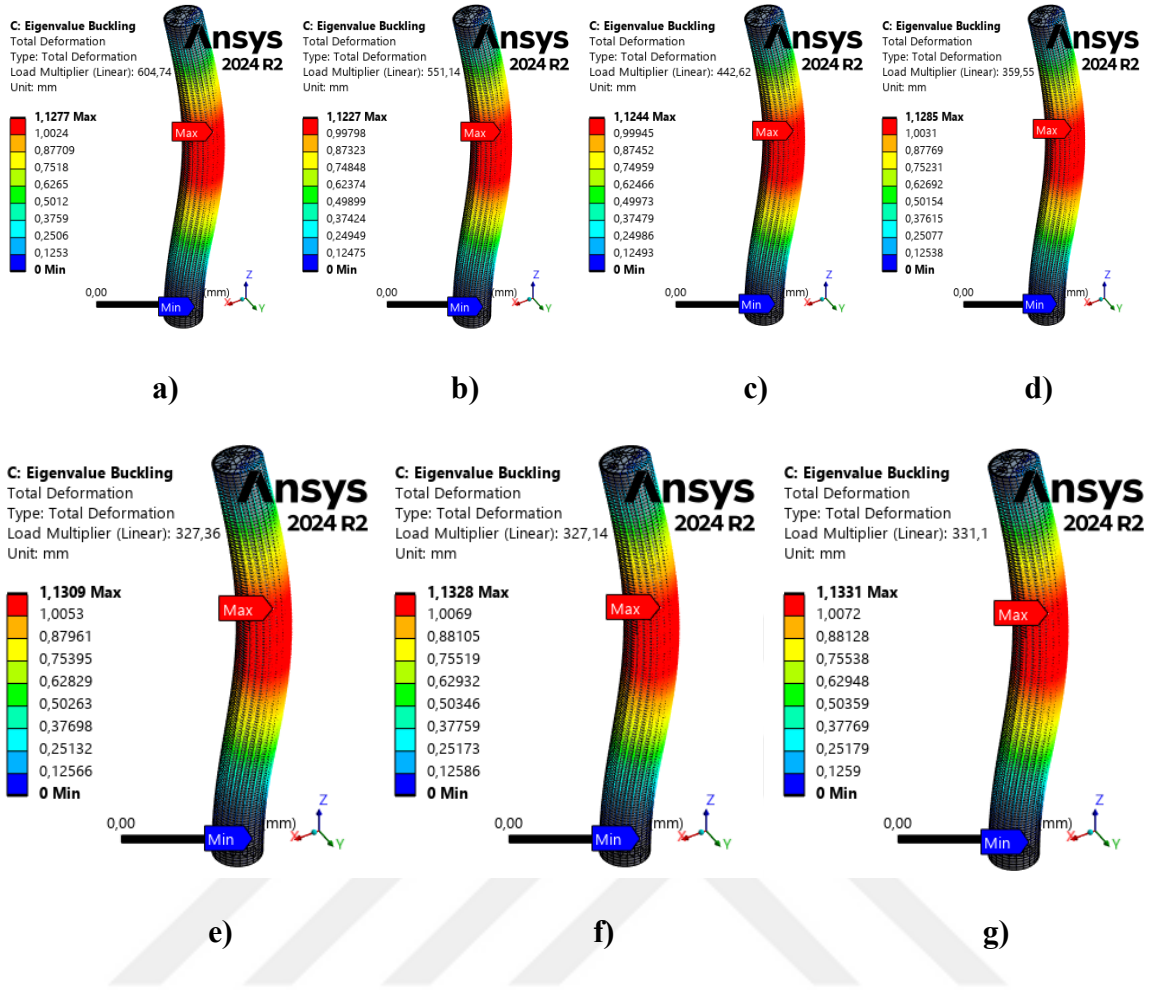
Şekil 6. 63 : 5ACGACG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



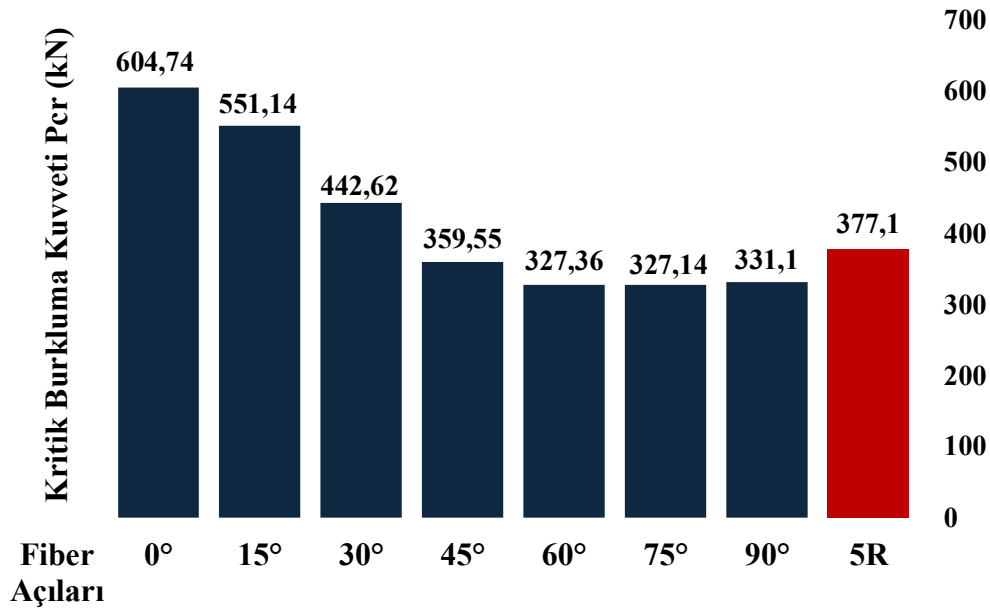
Şekil 6. 64 : 5AGCAGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



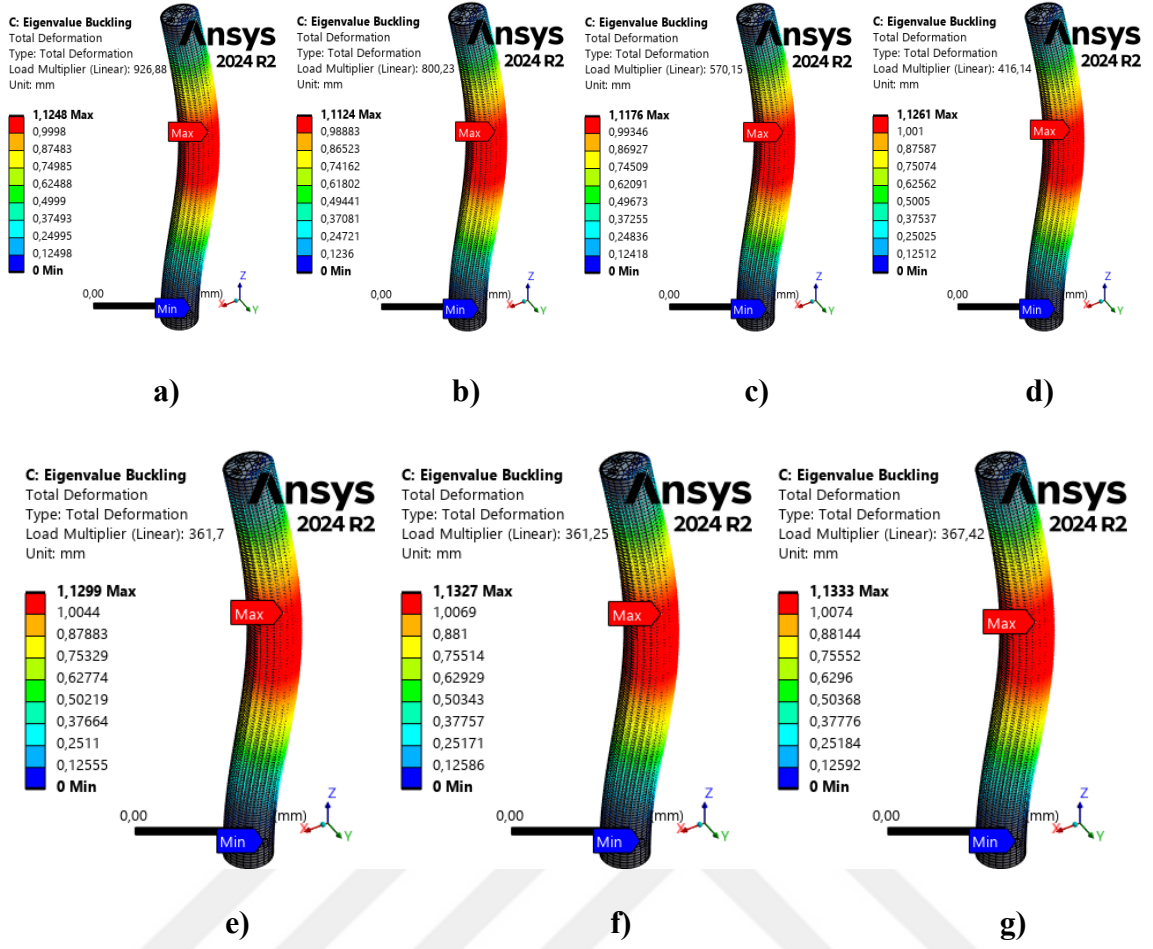
Şekil 6. 65 : 5AGCAGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



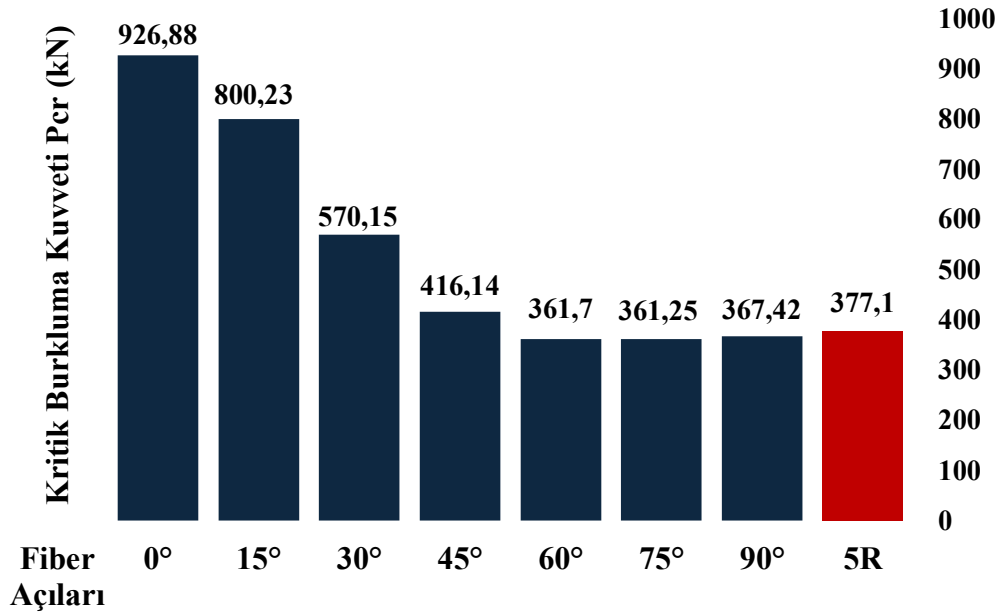
Şekil 6. 66 : 5CAGCAG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



