



**CAM, BAZALT VE KARBON FİBER ESASLI
HİBRİT KARDAN MİLİNİN FİLAMENT SARMA
TEKNİĞİ İLE ÜRETİMİ VE MATEMATİKSEL
OPTİMİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

İlhan KAHRAMAN

Eskişehir, 2017

**CAM, BAZALT VE KARBON FİBER ESASLI HİBRİT KARDAN MİLİNİN FİLAMENT
SARMA TEKNİĞİ İLE ÜRETİMİ VE MATEMATİKSEL OPTİMİZASYONU**

İlhan KAHRAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Tuğrul SEYHAN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ocak, 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1604F169 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

İlhan Kahraman'ın "Cam, Bazalt ve Karbon Fiber Esaslı Hibrit Kardan Milinin Filament Sarma Tekniği ile Üretimi ve Matematiksel Optimizasyonu" başlıklı tezi 06/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı-Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. A. Tuğrul SEYHAN
Üye	: Yard. Doç. Dr. Emrah DÖLEKÇEKİÇ
Üye	: Yard. Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ

.....

Enstitü Müdürü

ÖZET

CAM, BAZALT VE KARBON FİBER ESASLI HİBRİT KARDAN MİLİNİN FİLAMENT SARMA TEKNİĞİ İLE ÜRETİMİ VE MATEMATİKSEL OPTİMİZASYONU

İlhan KAHRAMAN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak, 2017

Danışman: Doç. Dr. A. Tuğrul Seyhan

Bu çalışmada, binek araçlarda güç aktarma organı olarak kullanılan kardan millerinin, elyaf sarma tekniği ile cam bazalt ve karbon fiber takviyeli hibrit kompozit malzemelerden üretimi hedeflenmiştir. Geleneksel malzemelere kıyasla kompozit malzemeler, eşyönsüz özellik sergileyen doğaları gereği, üretim, tasarım ve optimizasyon konularında daha karmaşık bir mühendislik pratiği gerektirmektedirler. Bu nedenle, çalışmada öncelikle kullanımı hedeflenen kompozit malzemelerin özellikleri ortaya konmuştur. Ardından, eşyönsüz özellik sergileyen bu malzemelerin tasarımı hususunda iç görü edinmek amacıyla, ön çalışma olarak kardan miline göre daha kolay bir problem seçilmiş ve silindirik kompozit numunelerin yanal basma dayanımı için tasarımında deneme-yanılma yönteminin etkinliği incelenmiştir. İşlevsel isterlerin sayısının artmasıyla deneme-yanılma yönteminin yetersiz kalacağı görülmüş, problemi kompozit malzemelerin mekaniği ve kardan milinin işlevsel isterleri bağlamında matematiksel olarak ortaya koymanın gerekliliği kavranmıştır. Bu amaçla, kardan milinin işlevsel isterleri olan burulma dayanımı, burulma burkulması ve doğal eğilme frekansı ortotropik özellik sergilediği varsayan kompozit tabakalar için matematiksel olarak ifade edilmiştir. Elde edilen matematiksel modelden yararlanarak optimum çözümleri üretecek bir parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması oluşturulmuştur. Bu PSO algoritmanın, etkili çözümler üretilmediği ayrıca hibrit kompozitlerin kullanımı ile çok amaçlı optimizasyonların mümkün olduğu ve bazalt fiber kullanımının sonuçları daha da geliştirdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kompozit, Kardan mili, Bazalt fiber, Filament sarma, Parçacık sürü optimizasyonu (PSO)

ABSTRACT

PRODUCTION AND OPTIMIZATION OF HYBRID FILAMENT WOUND DRIVE SHAFTS BASED ON GLASS-BASALT-CARBON FIBERS

İlhan KAHRAMAN

Department of Material Science and Engineering

Anadolu University, Graduate School of Sciences, January, 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Tuğrul Seyhan

This work deals with production and optimization of a glass-basalt-carbon fiber based hybrid filament wound drive shaft that used as a power transmission component at passenger cars. Due to their anisotropic nature, composite materials requires more complex engineering practice than the conventional materials by means of production, design and optimization. Therefore, first of all, mechanical properties of composite materials must be revealed. In the sequel, for the purpose of getting some insight about tailoring the anisotropic properties of composite materials, a simpler problem, designing a composite cylinder for lateral compression strength is selected as a pre-study and in this process effectiveness of trial and error approach examined. Explicitly, increasing number and complexity of functional requirements will render the trial and error approach impractical. As a consequence, it is essential to state the design problem, within the context of mechanical properties of composite materials and functional requirements of the drive shaft, on a more rigorous mathematical basis. For this purpose, torque transmission and torsional buckling capabilities as well as natural bending frequency requirements of drive shaft is expressed in terms of orthotropic properties of laminated composites. By making use of this mathematical model, a particle swarm optimization algorithm which is convenient to use with filament winding method is constructed. It is shown that, the PSO algorithm is an effective way for producing optimal solutions, multi-objective optimization is possible by the use of hybrid composites and optimal solutions of hybrid systems can be improved by introducing more components with varying properties like the basalt fibers.