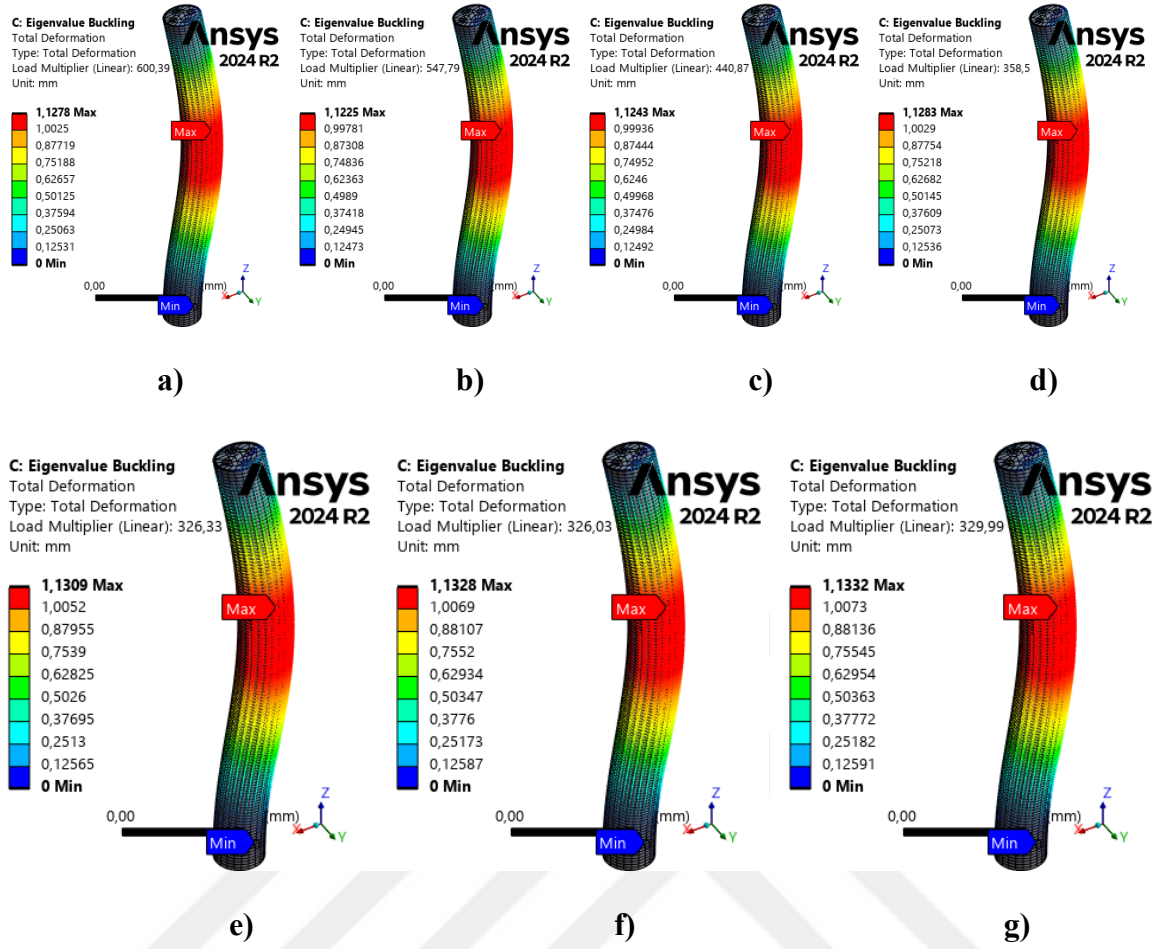
Şekil 6. 67 : 5CAGCAG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



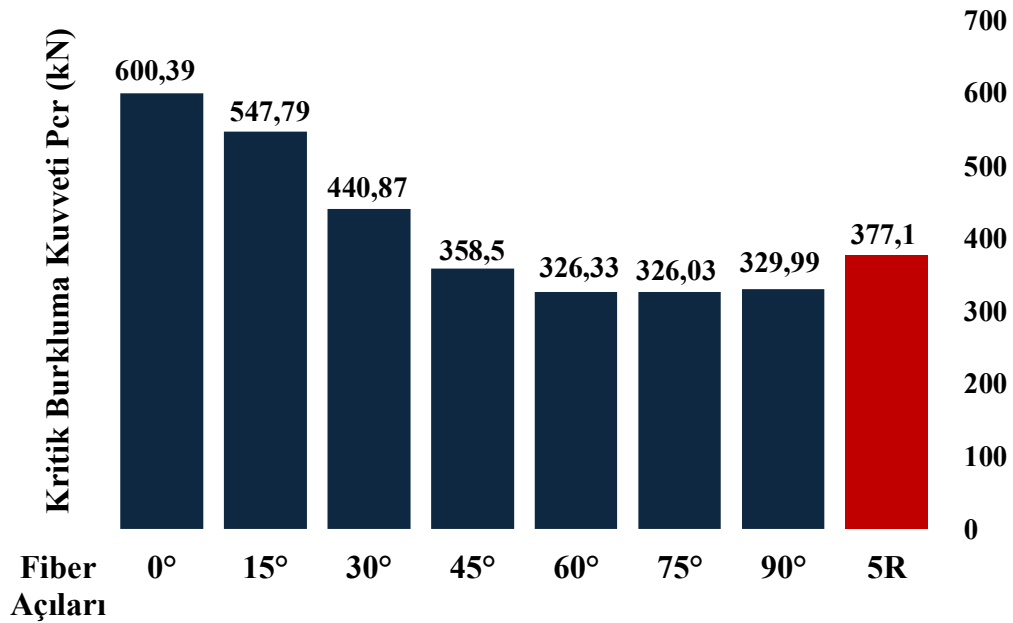
Şekil 6. 68 : 5CCCCC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



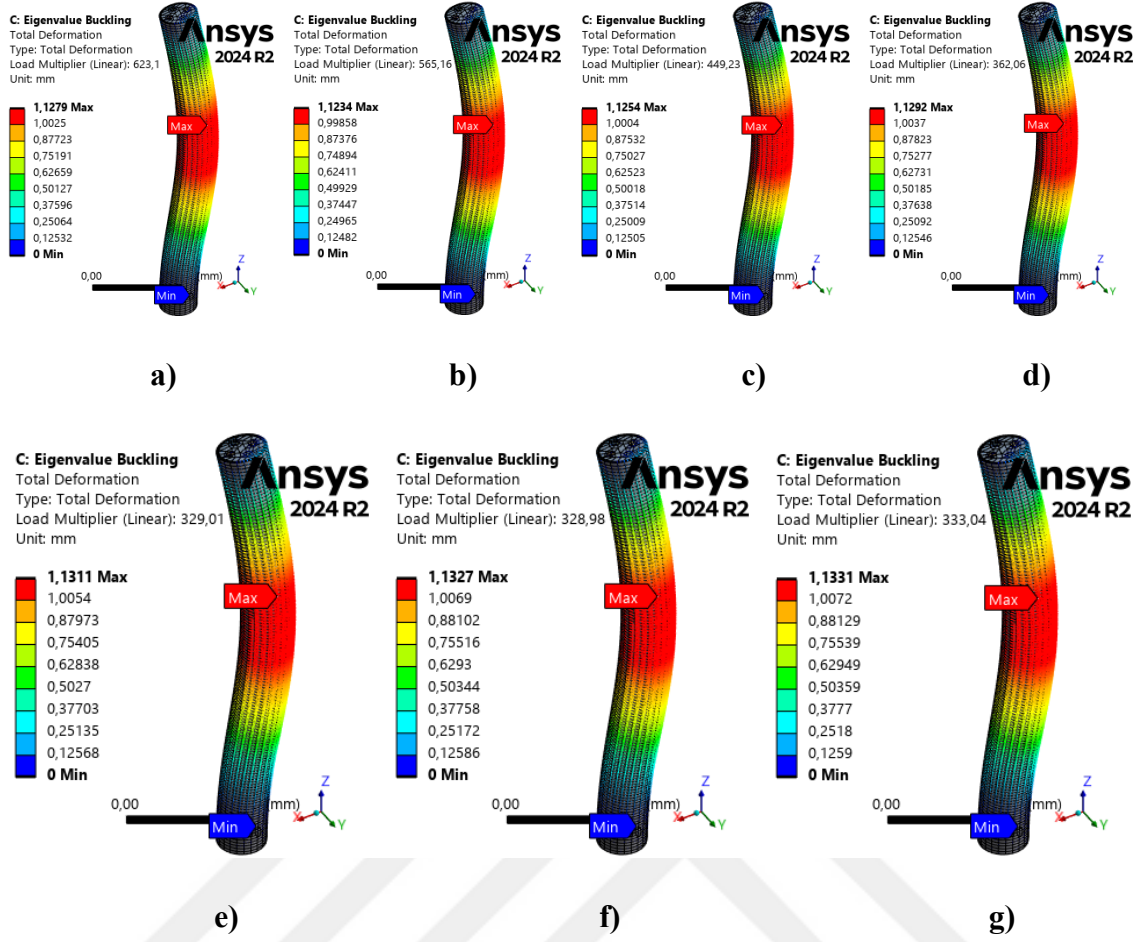
Şekil 6. 69 : 5CCCCC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



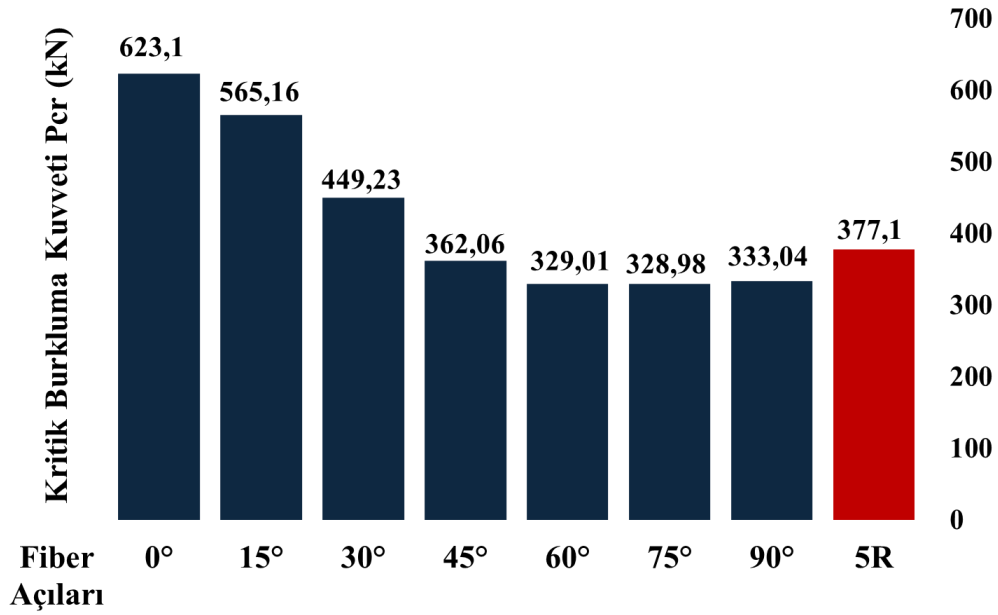
Şekil 6. 70 : 5CCGGAA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



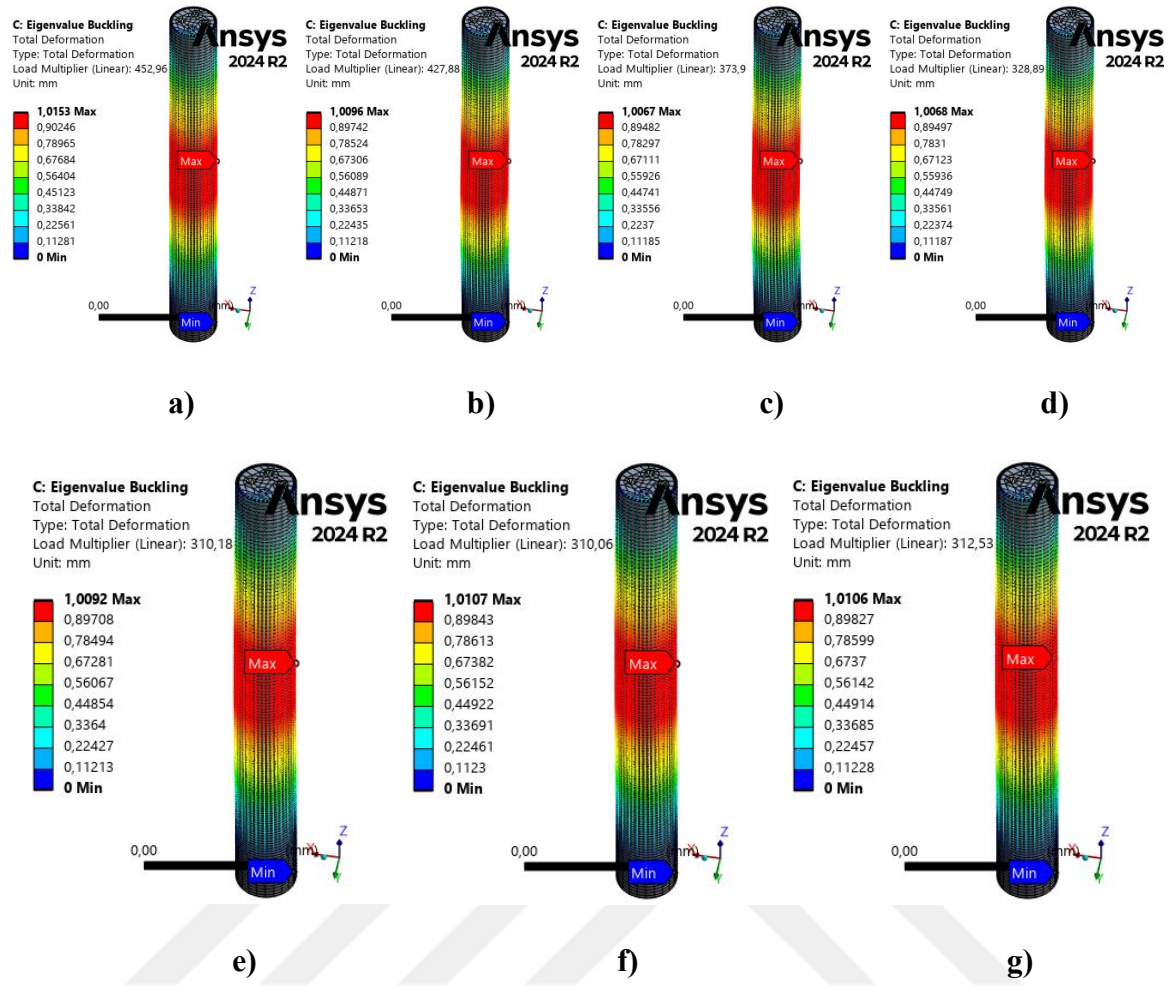
Şekil 6. 71 : 5CCGGAA kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



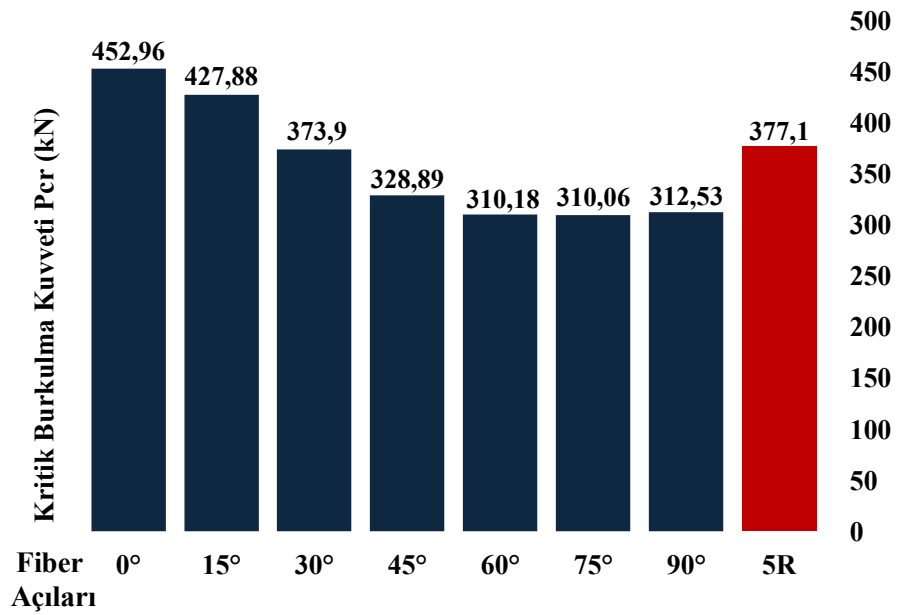
Şekil 6. 72 : 5GACGAC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



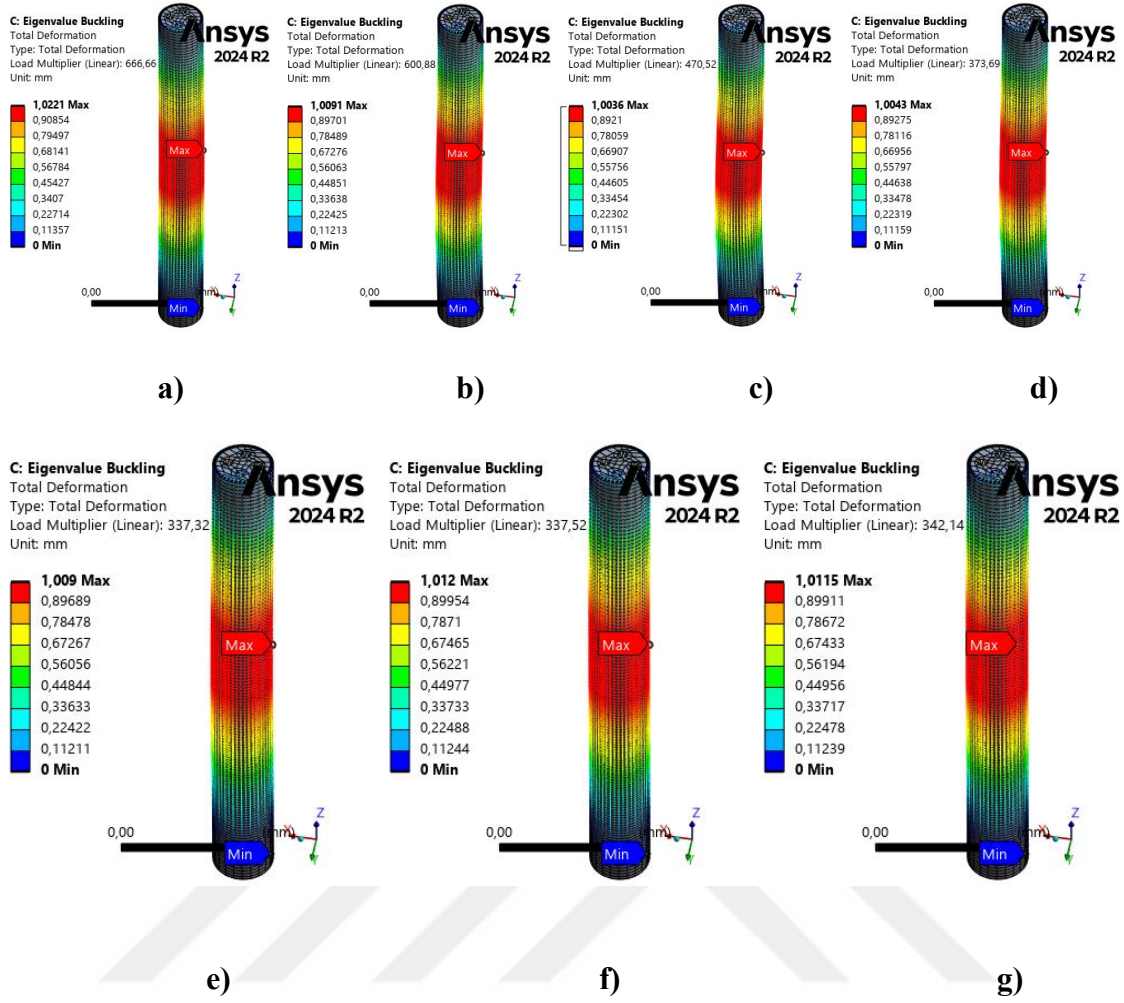
Şekil 6. 73 : 5GACGAC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



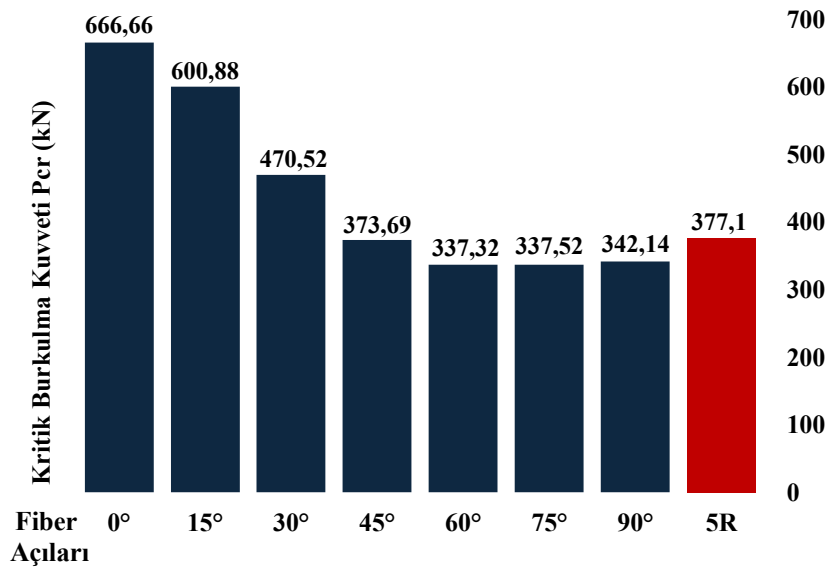
Şekil 6. 74 : 5GAGAGA modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



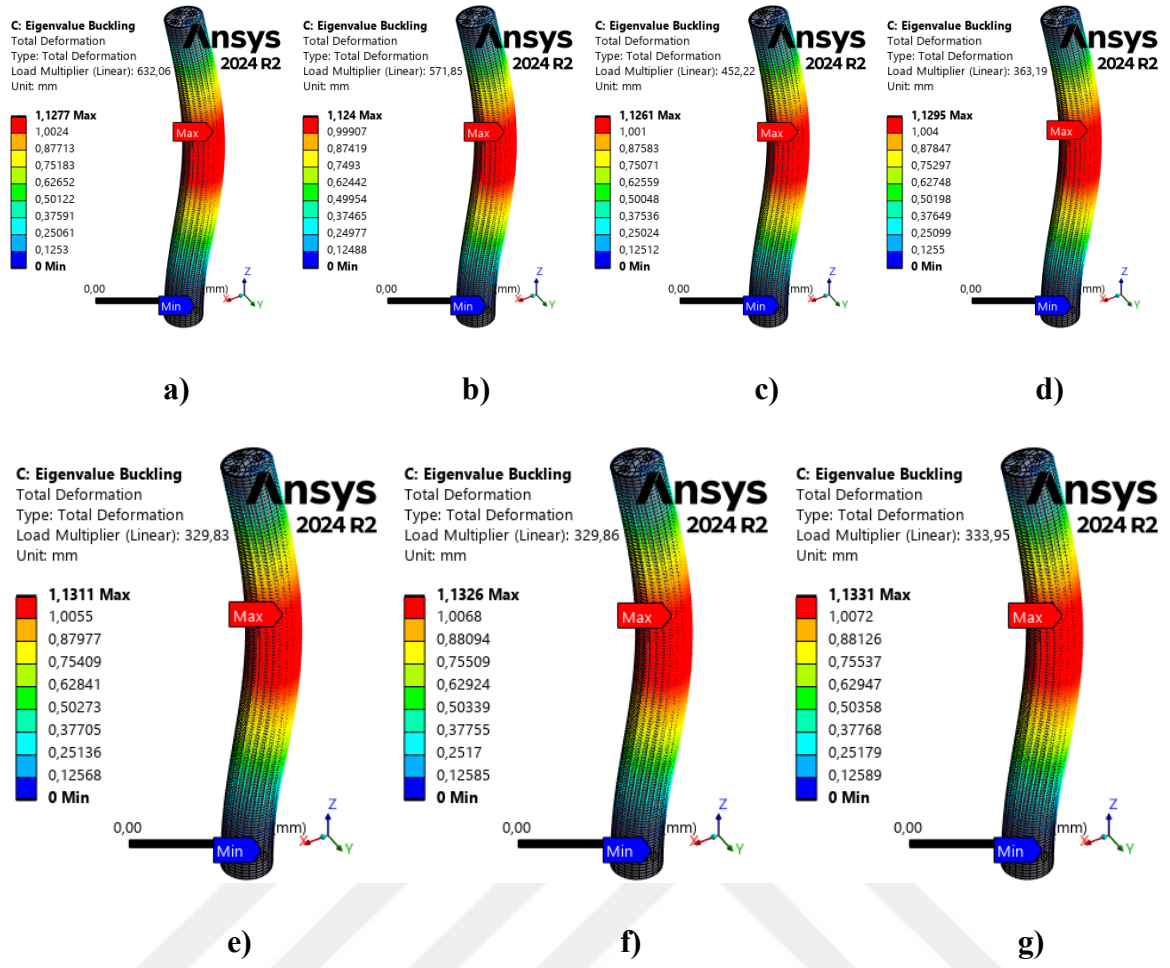
Şekil 6. 75 : 5GAGAGA modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