Keywords: Hybrid composites, Drive shaft, Basalt fibers, Filament winding, Particle swarm optimization (PSO)

06/01/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

İlhan KAHRAMAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GÖRSELLER DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ	1
1.1. Geleneksel Mühendislik Malzemeleri	1
1.1.1. Metaller	2
1.1.2. Seramikler	2
1.1.3. Polimerler	3
1.1.4. Yarı iletkenler	3
1.1.5. Kompozitler	4
1.1.6. Biyomalzemeler	4
1.2. Kompozit Malzemeler	5
1.2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	6
1.2.1.1. Anafaz veya takviye malzemesine göre sınıflandırma	6
1.2.1.2. Takviyelerin geometrik formuna göre sınıflandırma .	10
1.2.1.3. Yapısal sınıflandırma	17
2. İLERİ KOMPOZİT MALZEMELER	20
2.1. İleri Kompozitlerin Genel Uygulama Alanları.....	21
2.2. İleri Kompozit Kompozitlerin Kardan Millerinde Kullanımı	32
2.3. İleri Kompozitlerin Genel Üretim Yöntemleri	34
2.4. İleri Kompozitlerin Elyaf Sarma Yöntemi İle Üretimi.....	40

	<u>Sayfa</u>
2.5. İleri Kompozit Malzemelerin Özellikleri	45
2.5.1. İleri kompozitlerde ortotropi	48
2.5.2. İleri kompozitlerin makromekaniği	52
2.5.3. Klasik lamine teorisi	55
3. MATEMATİKSEL MODEL VE OPTİMİZASYON	58
3.1. Ön Çalışma Numuneleri.....	58
3.1.1. Ön çalışma numunelerinin üretimi	58
3.1.2. Ön çalışma test numunelerinin hazırlanması	64
3.1.3. Ön testler	66
3.1.4. Ön çalışma test sonuçları	69
3.1.4.1. Birinci grup numune sonuçları	69
3.1.4.2. İkinci grup numune sonuçları	74
3.1.4.3. Ön test değerlendirmeleri.....	81
3.2. Matematiksel Model	84
3.2.1. Burulma dayanımı.....	84
3.2.2. Burulma burkulması	90
3.2.3. Eğilme doğal frekansı.....	91
3.3. Optimizasyon	93
3.3.1. Parçacık sürü optimizasyonu	95
3.3.2. Kısıtlar.....	96
3.3.2.1. Kardan milinin geometrik kısıtları.....	96
3.3.2.2. Kardan milinin işlevsel kısıtları.....	97
3.3.2.3. Üretim süreci kısıtları.....	97
3.3.3. Kullanılan malzemelerin özellikleri.....	98
3.3.4. PSO algoritmasının kardan mili problemine uyarlanması.....	99
3.3.4.1. PSO çözüm kodlama ve kod çözme mekanizmaları	100
3.3.4.2. Yeterlilik fonksiyonu ve yeterliliğinin ölçülmesi.....	102
4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	105
4.1. Sonuçlar.....	105
4.2. Değerlendirmeler	113