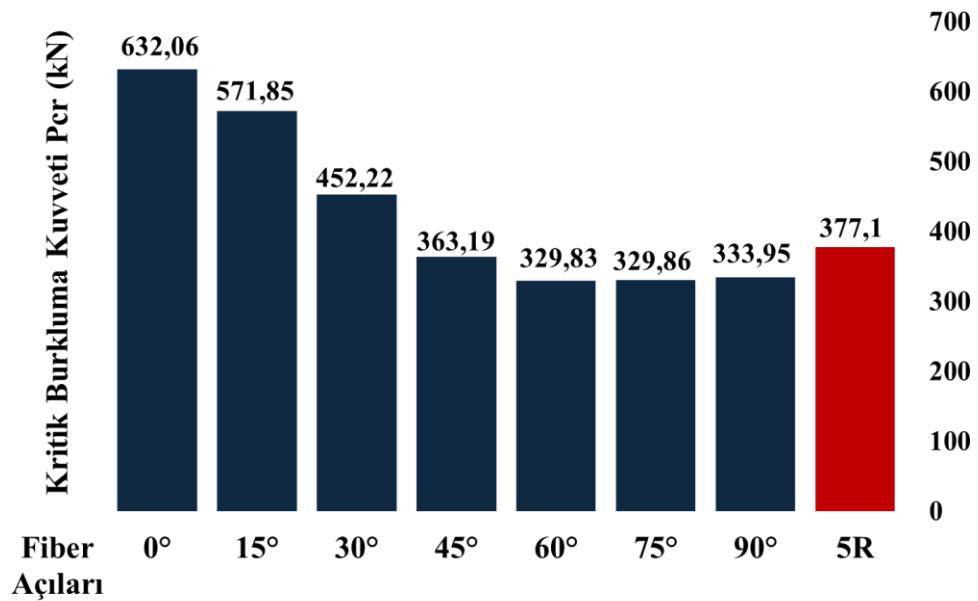
Şekil 6. 76 : 5GCGCGC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



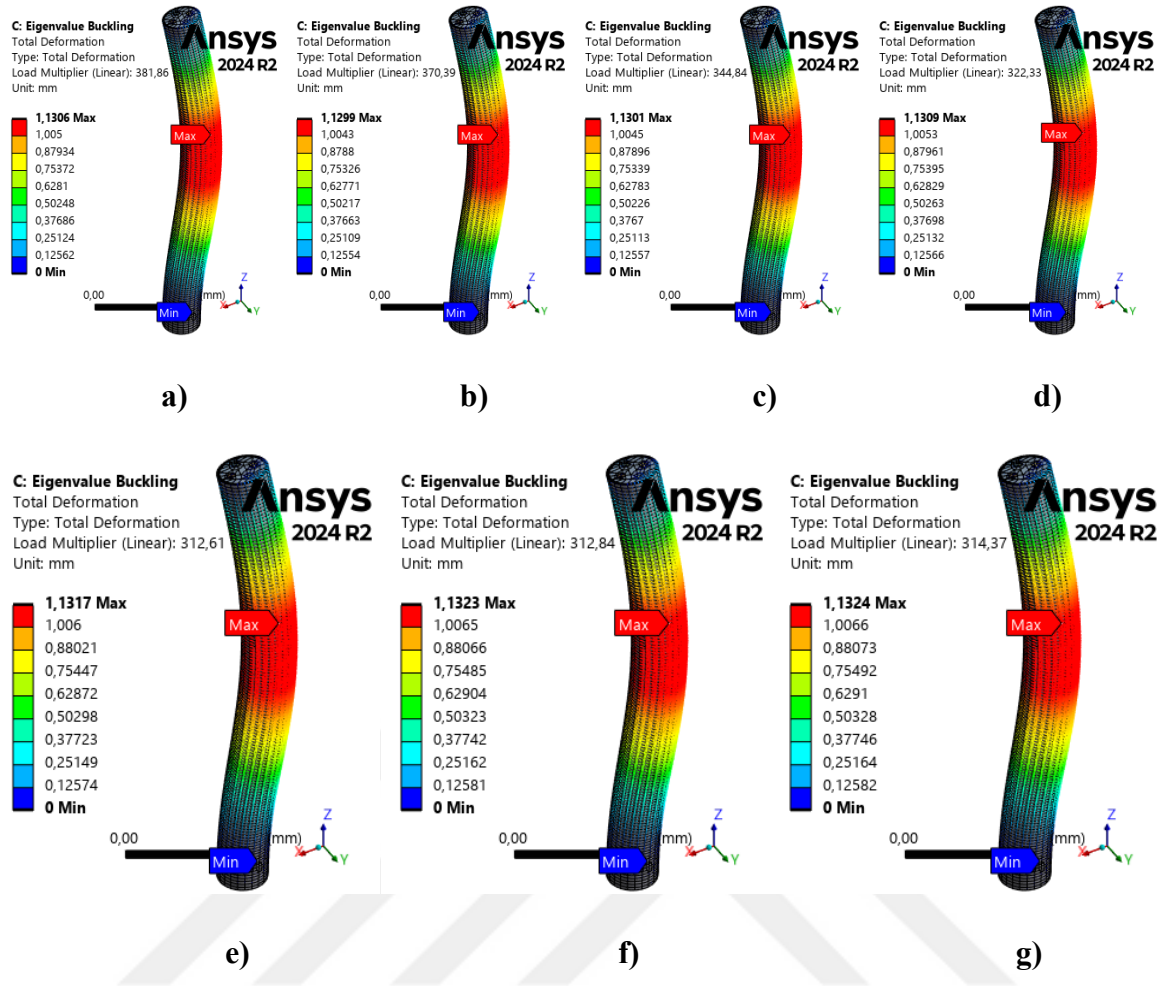
Şekil 6. 77 : 5GCGCGC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



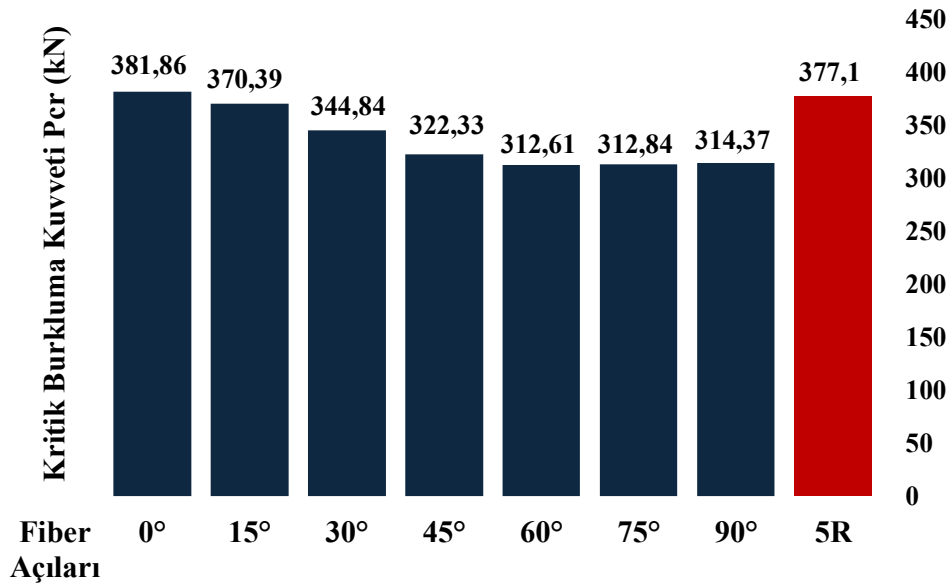
Şekil 6. 78 : 5GGAACC modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 79 : 5GGAACC kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.



Şekil 6. 80 : 5GGGGGGG modelinin farklı fiber yönelim açılarında (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75° ve (g) 90° burkulma sonuç şekilleri.



Şekil 6. 81 : 5GGGGGGG kompozit modelin burkulma analizi sonuç grafiği.

Çizelge 6. 3 : 5 mm Donatılı Kompozit Modellerin Farklı Fiber Yönelim Açılarına Göre Kritik Burkulma Kuvvetleri ($P_{(kr)}$, kN).

Fiber Açısı (°)	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
5AAAAAA	520,46	481,18	399,67	335,21	309,4	308,75	311,72
5AACCGG	608,16	553,35	443,27	360,05	328,26	328,06	331,89
5ACACAC	730,4	647,92	489,58	376,83	335,54	335,14	339,85
5ACGACG	611,31	556,06	444,87	360,55	328,25	328,1	332,04
5AGCAGC	620,97	563,62	448,65	362,03	329,13	329,08	333,13
5CAGCAG	604,74	551,14	442,62	359,55	327,36	327,14	331,1
5CCCCCC	926,88	800,23	570,15	416,14	361,7	361,25	367,42
5CCGGAA	600,39	547,79	440,87	358,5	326,33	326,03	329,99
5GACGAC	623,1	565,16	449,23	362,06	329,01	328,98	333,04
5GAGAGA	452,96	427,88	373,9	328,89	310,18	310,06	312,53
5GCGCGC	666,66	600,88	470,52	373,69	337,32	337,52	342,14
5GGAACC	632,06	571,85	452,22	363,19	329,89	329,86	333,95
5GGGGGG	381,86	370,39	344,84	322,33	312,61	312,84	314,37
5R	377,1						

5 mm donatılı modellerin burkulma analizlerinden elde edilen sonuçlar, fiber yönelimi arttıkça (0° – 90°) kritik burkulma kuvvetlerinde belirgin bir azalma eğilimi olduğunu ortaya koymaktadır. Liflerin eksenel yönde hizalandığı 0° fiber yöneliminde tüm modellerde maksimum dayanım değerleri elde edilmiş; fiber açısının artmasıyla birlikte eksenel rijitlik azalmış ve burkulma yükü kademeli olarak düşmüştür. Kompozit kaplama bulunmayan 5R referans modeli (377,1 kN) ile karşılaştırıldığında, en yüksek artış 5CCCCCC modelinde gözlenmiş ve yaklaşık %146 oranında bir dayanım artışı sağlanmıştır. Bu sonuç, karbon fiberin yüksek elastisite modülü sayesinde eksenel yönde yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ve sistemin burkulma öncesi kararlılığını güçlendirdiğini göstermektedir. Karbon ağırlıklı periyodik dizilim yapısına sahip 5ACACAC modeli de 0° yöneliminde hibrit dizilimler arasında üst seviyede yer almıştır.

Hibrit dizilimler (5GGAACC, 5GACGAC, 5AGCAGC, 5ACGACG, 5AACCGG, 5CAGCAG, 5CCGGAA, 5GCGCGC ve 5GAGAGA) 0° yöneliminde yaklaşık %60–68 oranında artış göstermiştir. Bu modellerde karbon, kevlar ve cam fiberlerin birlikte kullanılması, sistemdeki yük paylaşımını dengelemiş ve eksenel rijitliğe önemli katkı sağlamıştır. Karbon–cam sıralı dizilim yapısına sahip 5GCGCGC modeli hibrit grupta güçlü performans sergilerken; kevlar–cam esaslı 5GAGAGA modeli elastisite modülünün daha düşük olması nedeniyle daha sınırlı bir artış sunmuştur. Tam kevlar (5AAAAAA) modeli %38 oranında artışla orta düzeyde bir iyileşme sunarken, tam cam fiberli (5GGGGGG) modelde artış oranı %1 civarında kalmış ve referans modele oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. Bu fark, cam fiberin düşük elastisite modülünden kaynaklanmaktadır.

Fiber yönelimi 15°–30° aralığına yükseldiğinde, tüm modellerde dayanım azalmaya başlamış ancak karbon oranı yüksek modeller bu aralıkta bile görece yüksek değerlerini korumuştur. 5CCCCCC modelinde bu açılarda 0° konumuna göre yaklaşık %13–37 arasında bir düşüş gözlenmiştir. Hibrit modellerde azalma daha belirgin olup ortalama %20–25 seviyesindedir. Bu eğilim, liflerin eksenel sapmasıyla birlikte yükün bir kısmının kesme yönüne aktarılması sonucu eksenel rijitliğin azalmasıyla açıklanabilir. Fiber açısı büyüdükçe, liflerin yük taşıma yönünden uzaklaşması sistemin genel stabilitesini zayıflatmaktadır. Bu davranış, karbon ağırlıklı 5ACACAC ve 5GCGCGC dizilimlerinde daha sınırlı seviyede görülmektedir.

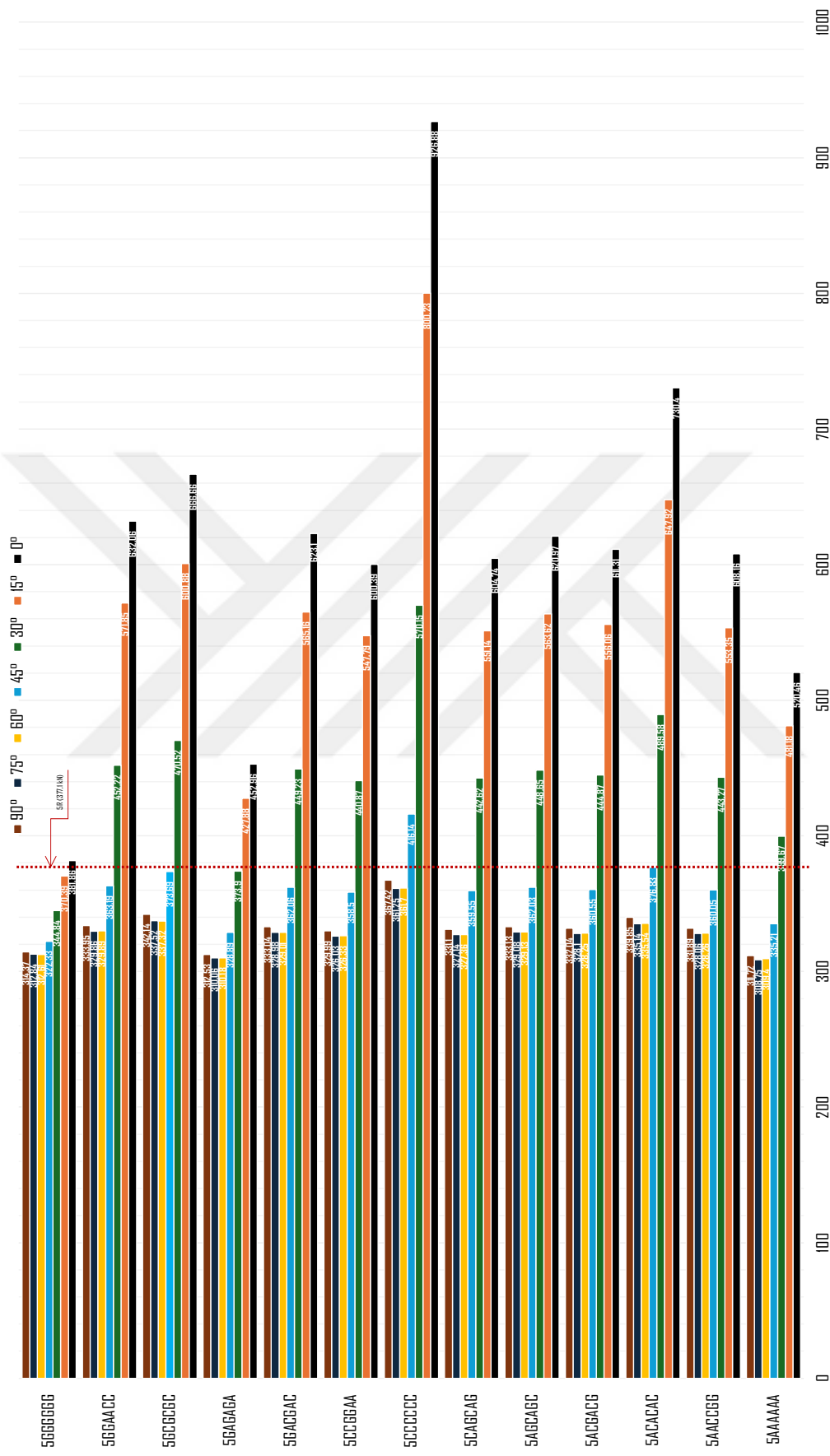
45° yönelimi itibarıyla karbon içeriği yüksek modellerin dahi dayanım kayıpları artmıştır. Bu açıdan sonra fiberler basınç yükünü doğrudan taşımak yerine matrise bağlı olarak dolaylı şekilde yük aktarımı yapmaya başlamıştır. 5CCCCCC modeli 416,14 kN ile referansın üzerinde kalmış olsa da, diğer tüm hibrit modellerin dayanımı 377,1 kN'nin altına düşmüştür. Bu, karbon oranı düşük dizilimlerde matris etkisinin artması ve yük aktarımının zayıflamasıyla ilişkilidir. Bu noktada 5ACACAC modelinin dayanımını daha iyi koruduğu görülmektedir.

60°–90° fiber yönelimlerinde, tüm modellerde burkulma dayanımı azalmaya devam etmiş, ancak karbon oranı yüksek modellerin bu düşüşü sınırlı kalmıştır. 5CCCCCC modeli bu aralıkta yalnızca %4–6 civarında azalma göstermiştir. Benzer şekilde 5ACACAC ve 5GCGCGC modellerinde de bu açılarda düşüş sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. Hibrit modellerde (özellikle 5GGAACC, 5GACGAC ve 5AGCAGC) düşüş %10–15, kevlar ve cam esaslı sistemlerde ise %18–22 arasında gerçekleşmiştir. Özellikle 75° yönelimi, tüm modellerde en düşük burkulma dayanımının görüldüğü kritik bölge olmuştur. Bu durumda

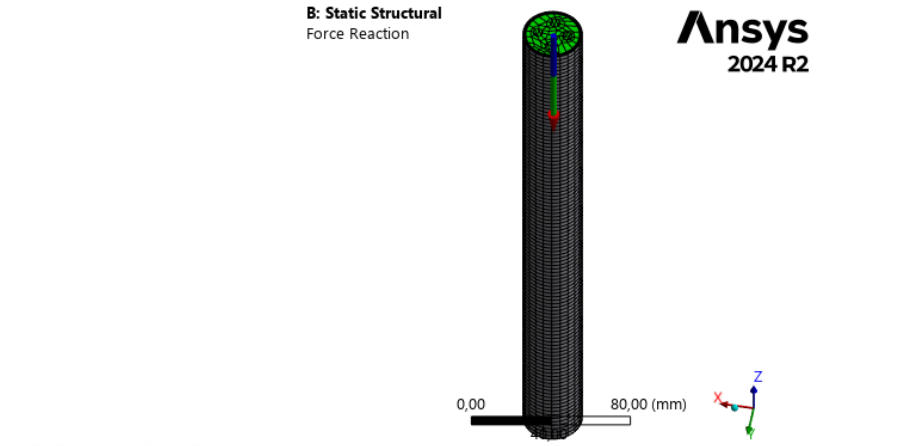
liflerin aksel doğrultudan tamamen sapması nedeniyle yükün büyük kısmı epoksi matris tarafından taşınmakta, sistemin rijitliği önemli ölçüde azalmaktadır.

90° yöneliminde, liflerin tamamen çevresel yönde dizilmesi sonucu sistemde kısmi bir rijitlik toparlanması gözlenmiştir. Bu durum, çevresel fiberlerin dış katmanlarda oluşturduğu halkasal sıkıştırma etkisi ile açıklanabilir. Bu sayede 75°teki minimum noktadan sonra dayanım değerleri hafif bir artış göstermiştir.



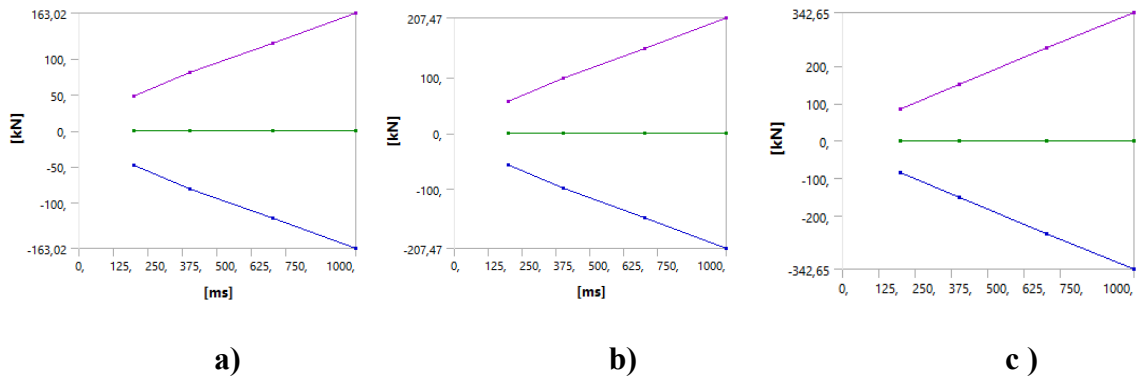


6.3 Kompozit Malzemler ve Referans Modelin Rijitlik Süneklik Analizleri



Şekil 6. 83 : Force Reaction analizi görünümü.

Konfigürasyonların süneklik ve gevreklik eğilimlerini karşılaştırmak amacıyla tüm modeller üzerine Şekil 6.83'deki kontrollü deplasman kontrollü eksenel yükleme uygulanmıştır. Bu yöntemde, üst mesnet yüzeyine 2 mm eksenel kısılma (uygulanan deplasman) tanımlanmış ve sistemin bu sabit deformasyon altında ürettiği toplam reaksiyon kuvveti (Force Reaction–Total) hesaplanmıştır. Aynı deplasman altında oluşan reaksiyon kuvvetinin büyüklüğü, kolonun eksenel rijitliğini doğrudan yansıttığından, daha yüksek reaksiyon kuvveti daha rijit ve gevrek davranış eğilimini, daha düşük reaksiyon kuvveti ise daha esnek ve sünek davranış eğilimini göstermektedir. Böylece malzeme türü ve fiber dizilimlerinin kolon davranışına etkisi, yük kontrollü analizlerde görülemeyen ilk rijitlik farklarını ayırt edebilmek için, deplasman kontrollü yöntemle objektif olarak değerlendirilmiştir.

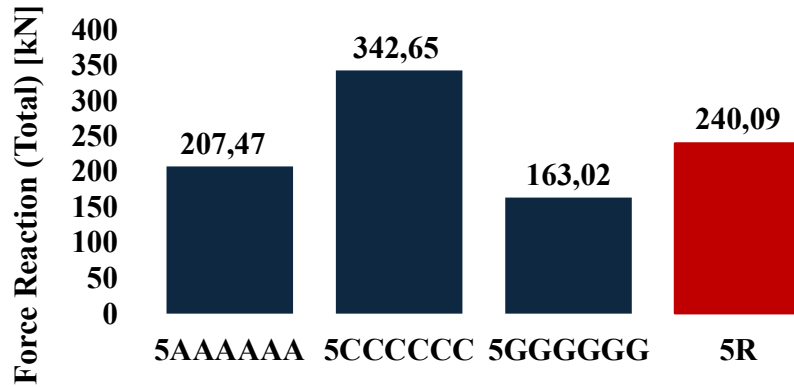


Şekil 6. 84 : 5GGGGGG (a), 5AAAAAA (b) ve 5CCCCCC (c) Force Reaction test sonuçları.