KAYNAKÇA..... 115

ÖZGEÇMİŞ



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. <i>Filament sarma parametrelerinin tp performansına etki sıralaması</i>	45
Tablo 3.1. <i>Birinci grup numunelerin bilgileri</i>	66
Tablo 3.2. <i>İkinci grup numunelerin bilgileri</i>	66
Tablo 3.3. <i>Birinci grup numunelerin özelliklerinin karşılaştırılması</i>	73
Tablo 3.4. <i>İkinci grup numunelerin özelliklerinin karşılaştırılması</i>	81
Tablo 3.5. <i>G, B, C, GB, GC ve GBC numunelerinin kalınlık ve ağırlık değerleri</i>	82
Tablo 3.6. <i>Kardan mili için kullanılan geometrik kısıtlar</i>	96
Tablo 3.7. <i>Kardan mili için kullanılan işlevsel kısıtlar</i>	97
Tablo 3.8. <i>Algoritma geliştirme sürecinde kullanılan malzemeler ve özellikleri</i>	98
Tablo 3.9. <i>PSO algoritmasında kullanılan karar değişkenlerinin özellikleri</i>	99
Tablo 3.10. <i>Karar değişkenlerinin kodlanma mekanizması</i>	100
Tablo 3.11. <i>Karar değişkenlerinin gösterimi ve özellikleri</i>	101
Tablo 3.12. <i>Karar değişkenlerinin kullanım örneği</i>	101
Tablo 3.13. <i>İşlevsel kısıtlar için belirlenen ve hesaplanan değerlerin sembolleri</i>	103
Tablo 4.1. <i>E-cam/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü</i>	106
Tablo 4.2. <i>E-cam/epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler</i>	106
Tablo 4.3. <i>Karbon/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü</i>	106
Tablo 4.4. <i>Karbon/Epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler</i>	107
Tablo 4.5. <i>Bazalt/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü</i>	107
Tablo 4.6. <i>Bazalt/epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler</i>	107
Tablo 4.7. <i>Cam/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacık vektörü</i>	112
Tablo 4.8. <i>Cam/karbon melezi için elde edilen en iyi değerler</i>	112
Tablo 4.9. <i>Cam/bazalt/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacık vektörü</i> ..	112
Tablo 4.10. <i>Cam/bazalt/karbon melezi için elde edilen en iyi değerler</i>	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. DataCite istatistikleri (Aralık 2015).....	1
Şekil 1.2. Kompozitlerde kullanılan farklı formlardaki takviyelerin şematik gösterimi ...	11
Şekil 1.3. Fiber takviyeli karma sistemde hasarın ilerlemesi	13
Şekil 1.4. Aktarılan yük sonucu fiberi çevreleyen anafazdaki deformasyon örüntüsü ..	13
Şekil 1.5. Kritik boydan küçük fiberler üzerinde oluşan gerilim profili	14
Şekil 1.6. Kritik boya eşit uzunluktaki fiberler üzerinde oluşan gerilim profili	14
Şekil 1.7. Kritik boydan daha uzun fiberler üzerinde oluşan gerilim profili.....	15
Şekil 1.8. Fiber takviyeli kompozitlerde anafaz çatlama (a) ve kıvrımlama (b)	15
Şekil 1.9. Takviye fiberler açısından özelliklere sahip kompozitlerin gösterimi	16
Şekil 1.10. Yalnızca yüzey malzemesinin kullanımı ile oluşturulan tabakalı yapı.....	18
Şekil 1.11. Yüzey tabakalarının arasında çekirdeğin kullanımı ve sandviç yapı	18
Şekil 1.12. Tabakalı kompozit yapının şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi	20
Şekil 2.2. Dünya karbon fiber tüketim değerleri (SRI)	21
Şekil 2.3. Hafifletmenin basamaklı etkisi	23
Şekil 2.4. Havacılıkta kompozit kullanımının değişimi	23
Şekil 2.5. Kanat kutusu (wing box)	24
Şekil 2.6. Panellerde sandviç yapının kullanımı	24
Şekil 2.7. Kompozit flap tasarımı örneği	25
Şekil 2.8. Kanat kutusunda kullanılan takviye formları	25
Şekil 2.9. Kompozit bileşen üretiminde maliyet dağılımı	26
Şekil 2.10. Güç aktarım elemanı olarak kardan milinin şematik gösterimi	32
Şekil 2.11. Elle yatırma yönteminin şematik gösterimi	35
Şekil 2.12. Reçine transfer yönteminin şematik gösterimi	36
Şekil 2.13. Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi	37
Şekil 2.14. Vakum torbası yönteminin şematik gösterimi	38
Şekil 2.15. Otomatik fiber ve bant yerleştirme tekniğinin şematik gösterimi.....	39
Şekil 2.16. Geleneksel elyaf sarma makinesinin şematik gösterimi	41
Şekil 2.17. İki eksenli bir elyaf sarma cihazının şematik gösterimi	42
Şekil 2.18. Elyaf sarma yöntemi ile üretilebilecek parça geometrileri.....	43
Şekil 2.19. Çeşitli malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin karşılaştırılması	47
Şekil 2.20. İleri kompozit malzemelerde mühendislik sabitleri ve ortotropi.....	49
Şekil 2.21. Mühendislik sabitlerinin tespiti için uygulanan farklı gerilimler.....	52
Şekil 2.22. Kompozit tabakanın düzlem-içi gerilim varsayımının şematik gösterimi.....	52