Uygulanan sabit 2 mm eksenel kısılma altında elde edilen reaksiyon kuvvetleri Şekil 6.84’de verilmiş ve Şekil 6.85’de grafik haline getirilmiştir. Kolonların başlangıç eksenel rijitliğini ve buna bağlı olarak süneklik–gevreklik eğilimlerini doğrudan ortaya koymaktadır. Sonuçlara göre, 5CCCCCC konfigürasyonu en yüksek reaksiyon kuvvetini üretmiş ($\approx 342,6$ kN) ve referans kolon olan 5R’ye kıyasla yaklaşık %43 daha yüksek rijitlik sergilemiştir. Bu durum, karbon fiber takviyeli kompozitlerin elastisite modülünün yüksek olması nedeniyle kolonun yükü çok erken aşamada karşılamaya başlamasından kaynaklanmakta ve yapının daha gevrek eğilimli bir davranış göstereceğine işaret etmektedir.

Buna karşılık 5AAAAAA ve özellikle 5GGGGGG konfigürasyonları, aynı deplasman altında referansa göre sırasıyla %14 ve %32 daha düşük reaksiyon kuvveti üretmiştir. Bu düşük reaksiyon değerleri, bu sistemlerin eksenel rijitliğinin daha az olduğunu ve başlangıç deformasyonunu karşılamak için daha düşük iç kuvvet geliştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla bu konfigürasyonlar daha sünek, yani erken aşamada yük biriktirmeden deformasyon geliştirebilen bir davranış eğilimi göstermektedir.

Referans kolon olan 5R, tüm modeller arasında orta seviyede reaksiyon kuvveti üretmiş olup (≈ 240 kN), betonarme kolonun ne aşırı rijit ne de aşırı sünek bir davranış göstermediğini, hibrit takviye sistemlerinin ise davranışı belirgin şekilde değiştirdiğini göstermektedir.



Şekil 6. 85 : Force Reaction testi sonuç grafiği.

7. SONUÇ

Çizelge 7. 1 : Tüm konfigürasyonların kendi referanslarına göre kritik burkulma kuvvetlerinin yüzdesel değişimi.

Konfigürasyon	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
3AAAAAA	+43.2	+30.5	+4.3	-15.0	-24.2	-24.4	-23.5
3AACCGG	+71.2	+53.3	+17.9	-8.3	-18.2	-18.3	-17.2
3ACACAC	+110.3	+83.3	+32.5	-2.8	-15.6	-15.7	-14.3
3ACGACG	+72.2	+54.2	+18.4	-8.2	-18.2	-18.3	-17.1
3AGCAGC	+75.2	+56.6	+19.6	-7.7	-18.0	-18.0	-16.8
3CAGCAG	+70.1	+52.6	+17.7	-8.5	-18.5	-18.6	-17.4
3CCCCCC	+172.2	+130.7	+57.1	+9.1	-7.6	-7.8	-5.9
3CCGGAA	+68.7	+51.5	+17.2	-8.8	-18.8	-18.9	-17.8
3GACGAC	+75.9	+57.1	+19.8	-7.7	-18.0	-18.0	-16.8
3GAGAGA	+22.0	+13.9	-3.4	-17.7	-23.6	-23.6	-22.9
3GCGCGC	+90.1	+68.6	+26.8	-3.7	-15.0	-15.0	-13.6
3GGAACC	+78.8	+59.2	+20.8	-7.3	-17.7	-17.8	-16.5
3GGGGGG	-1.0	-4.7	-12.9	-20.1	-23.2	-23.1	-22.6
4AAAAAA	+41.6	+29.9	+5.8	-13.0	-20.5	-20.7	-19.9
4AACCGG	+67.3	+51.0	+18.5	-5.8	-15.0	-15.1	-14.0
4ACACAC	+103.4	+78.7	+32.1	-0.7	-12.6	-12.8	-11.4
4ACGACG	+68.3	+51.8	+19.0	-5.6	-15.0	-15.1	-13.9
4AGCAGC	+71.1	+54.0	+20.1	-5.2	-14.7	-14.8	-13.6
4CAGCAG	+66.3	+50.4	+18.3	-5.9	-15.3	-15.3	-14.2
4CCCCCC	+160.7	+122.9	+55.1	+10.5	-5.2	-5.4	-3.6
4CCGGAA	+65.0	+49.4	+17.8	-6.2	-15.6	-15.7	-14.5
4GACGAC	+71.7	+54.5	+20.3	-5.2	-14.8	-14.8	-13.6
4GAGAGA	+21.9	+14.5	-1.4	-14.6	-20.0	-20.1	-19.4
4GCGCGC	+84.7	+65.1	+26.6	-1.6	-12.1	-12.1	-10.7
4GGAACC	+74.4	+56.4	+21.1	-4.8	-14.5	-14.5	-13.4
4GGGGGG	+0.8	-2.6	-10.1	-16.7	-19.6	-19.5	-19.1
5AAAAAA	+38.0	+27.6	+6.0	-11.1	-18.0	-18.1	-17.3
5AACCGG	+61.3	+46.7	+17.5	-4.5	-13.0	-13.0	-12.0
5ACACAC	+93.7	+71.8	+29.8	-0.1	-11.0	-11.1	-10.0
5ACGACG	+62.1	+47.5	+18.0	-4.4	-13.0	-13.0	-11.9
5AGCAGC	+64.7	+49.5	+19.0	-4.0	-12.7	-12.7	-11.7
5CAGCAG	+60.4	+46.2	+17.4	-4.7	-13.2	-13.2	-12.2
5CCCCCC	+145.8	+112.2	+51.2	+10.4	-4.1	-4.2	-2.6
5CCGGAA	+59.2	+45.3	+16.9	-4.9	-13.5	-13.5	-12.5
5GACGAC	+65.2	+49.9	+19.1	-4.0	-12.8	-12.8	-11.7
5GAGAGA	+20.1	+13.5	-0.8	-12.8	-17.7	-17.8	-17.1
5GCGCGC	+76.8	+59.3	+24.8	-0.9	-10.5	-10.5	-9.3
5GGAACC	+67.6	+51.6	+19.9	-3.7	-12.5	-12.5	-11.4
5GGGGGG	+1.3	-1.8	-8.6	-14.5	-17.1	-17.0	-16.6

Bu çalışma, deprem etkileri altında burkulma riski yüksek taşıyıcı elemanlarda epoksi esaslı fiber takviyeli polimer (FRP) kaplama sistemlerinin kullanılabilirliğini sonlu elemanlar yöntemiyle kapsamlı biçimde incelemiştir. C30 beton çekirdek, dört adet S355 çelik donatı ve altı tabakalı epoksi esaslı FRP kaplamadan oluşan silindirik kolon modeli, 3 mm, 4 mm ve 5 mm donatılı üç seri şeklinde modellenmiştir. Her seri için 0° – 90° aralığında 15° 'lik artışlarla fiber yönelimi değiştirilmiş ve tüm dizilimler için toplam 273 model analiz edilmiştir. Analizler ANSYS 2024 R2 ortamında, ACP (Pre) modülünde tanımlanan lay-up yapıları üzerinden yürütülmüş ve Static Structural–Eigenvalue Buckling çözümleri ile kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Ayrıca karbon, kevlar ve cam fiberli modeller üzerinde 2 mm deplasman kontrollü yükleme ile gerçekleştirilen Force Reaction analizleri, FRP kaplamaların kolon rijitliği ve süneklik eğilimleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Elde edilen bulgular, fiber yönelimi ve tabaka dizilimlerinin burkulma kapasitesi üzerindeki etkisini çok net biçimde ortaya koymaktadır. Liflerin eksenel doğrultuda hizalandığı 0° yöneliminde tüm dizilimlerde maksimum dayanım elde edilirken, fiber açısının artmasıyla birlikte eksenel rijitliğin azalmasına bağlı olarak burkulma dayanımında kademeli kayıplar meydana gelmiştir. Kompozit kaplamasız referans modellerle karşılaştırıldığında karbon içeriği yüksek olan dizilimler en yüksek kapasite artışlarını sağlamıştır. Çizelge 7.1'e göre 0° fiber yöneliminde 3 mm serisinde %172,2; 4 mm serisinde %160,7 ve 5 mm serisinde %145,8 seviyelerinde artış gerçekleşmiş ve karbon tabakasının eksenel taşıma kapasitesine katkısı açık şekilde doğrulanmıştır. Bununla birlikte karbon ağırlıklı hibrit dizilimler olan ACACAC, CAGCAG, ACGACG, GACGAC modelleri de yüksek performans göstermiş; bu dizilimlerde 0° açısında 3 mm serisinde %110,3, 4 mm serisinde %103,4 ve 5 mm serisinde %93,7 artış elde edilmiştir. Karbon–cam sıralı GCGCGC dizilimleri de yüksek dayanım sunmuş; 3 mm serisinde %90,1, 4 mm serisinde %84,7 ve 5 mm serisinde %76,8 artış sağlamıştır. Buna karşılık kevlar–cam ağırlıklı GAGAGA dizilimleri daha sınırlı artış göstermiş ve artış oranları aynı açıda sırasıyla %22,0; %21,9 ve %20,1 düzeyinde kalmıştır.

Fiber açısının 15° 'ye yükselmesi durumunda karbon ve karbon ağırlıklı dizilimler yüksek performanslarını büyük ölçüde korumuş; 3CCCCC modeli %130,7, ACACAC modeli %83,3 ve GCGCGC modeli %68,6 artış sağlamıştır. Hibrit dizilimler bu bölgede %50'nin üzerinde kalırken kevlar–cam ağırlıklı sistemlerde artış yaklaşık %13–14 düzeyine gerilemiştir. 30° fiber yöneliminde tüm modellerde kapasite düşmeye başlasa da karbon ve

karbon ağırlıklı hibrit dizilimler hâlâ pozitif bölgede kalmıştır. Örneğin 3ACACAC dizilimi %32,5, 3GCGCGC dizilimi %26,8 artış göstermiştir. Ancak kevlar–cam ağırlıklı GAGAGA dizilimlerinde kapasite kayıpları başlamış ve değerler $-3,4$ ila $-1,4$ arasında gerçekleşmiştir. Tam cam sistemlerinde ise düşüş $-8,6$ ile $-12,9$ aralığında daha belirgin hale gelmiştir.

45° yöneliminde yalnızca karbon ağırlıklı dizilimlerin pozitif değerlerini koruduğu, diğer tüm dizilimlerde azalma meydana geldiği görülmüştür. ACACAC dizilimlerinde bu kayıp $-0,7$ ile sınırlı kalırken, GCGCGC dizilimlerinde düşüş yaklaşık $-1,6$ seviyesinde gerçekleşmiştir. kevlar–cam ağırlıklı GAGAGA dizilimlerinde ise kapasite kayıpları -12 ila $-17,7$ aralığına kadar çıkmıştır. 60° – 75° aralığı, tüm donatı serilerinde kapasite kaybının en yoğun görüldüğü kritik bölgeyi oluşturmuş; bu aralıkta karbon ağırlıklı dizilimlerde kayıplar daha kontrollü olup -4 ile -7 aralığında kalmıştır. Buna karşın ACACAC dizilimlerinde kayıplar -11 ila $-15,6$, GCGCGC dizilimlerinde -12 ila -15 , kevlar–cam ağırlıklı dizilimlerde ise -17 ila $-23,6$ aralığında gerçekleşmiş ve tam cam dizilimlerinde en yüksek kapasite kayıplarına ulaşılmıştır.

90° fiber yöneliminde çevresel lif hizalanmasının etkisiyle tüm modeller 75° seviyesine göre belirli ölçüde toparlanma göstermiştir. ACACAC dizilimlerinde bu toparlanma 1 – 3 arasında gerçekleşmiş; GCGCGC dizilimlerinde benzer ölçülerde iyileşme gözlenmiştir. Karbon ağırlıklı dizilimlerde toparlanma daha belirgin olup 3 mm serisinde $-5,9$ 'a, 4 mm'de $-3,6$ 'ya ve 5 mm'de yalnızca $-2,6$ 'ya gerilemiştir. Buna karşılık kevlar–cam ve tam cam dizilimlerinde toparlanma oldukça sınırlı kalmış ve düşüş değerleri genellikle -17 ila -22 aralığında olmuştur.