Şekil 2.23.	<i>2-boyutlu tabakanın simetri düzlemleri (a) ile yerel ve genel eksenleri (b)</i>	53
Şekil 2.24.	<i>Kompozit tabakaların, tabakalı yapının kalınlığı yönündeki konumları</i>	55
Şekil 3.1.	<i>Sarım açısının belirleyen parametrelerin şematik gösterimi</i>	59
Şekil 3.2.	<i>T:1 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	69
Şekil 3.3.	<i>T:1 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	70
Şekil 3.4.	<i>T:2 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	70
Şekil 3.5.	<i>T:2 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	71
Şekil 3.6.	<i>T:3 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	71
Şekil 3.7.	<i>T:3 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	72
Şekil 3.8.	<i>T:1, T:2 ve T:3 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	72
Şekil 3.9.	<i>G kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	74
Şekil 3.10.	<i>G ve T:3 numunelerinin karşılaştırma grafikleri</i>	75
Şekil 3.11.	<i>B kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	75
Şekil 3.12.	<i>B kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	76
Şekil 3.13.	<i>C kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	76
Şekil 3.14.	<i>C kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	77
Şekil 3.15.	<i>GB kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	77
Şekil 3.16.	<i>GB kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	78
Şekil 3.17.	<i>GC kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	78
Şekil 3.18.	<i>GC kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	79
Şekil 3.19.	<i>GBC kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	79
Şekil 3.20.	<i>GBC kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği</i>	80
Şekil 3.21.	<i>Tüm numuneler için ortalama yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	80
Şekil 3.22.	<i>Tüm numuneler kalınlık ve ağırlık oranlı yük-eğilme yüzdesi grafikleri</i>	82
Şekil 3.23.	<i>Kardan milinin analizi için kullanılan genel konaç dizgesinin gösterimi</i>	84
Şekil 3.24.	<i>Eşyönlü bir malzemelerde uygulanan momentin yarattığı burulma</i>	85
Şekil 3.25.	<i>Burulmaya maruz kalan içi boş silindir</i>	86
Şekil 3.26.	<i>Teorilerinin deneysel veriler ile tutarlılığının karşılaştırılması</i>	88
Şekil 3.27.	<i>Cam (sol) ve karbon (sağ) destekli millerin burulma burkulmaları</i>	90
Şekil 3.28.	<i>Milin doğal frekansının ilk altı modu</i>	92
Şekil 4.1.	<i>Tek tip takviye kullanımı için optimizasyon sonuçları</i>	108
Şekil 4.2.	<i>Kardan mili problemi için olası bir Pareto cephesinin gösterimi</i>	109
Şekil 4.3.	<i>Cam ve karbon fiber takviyeli hibrit milin optimum sonuçları</i>	110
Şekil 4.4.	<i>Cam, bazalt ve karbon fiber takviyeli hibrit milin optimum sonuçları</i>	110
Şekil 4.5.	<i>İkili ve üçlü melezlerin 54-64 birim maliyet aralığında karşılaştırılması</i>	111

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1.1. Yapısal kompozit örnekleri olarak modern betonarme sütun ve kerpiç	5
Görsel 2.1. 7 eksenli fiber yerleştirme cihazıyla üretilen Proteus kabini	27
Görsel 2.2. GENx turbo fan motorunun karbon fiber/epoksi bıçakları (blade)	27
Görsel 2.3. Intelsat 5 uydusunun strüktür ve antenlerinin ileri kompozit yapısı.....	28
Görsel 2.4. Hyperion 2 yat direği.....	29
Görsel 2.5. CTP köprünün Frankfurt yakınlarındaki B3 otoyoluna yerleştirilmesi	29
Görsel 2.6. Karbon/epoksi kılıf ile kaplanan beton sütunlar	30
Görsel 2.7. Ticari ölçekte enerji üretimi yapan ilk gelgit türbini	31
Görsel 2.8. Tek parça (üstte) ve iki parça (altta) kardan mili örnekleri.....	33
Görsel 2.9. 1987 yılında Dan Gurney'in takımında kullanılan kompozit kardan mili	33
Görsel 2.10. Kompozit üretiminde kullanılan bir otoklav örneği	39
Görsel 2.11. İki eksenli bir elyaf sarma cihazı ile üretilen CTP boru örneği	44
Görsel 2.12. 8 µm çapındaki karbon fiberin elektron mikroskobu görüntüsü	46
Görsel 3.1. Numune üretiminde kullanılan elyaf sarma cihazı	58
Görsel 3.2. Mandrel olarak kullanılan borunun elyaf sarma cihazına sabitlenmesi.....	60
Görsel 3.3. 2 bileşenli reçinenin karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı.....	60
Görsel 3.4. Elyafın reçine havuzunda ıslatılması	61
Görsel 3.5. Cam ve karbon elyafardan oluşan melez kompozit silindir üretimi	62
Görsel 3.6. Cam elyaf takviyeli numunelerin oda sıcaklığında kürlenmeleri	62
Görsel 3.7. 60 °C sıcaklıkta post-kürlenmiş cam elyaf takviyeli numune.....	63
Görsel 3.8. Farklı elyaf ile takviyelenmiş numuneler	63
Görsel 3.9. Numune hazırlamada kullanılan sulu kesme cihazı.....	64
Görsel 3.10. Numune boyutlarının ayarlanmasında kullanılan zımpara cihazı	65
Görsel 3.11. ASTM D 2412 standardına uygun hazırlanmış numuneler	65
Görsel 3.12. Testlerde kullanılan Instron 5581 cihazı	67
Görsel 3.13. Azami 100 kN basma değerine sahip basma plakaları.....	68
Görsel 3.14. GBC (cam bazalt karbon) kodlu numunenin basılması	68

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

θ_i	: İlgili tabakanın sarım açısı
D_m	: Mandrel çapı
E_1	: İndirgenmiş ortotropik kompozit tabaka için fiber yönü Young katsayısı
E_2	: İndirgenmiş ortotropik tabaka düzleminde fiber yönüne dik Young katsayısı
E_x	: Kompozitin genel x eksen yönü Young katsayısı
E_y	: Kompozitin genel y eksen yönü Young katsayısı
G_{12}	: İndirgenmiş ortotropik tabaka için kayma modülü
H_i	: Tsai-Wu Hasar Teorisi katsayıları
I_x	: Genel x eksen yönü alan atalet momenti
\bar{Q}	: Dönüştürülmüş indirgenmiş esnemezlik matrisi
T_b	: Burulma burkulması
V_f	: Kompozitin fiber hacim oranı
V_m	: Kompozitin anafaz hacim oranı
f_n	: Doğal eğilme frekansı
l_{kri}	: Kritik fiber boyu
m_i	: İlgili tabakanın malzeme tipi
p_f	: Hesaplanmak istenilen özellik bakımından fiberlerin sahip olduğu değer
p_m	: Hesaplanmak istenilen özellik bakımından anafazın sahip olduğu değer
r_i	: Kardan milinin iç yarıçapı
r_m	: Kardan milinin ortalama yarıçapı
r_o	: Kardan milinin dış yarıçapı
x_1	: Yerel eksenlerde fiber yönü
x_2	: Yerel eksenlerde tabaka düzlemine paralel ve fiberlere dik yön
x_3	: Yerel eksenlerde tabaka düzlemine ve fiberlere dik yön
ν_{12}	: İndirgenmiş ortotropik tabaka için Poisson oranı
σ_H	: Kardan milinde dönme yönünde oluşan stres değeri
σ_e^*	: Fiber azami çekme dayanımı
τ_c	: Anafaz-fiber arası kesme dayanımı
ϵ^0	: Tabakalı kompozit plakanın orta düşlem gerinimi
Δy	: Basma yönünde oluşan deformasyon
h	: Tabakalı kompozitin toplam kalınlığı
A	: Uzanımsal esnemezlik matrisi (extensional stiffness matrix)

B	: Bağlaşım esnemezlik matrisi (coupling stiffness matrix)
C	: Kardan milinin maliyeti veya penaltı fonksiyonları
D	: Eğilme esnemezlik matrisi (bending stiffness matrix)
F	: Yanal basma yükü
J	: Kutupsal atalet momenti
K	: Büzülme ve toplanma katsayısı
L	: Kardan milinin boyu
M	: Moment vektörü
N	: Dairesel hız
N	: Kuvvet vektörü
P	: Eğilme yüzdesi
PS	: Silindirik numune rijitliği (pipe stiffness)
Q	: Düzleme indirgenmiş esnemezlik matrisi
R	: Reuter matrisi
T	: Doğrusal dönüşüm matrisi veya burulma momenti
U	: Düzgün dağılım
W	: Kardan milinin ağırlığı
aim	: Eniyilemede amaçlanan özellik
c	: Açının kosinüsü veya parçacık anlık konum vektörü
$cfitness$: Anlık yeterlilik değeri
d	: Fiber çapı
d	: Silindirik basma numunesinin iç çapı
k	: Kat sayısı
m	: Birim mil uzunluğunun kütlesi
p	: Kompozit için hesaplanmak istenen özellik, doğal titreşim modu
$pfitness$: En iyi yeterlilik değeri
s	: Genel ve yerel eksenler arası açının sinüsü
t	: Kardan milinin et kalınlığı
u	: x yönü yerdeğişim vektörü
v	: Doğrusal eksen hızı, y yönü yerdeğişim vektörü veya parçacık anlık hızı
w	: Açısal hız veya z yönü yerdeğişim vektörü
x	: Genel x eksen
y	: Genel y eksen
z	: Genel z eksen
γ	: Kayma gerinimi