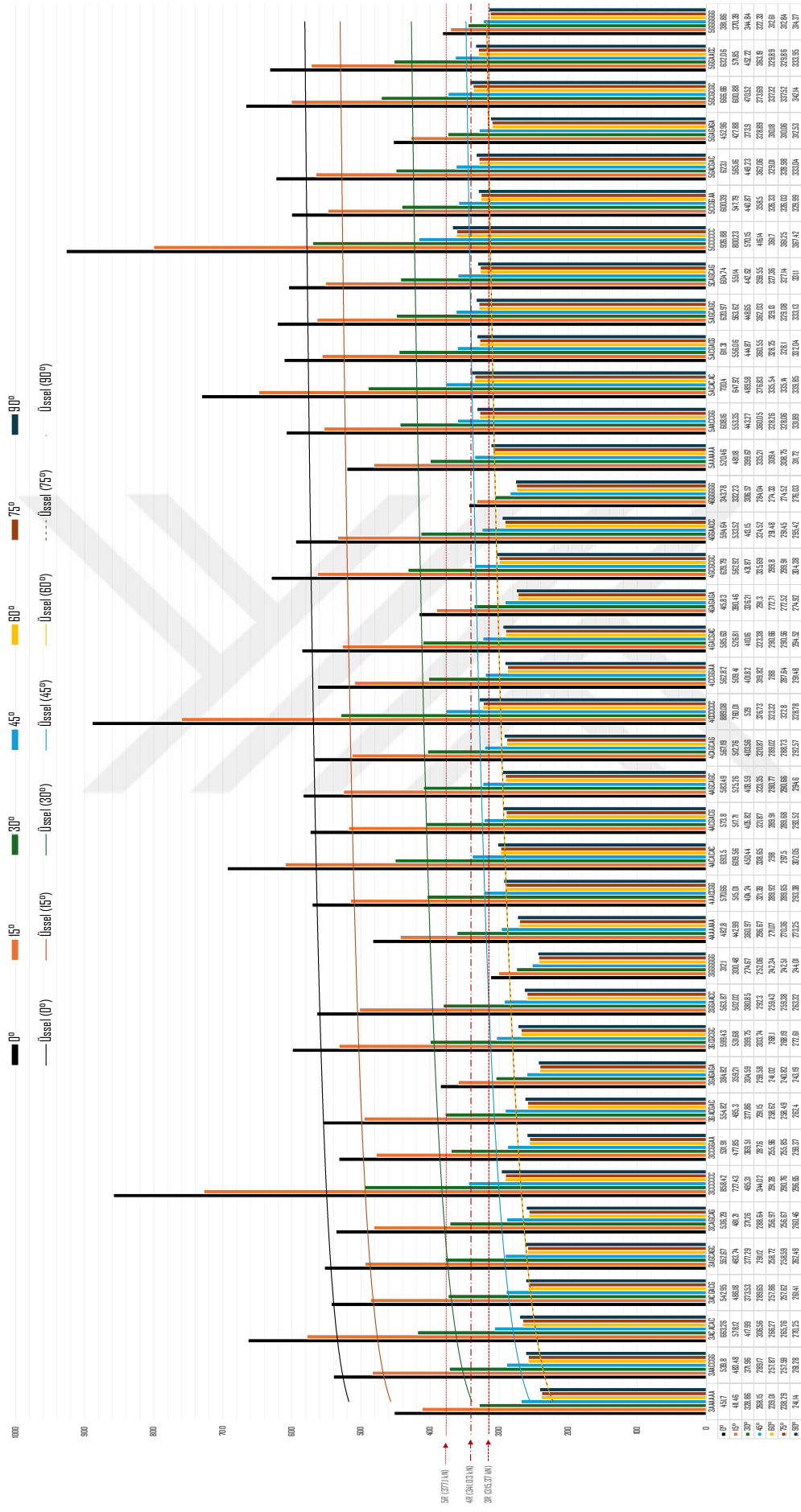
Donatı çapının 3 mm'den 5 mm'ye yükselmesi, kesitin genel rijitliğini artırmış ve kritik burkulma yüklerinde ortalama 8 – 12 arasında artış sağlamıştır. Ancak bu artış doğrusal olmayıp FRP kaplamanın beton–çelik etkileşimine sağladığı katkı belirli bir seviyeden sonra doygunluğa ulaşmaktadır. En yüksek kapasite 5 mm donatılı karbon ağırlıklı dizilimde, $926,88$ kN olarak elde edilmiştir. Ayrıca Force Reaction analizleri, 5CCCCC diziliminin en rijit eğilimli davranışı gösterdiğini; buna karşılık 5GGGGG diziliminin daha düşük reaksiyon kuvveti ile daha sünek bir davranış eğilimi sergilediğini ortaya koymuştur.

Şekil 7.1'deki genel grafik, dizilim farkı gözetmeksizin tüm serilerde tutarlı eğilimlerin bulunduğunu göstermektedir. 0° – 75° arasında burkulma yükü düzenli şekilde

azalırken, 75° – 90° aralığında çevresel lif hizalanması nedeniyle sınırlı bir toparlanma gerçekleşmiştir. Donatı çapı arttıkça tüm yük–açı eğrileri yukarı kaymış ve genel rijitlik belirgin biçimde artmıştır.

Sonuç olarak, karbon oranı yüksek ve fiber yönelimi 0° – 30° aralığında olan dizilimler burkulma dayanımı açısından en etkili sonuçları vermiştir. Karbon tabakalar eksenel rijitliği artırırken, kevlar ve cam tabakalar deformasyon dengeleme ve enerji yutma kapasitesini geliştirmiştir. Buna karşılık 60° üzerindeki fiber yönelimlerinde ve karbon oranı düşük olan dizilimlerde burkulma kapasitesi %20–50 aralığında düşüş göstermiştir. Elde edilen tüm bulgular, epoksi esaslı hibrit FRP kaplamaların deprem bölgelerinde kolon burkulmasını geciktirici, süneklik artırıcı ve göçme riskini azaltıcı etkili bir güçlendirme yöntemi sunduğunu doğrulamaktadır.





Şekil 7. 1 : Burkulma analiz sonuçların ve eğilimlerinin verildiği genel grafik.

8. KAYNAKÇA

- [1] **Noman, A. A., Shohel, S. M., Riyad, S. H., & Gupta, S. S.** (2023). Investigate the mechanical strength of laminated composite carbon fiber with different fiber orientations by numerically using finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.132>
- [2] **Zhang, G., Hu, Y., Yan, B., Tong, M., & Wang, F.** (2024). Buckling and post-buckling analysis of composite stiffened panels: A ten-year review (2014–2023). *Thin-Walled Structures*, 205(Part B), 112525. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112525>
- [3] **Çakır, F., Aydın, M., Acar, V., Yıldırım, P.** (2024). Impact of hybrid and non-hybrid fiber reinforced polymers on mechanical performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 451(138806). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138806>
- [4] **Jaber, M., Yahya, A., Arif, A. F., Jaber, H., & Alkhedher, M.** (2024). Burst pressure performance comparison of type V hydrogen tanks: Evaluating various shapes and materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 81, 906–917. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.315>
- [5] **Verma, S., Gupta, A., Prasad, R., & Oguamanam, D.** (2024). NURBS-based isogeometric formulation for linear and nonlinear buckling analysis of laminated composite plates using constrained and unconstrained TSDTs. *Aerospace Science and Technology*, 155, 109561. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2024.109561>
- [6] **Aydın, M. R., Acar, V., Çakır, F., Gündoğdu, Ö., & Akbulut, H.** (2022). Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites. *Composite Structures*, 291, 115595. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115595>
- [7] **Hashim, N., Majid, D. L. A., Mahdi, E. S., Zahari, R., & Yidris, N.** (2019). Effect of fiber loading directions on the low cycle fatigue of intraply carbon–Kevlar reinforced epoxy hybrid composites. *Composite Structures*, 212, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.036>
- [8] **Cho, J., & Park, J.** (2021). Hybrid fiber-reinforced composite with carbon, glass, basalt, and para-aramid fibers for light use applications. *Materials Research Express*, 8(12), 125304. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac406f>

- [9] **Pham, S. D., Karamanli, A., Nguyen, N.-D., & Vo, T. P.** (2025). Vibration and buckling analysis of laminated and bio-inspired helicoidal composite curved beams. *Structures*, 82, 110480. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110480>
- [10] **Çakır, F., Acar, V., Aydın, M. R., Aksar, B., & Yıldırım, P.** (2021). Strengthening of reinforced concrete beams without transverse reinforcement by using intraply hybrid composites. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00700. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00700>
- [11] **Joseph, L., Kumar, P. S., Jayanarayanan, K., & Mini, K. M.** (2022). Strengthening of plain concrete cylinders with hybrid composites based on basalt and sisal fiber systems. *Materials Today: Proceedings*, 66(4), 2444–2448. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.366>
- [12] **Sarath Kumar, P., Jayanarayanan, K., Deeraj, B.D.S. et al.** (2022). Synergistic effect of carbon fabric and multiwalled carbon nanotubes on the fracture, wear and dynamic load response of epoxy-based multiscale composites. *Polym. Bull.* 79, 5063–5084 <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03742-6>
- [13] **Dixit, S., & Padhee, S. S.** (2019). Finite element analysis of fiber reinforced hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3340–3347. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.255>
- [14] **Ranjan, P., & Dhiman, P.** (2016). Retrofitting of columns of an existing building by RC, FRP and SFRC jacketing techniques. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 15(1), 40–46. <https://doi.org/10.9790/1684-15010010140-46>
- [15] **Aydın, M. R.** (2025). A comprehensive experimental and numerical analysis on free vibration and axial buckling behavior of hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 26(10), 4069–4086. <https://doi.org/10.1007/s12221-025-01071-3>
- [16] **Kumar, E. K., Sharma, N., Panda, S. K., & Mahmoud, S. R.** (2022). Numerical prediction of thermal buckling load parameters of damaged polymeric layered composite structure and reversal of strength using SMA fibre. *Archive of Applied Mechanics*, 92(10), 3829–3845. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02265-4>

- [17] **Gopalan, V., Vardhan, M. S., Thakur, V., Krishnamoorthy, A., Pragasam, V., Degalahal, M. R., Velu, P. S., Raja Annamalai, A., & Jen, C.-P.** (2023). Studies on Numerical Buckling Analysis of Cellulose Microfibrils Reinforced Polymer Composites. *Materials*, 16(3), 894. <https://doi.org/10.3390/ma16030894>
- [18] **Ranjere, M., Rajanna, T. & Arya, (2021).** B. Influence of Trapezoidal Shapes and Linearly varying Edge Loads on the Buckling Characteristics of Plates with Cutouts. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 102, 1231–1249 <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00735-2>
- [19] **Dabiryan, H., Mazloomi, Z.S. & Sharif-Deljuee, (2024).** O. Effect of Fiber Path on the Buckling Behavior of Delaminated Composites Reinforced with Woven Fabrics; Analytical and Numerical Study. *Fibers Polym* 25, 1047–1059 <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00435-x>
- [20] **Di Cara, G., D'Ottavio, M., & Polit, O.** (2024). Variable kinematics finite plate elements for the buckling analysis of sandwich composite panels. *Composite Structures*, 330, 117856. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117856>
- [21] **Eryiğit, E.** (2006). *Tabakalı kompozit çubuklarda yanıl yük etkisi ile oluşan burkulma* (Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı).
- [22] **Selver, E., Potluri, P., Hogg, P., & Soutis, C.** (2016). Impact damage tolerance of thermoset composites reinforced with hybrid commingled yarns. *Composites Part B: Engineering*, 91, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.035>
- [23] **Ortega, Z., Matarazzo, A., Suárez, L., Catalfo, P., & Ingrao, C.** (2025). Why hybrid composite materials? Findings from a systematic literature review of life cycle assessments. *Sustainable Materials and Technologies*, 46, e01663. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01663>
- [24] **Atmakuri, A., Palevicius, A., Vilkauskas, A., & Janusas, G.** (2020). Review of Hybrid Fiber Based Composites with Nano Particles—Material Properties and Applications. *Polymers*, 12(9), 2088. <https://doi.org/10.3390/polym12092088>