ε	: Gerinim vektörü veya normal gerinim
θ	: Genel ve yerel eksenler arası açı
κ	: Tabakalı kompozit plakanın eğriliği
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilim vektörü veya normal gerilim
τ	: Kayma gerilimi
φ	: Sürü içi kavrama ve sosyal etkileşimleri sağlayan öğrenme katsayısı

Alt ve Üst İndisler

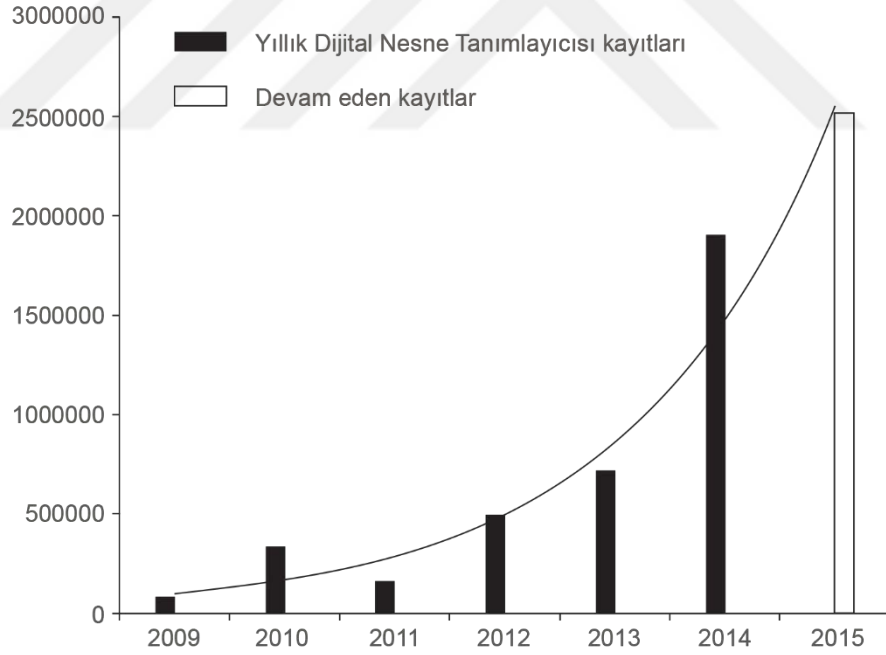
C	: Basma
T	: Çekme
avg	: Ortalama değer
$cons$: Sabit değer
$current$: Anlık değer
d	: İfade ettiği vektörün ilgili boyutu
g	: Tüm parçacıklar için geçerli değer
i	: Parçacık "i"
max	: Azamı değer
min	: Asgari değer
ult	: Azami dayanım değeri

1. MÜHENDİSLİK MALZEMELERİ

1.1. Geleneksel Mühendislik Malzemeleri

Tarihin ilk çağlarında, insanlığın, kullandığı malzemeler hakkında sınırlı bir bilgi birikimi bulunmasına rağmen, topluluklar arasındaki farklı malzeme bilgisi düzeyi bu toplulukların gelişmişlik seviyesini belirlemeye yetmiştir. Bu bakımdan, gündelik hayatta kullanılan ilk malzemeler arasında bulunan taş, bronz ve demirin farklı tarihsel devirleri simgelemesi rastlantı değildir.

Buna karşın günümüz tek bir malzemenin çağı değil, uçsuz bucaksız çeşitlilikteki malzemelerin çağıdır. 2009 yılında kurulan DataCite konsorsiyumu, nitelik gereksinimlerine uyan tüm veri merkezlerinin verilerinin, Dijital Nesne Tanımlayıcısı (Digital Object Identifier) bazında bildirimine olanak vermektedir. Konsorsiyumun kuruluşundan 2015 yılına kadar altı milyondan fazla Dijital Nesne Tanımlayıcısı kaydı yapılmıştır (Şekil 1). Bu kayıtların üçte birinden fazlasını 2015 yılı kayıtları oluşturmaktadır [1].