- [25] **Jeon, Y. B., Sim, G.-D., & Choi, J.-H.** (2026). Finite element buckling analysis for micro structures based on the couple stress theory. *Thin-Walled Structures*, 218(B), 114023. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.114023>
- [26] **Sahu, M. K., Harshal, P., Chettri, P., Himanshu, & Punera, D.** (2025). Efficient finite element framework for static and buckling analysis of variable angle tow composite plates using thickness stretching kinematic model. *Finite Elements in Analysis and Design*, 251, 104415. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2025.104415>
- [27] **Altın Karataş, M., & Gökkaya, H.** (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>
- [28] **Öztemiz, H. M.** (2024). *Farklı geometriye sahip S şekilli çekirdekli bal peteği sandviç kompozitlerin mekanik davranışlarının araştırılması* (Doktora tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [29] **Çelik, O.** (2022). *Karbon fiber kompozitlere alternatif olarak doğal fiber takviyeli hibrit kompozit malzemelerin özellikleri* (Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [30] **Alkeflawi, D. A. H. H.** (2018). *Polimerik köpük çekirdekli metal sandviç kirişlerin burkulma ve burkulma sonrası davranışları* (Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [31] **Özgen, C.** (2022). *İnce cidarlı kompozit silindirik kabukların statik ve dinamik burkulma analizi üzerine bir çalışma* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [32] **Namdar, Ö.** (2012). *Basma yüklemesi altındaki tabakalı kompozit plakaların burkulma, burkulma sonrası ve ileryen kırılma analizleri* (Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [33] **Alar Öner, G.** (2013). İnce cidarlı, tek ve iki hücreli, tabakalı kompozit tüplerde sonlu elemanlar yöntemi ile burulmalı burkulma analizi. *EÜFBED -*

- Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 277–300.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/erzifbed/issue/6027/80710>
- [34] **Öndürücü, A., & Kayıran, H. F.** (2018). Hibrit kompozit kirişlerin yanal burkulma davranışlarına soğuk ortamın etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(Özel Sayı), 156–164.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/sdufenbed/issue/39695/470049>
- [35] **Günyar, A., Öztürk, H., & Sabuncu, M.** (2012). Kompozit eğri çubukların doğal frekans ve burkulma yükü analizi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(42), 33–42.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40820/492514>
- [36] **Solmaz, M. Y., & Kaman, M. O.** (2010). Petek yapıli sandviç yapıliarda köpük dolgusunun kritik burkulma yüküne etkisi. *e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, 5(1A), 24–34.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/19863/212873>
- [37] **Saiki, L. E. de C., & Gomes, G. F.** (2025). Comparative analysis of modal, static, and buckling behaviors in thin-walled composite cylinders: A detailed study. *Composite Structures*, 352, 118672.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118672>
- [38] **Lezgy-Nazargah, M., Yaylacı, M., & Shad, H.** (2025). Double superposition shear deformation theory for buckling analysis of layered composite circular closed cylindrical shells in underwater environments. *Ocean Engineering*, 340(Part 1), 122230.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122230>
- [39] **Liu, N., Cui, B., Wang, H., Zhao, G., & Chen, P.** (2026). Effect of discrete source damage on buckling and post-buckling behaviour of composite hat-stiffened panels under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 218(Part C), 114158. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.114158>
- [40] **Guo, Y., Hu, Z., Zhu, H., Yan, H., Hong, Z., & Wei, X.** (2025). Dynamic buckling analysis of variable stiffness composite cylindrical shells based on isogeometric analysis. *Thin-Walled Structures*, 217(Part B), 113749.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113749>
- [41] **Chang, H., Wang, L., Hu, Y., Kang, C., Shen, K., & Zhang, J.** (2025). Analytical, experimental, and numerical analyses of the buckling of

- composite ring-stiffened steel cylinders. *Thin-Walled Structures*, 212, 113175. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113175>
- [42] **Ngwa, A.N., Chaudhary, B., Matos, H. et al.** (2025). Design Optimization for Hydrostatic Pressure in Hybrid Composite Cylinders. *Appl Compos Mater* 32, 373–394 <https://doi.org/10.1007/s10443-024-10293-2>
- [43] **Nasrekani, F.M.** (2025). An Analytical Model for Nonlinear Static and Buckling Analysis of Sandwich Auxetic Cylinders with Functionally Graded Face Sheets Under Combined Axial and Radial Loading. *Acta Mech. Solida Sin.* <https://doi.org/10.1007/s10338-025-00646-0>
- [44] **Jafari, M., Fesharaki, J.J.** (2021). Buckling Analysis of Cylinders Reinforced with Stiffening Rings and Foam. Numerical and Experimental Investigation. *Strength Mater* 53, 966–982. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00365-8>
- [45] **Pan, H., Qu, W., Yang, D. et al.** (2022). Design and Optimization of Variable Stiffness Composite Cylinders With the Consideration of Manufacturing Interaction. *Appl Compos Mater* 29, 1249–1273 <https://doi.org/10.1007/s10443-021-10007-y>
- [46] **Ghasemi, A.R., Soleymani, M.** (2021). A new efficient buckling investigation of functionally graded CNT/fiber/polymer/metal composite panels exposed to hydrostatic pressure considering simultaneous manufacturing-induced agglomeration and imperfection issues. *Eur. Phys. J. Plus* 136, 1220 <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02197-y>
- [47] **Zarei, M., Rahimi, G.H.** (2023). Buckling of axially compressed joined lattice-core sandwich conical-cylindrical shells. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 45, 186 <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03980-3>
- [48] **Shahzad, A.** (2009). *Impact and fatigue properties of natural fibre composites* (Doctoral dissertation, Swansea University, Swansea University Repository (Cronfa)). <http://cronfa.swan.ac.uk/Record/cronfa43056>
- [49] **Lee, D. G. & Suh, N. P.** (2006). Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools, and Automobiles. New York, NY: *Oxford University Press*. ISBN 978-0-19-517877-7.

- [50] **Chawla, K. K.** (2012). *Composite materials: Science and engineering* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74365-3>
- [51] **Kaw, A. K.** (2006). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, *Taylor & Francis Group*. ISBN 978-0-8493-1343-1.
- [52] **Abramovich, H.** (2017). Introduction to composite materials. *In Stability and vibrations of thin-walled composite structures* (pp. 1-47). Woodhead Publishing/Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100410-4.00001-6>
- [53] **Orhan, T.** (2006). *Plakaların yorulması* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı).
- [54] **Campbell, F. C.** (2010). *Structural Composite Materials*. Materials Park, OH: *ASM International*. ISBN 978-1-61503-037-8.
- [55] **Arulprasanna, A. & Omkumar, M.** (2024). A review on composites: Selection and its applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.06.014>
- [56] **Egbo, M. K.** (2021). A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(8), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- [57] **Rana, S., & Figueiro, R.** (2016). Advanced composites in aerospace engineering. *In Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications* (pp. 1–15). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00001-8>
- [58] **Callister, W. D. Jr. & Rethwisch, D. G.** (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Hoboken, NJ: *John Wiley & Sons, Inc.* ISBN 9781119321590.
- [59] **Wang, B., He, B., Wang, Z., Qi, S., Zhang, D., Tian, G., & Wu, D.** (2021). Enhanced Impact Properties of Hybrid Composites Reinforced by Carbon Fiber and Polyimide Fiber. *Polymers*, 13(16), 2599. <https://doi.org/10.3390/polym13162599>
- [60] **Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R.** (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1559–1562. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.086>

- [61] **Park, S.-J., & Seo, M.-K.** (2011). Types of composites. In *Interface Science and Technology* (Vol. 18, pp. 501–629). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375049-5.00007-4>
- [62] **Kahvecioğlu, Y. E.** (2016). *Yapıştırma bağlantılı kompozit malzemelerin mekanik performansı üzerine mekanik bağlamanın etkilerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [63] **Şahin, Y.** (2000). Kompozit malzemelere giriş. Ankara: *Gazi Kitabevi*. ISBN 978-975-9732-40-07
- [64] **Ateeq, M.** (2023). A state of art review on recycling and remanufacturing of the carbon fiber from carbon fiber polymer composite. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2023.100412>
- [65] **Abdellaoui, H., Raji, M., Bouhfid, R., & Qaiss, A. E. K.** (2019). Investigation of the deformation behavior of epoxy-based composite materials. In *Failure Analysis in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 29–49). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102293-1.00002-4>
- [66] **K. V. Çelik and H. Karaşin** (2014). Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi, *DUJE*, vol. 5, no. 1, pp. 1–11, 2014.
- [67] **Sreejith, M., & Rajeev, R. S.** (2021). Fiber reinforced composites for aerospace and sports applications. In *Fiber Reinforced Composites: Constituents, Compatibility, Perspectives, and Applications* (pp. 821–859). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821090-1.00023-5>
- [68] **Kocabıyıkçı Aktaş, Y.** (2023). *Epoksi matrisine uygun cam fiber ara yüzey geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı)
- [69] **Farzana, M., Haque, M. M., Sonali, S. M., Mollah, M. Z. I., Amin, M. A., Khan, S. A., Islam, F., & Khan, R. A.** (2023). Thermo-mechanical properties and applications of glass fiber reinforced polymer composites. *Modern Concepts in Material Science*, 5(3). <https://doi.org/10.33552/MCMS.2023.05.000614>
- [70] **İç, Y. T., Elaldı, F., Keçeci, B. Önder Uzun, G.** (2019). Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin frezeleme işleminin faktöriyel tasarım ve hedef programlama yöntemleriyle eniyilemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik*

- [71] **Eryıldız, E., & Akdoğan Eker, A.** (2015). Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları. *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), 8-12.
<https://doi.org/10.29137/umagd.379785>
- [72] **Işık, A.** (2021). *Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı)
- [73] **Middleton, B.** (2016). Composites: Manufacture and application. *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality: Structural composites, injection molding, and 3D printing* (ss. 53–101). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-34061-8.00003-X>
- [74] **Mazumdar, S. K.** (2002). Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. *CRC Press*. ISBN 0-8493-0585-3
- [75] **Caymaz, M.** (2021). *B4C katkılı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı)
- [76] **Beer, F. P., Johnston, E. R. Jr., DeWolf, J. T., ve Mazurek, D. F.** (2012). *Mechanics of Materials* (6th ed.). New York: McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-338028-5.
- [77] **Moaveni, S.** (2020). *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS (5th ed.)*. Hoboken, NJ: Pearson Education, Inc. ISBN 978-0-13-668163-2.
- [78] **ANSYS, Inc.** (2025). *ANSYS Composite PrepPost (ACP) User's Guide, Release 2025 R1*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc. Erişim adresi: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/pdf/ACP_Users_Guide.pdf
- [79] **Gardner, L., & Nethercot, D. A.** (2011). *Designers' guide to Eurocode 3: Design of steel buildings (EN 1993-1-1, -1-3 and -1-8)* (2nd ed.). London: ICE Publishing. ISBN 978-0-7277-4172-1.
- [80] **European Committee for Standardization (CEN).** (2005). EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for

buildings. Brussels: *CEN*. Erişim adresi: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.1.2005.pdf>

- [81] **Türk Standardları Enstitüsü.** (2000). *TS 500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*. Ankara: *Türk Standardları Enstitüsü*. Erişim adresi: https://staff.emu.edu.tr/cemalgenes/Documents/courses/INSA471_2019_20_Bahar/TS500.pdf



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hüseyin Karaduman

ÖĞRENİM DURUMU :

- **Lisans** : 2020, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, İnönü Üniversitesi, Mekanik Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler v.b.)

Karaduman, H., & Temiz, Ş. (basımda). Hibrit Kompozit Kolonlarda Burkulma Analizi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi (DUJE)