Şekil 1.1. DataCite istatistikleri (Aralık 2015) [1]

Malzeme verilerinin, mekanik özellikler, fiziksel özellikler, kimyasal özellikler, mikroyapı ve faz özellikleri gibi geniş bir çeşitliliği içerdiği düşünülürse [1]; her malzemeyi tek tek incelemenin zorluğu anlaşılacaktır. Bu nedenle mühendislik malzemeleri ana karakteristik özelliklerinin geniş ölçekte kapsandığı bir sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır.

Günümüzde mühendislerin kullanımına açık malzeme sayısı 160.000 den daha fazladır [2]. Bu malzemeler, kimyasal yapılarına ve atomik strüktürlerine göre, geleneksel olarak, metaller, seramikler ve polimerler olarak sınıflandırılabilir. Bu şablona göre bazı malzemeler tek bir kategoriye girerken bazı malzemeler arada kalacaktır. Günümüzde mühendislik malzemelerine üç ayrı sınıf daha ilave edilmektedir. Bunlar: kompozitler, yarıiletkenler ve biyomalzemelerdir [3]. Sınıflandırma ölçütü olarak kullanılacak farklı karakteristik özelliklere göre farklı malzeme sınıfları türetmek mümkündür (ör: doğal malzemeler).

1.1.1. Metaller

Alüminyum, çinko, bakır, bronz, dökme demir, magnezyum ve titanyum gibi metal ve metal alaşımlarının karakteristik özellikleri: yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yüksek dayanım ve esnemezlik (stiffness), iyi şekillenebilirlik ve şok dayanımı olarak sayılabilir [4]. Bu özellikleri nedeniyle, geçmişte yapısal uygulamalarda oldukça baskın bir şekilde kullanılmışlardır.

Metaller saf halleri ile nadiren kullanılmaktadırlar. Genellikle diğer metaller ile veya ametaller ile alaşımlandırılmaktadırlar. Nerdeyse tüm metaller düşük korozyon direncine sahiptir. İyi şekillenmelerini sağlayan süneklik özellikleri aynı zamanda metallerin düşük yorulma direncine sahip olmalarına da yol açmaktadır [2]. Metaller ve alaşımları, yüksek termal kararlılıkları sayesinde yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler.

1.1.2. Seramikler

Tuğla ve kiremit, çimento, refrakterler, camlar ve aşındırıcılar seramiklere örnek olarak gösterilebilir. Seramikler, güçlü kovalent veya iyonik bağlara sahip metal-ametal bileşikleridir. Seramikler de metaller gibi yüksek esneklik katsayısına sahiptirler ancak süneklik özellikleri yoktur [2].

Sünek malzemeler gibi gerilim yoğunluğunu deforme olarak dağıtamadıkları için delik ve çatlak gibi etmenlere karşı düşük tolerans sergilerler. Isı ve elektriğe karşı yalıtıcıdır. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahiptirler. Korozyona ve sert kimyasal ortamlara karşı dayanımları iyidir [2].

Yapılarındaki güçlü kovalent bağlar, seramiklerin, mühendislik malzemeleri arasında en yüksek erime noktasına sahip olmalarını sağlamaktadır. Bu nedenle mukavemetlerini yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza etmektedirler. Genellikle türbin ve kesme takımlarında uygulama alanı bulmaktadırlar [4,5].

1.1.3. Polimerler

Kauçuklar, plastikler ve birçok yapıştırıcı türü polimerlere örnek olarak verilebilir. Organik moleküllerin polimerleşme reaksiyonları ile elde edilen uzun zincir yapıdaki moleküllerdir. Moleküler yapı genellikle karbon, hidrojen ve diğer ametal elementlerden meydana gelmektedir. Düşük termal ve elektriksel iletkenliğe sahiptirler [4]. Metallerle göre kabaca elli kat daha düşük esneklik katsayısına sahiptirler. Bunun yanında düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve kolay işlenebilme gibi özellikleri nedeni ile birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri sıcaklığa bağlı olarak dramatik bir şekilde değişebilmektedir. Çok az polimer çeşidi 200 C° sıcaklığın üzerinde kullanılabilir [2].

1.1.4. Yarı iletkenler

Galyum arsenid, germanyum ve silikon gibi yarı iletkenler, elektronik ve bilgisayar uygulama alanlarının olmazsa olmazlarıdır [4]. Elektriksel iletkenlik özelliklerinin iletken ve yalıtkan malzemeler arasında kalması bu malzemelerin karakteristik özelliğidir. Bu özellik, malzeme içindeki safsızlıkların çok küçük konsantrasyon aralıklarında ayarlanması ile sağlanır [3].

1.1.5. Kompozitler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla sayıda ayrı fazda (birbiri içinde çözünmeyen) malzemenin belirli bir oran ve yapı seviyesinde (genellikle makroskopik seviyede) bir araya gelmesi ile elde edilen malzemelerdir [6]. Bu nedenle kompozit malzemeler ilgili yapı seviyesinde heterojendirler [7].

Kompoziti oluşturan bileşenler farklı özelliklere sahiptir. Belirli bir amaca yönelik seçilen bu bileşenlerin ayrı ayrı sergiledikleri farklı özellikler, kompozit malzemenin bütününde gözlenmektedir. Genellikle, kompozit malzemelerden beklenen özelliklerin tamamına sahip bir malzeme tipi mevcut değildir. Bu nedenle, kompozit malzemeler, bileşenlerinin en iyi karakteristik özelliklerini göstermeleri için tasarlanırlar [3].

Kompozit malzemelerin sergilemeleri arzulanan özellikler bakımından bilhassa kendilerinin tasarlanabilir nitelikte olması, bu malzemeleri geleneksel mühendislik malzemelerine alternatif haline getirmiştir. Örneğin: hem hafif hem de yüksek dayanımlı veya hem sert hem de çok dayanımına sahip kompozit malzeme sistemleri inşa edilebilmektedir. İleri teknoloji havacılık ve uzay uygulamaları ağırlıklı olarak kompozit malzeme sistemlerine dayanmaktadır [4].

1.1.6. Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, genellikle hastalıklı veya hasar görmüş canlı dokuların yerine kullanılan malzemelerdir. Biyomalzemeler, kullanılacağı canlı için biyouyumluluk özelliğini sağlamalıdır. Bu nedenle, canlı için zararlı etkileri olabilecek maddeler üretmemelidir ve korozyona uğramamalıdır [3].

Yukarıda bahsedilen, metal, seramik, polimer ve kompozit malzemeler biyomalzeme olarak da kullanılabilir [3]. Dişlerde kullanılan zirkonyum implantlar biyoseramiklere, kemik dokusunda kullanılan platin implantlar metalik biyomalzemelere, görme kusurlarını gidermede kullanılan lensler polimer biyomalzemelere ve çeşitli protezlerde kullanılan malzemeler kompozit biyomalzemelere örnek olarak verilebilir.

1.2. Kompozit Malzemeler

Günümüzde birçok mühendislik problemi, metaller, seramikler ve polimerler gibi geleneksel mühendislik malzemelerinin tek başına karşılayamadığı; malzeme özelliklerinin sıra dışı birleşimini gerektiren malzeme çözümlerini gerektirmektedir. Farklı malzeme fazlarının bir arada bulunduğu kompozit malzemeler, kompozit sistemi oluşturan bileşenlerin özelliklerini yansıtır. Kompozit sistemin gösterdiği özellikler nicelik olarak, genellikle, bileşen özelliklerinin alt ve üst sınırları arasında kalmaktadır.

Bu nedenle kompozit malzeme sistemleri, bileşen malzemelerinin arzulan özelliklerini ön plana çıkaracak şekilde, bilinçli olarak bir araya getirilmesi ile elde edilirler. Dolayısıyla, kompozit malzemeler, yapay olarak bir araya getirilmiş bileşenlerden oluşan sistemlerdir denilebilir.

Metal alaşımları da mikro yapı seviyesindeki farklı fazların tekrar eden örüntülerinden oluşabilmektedir. Bahsedilen alaşımlar, farklı özellikler gösteren bu fazların bileşke özelliklerini sergilediklerinden, kompozit malzemeler olarak düşünülebilirler. Ancak kavramsal olarak kompozit malzemeler, doğal süreçlerle oluşan çok fazlı malzemeler değil, belli bir amaca yönelik tasarlanmış ve yapay olarak oluşturulmuş sistemlerdir. Dolayısıyla metal alaşımları kompozit olarak anılmazlar [3].

Kompozit malzeme sistemleri çoğunlukla iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden biri anafaz (matris) diğeri ise takviye fazıdır. Anafaz genellikle sürekli yapıdadır. Kompozit malzemenin şeklini korumasına yardımcı olur ve takviye fazın içinde bulunacağı ortamı oluşturur.

Modern betonarme yapıların sütunları karma (kompozit) sistemlerdir. Bu sütunlarda kullanılan beton (anafaz), çelik çubuklar ile takviye edilmiştir. Şekil 1.2' de görülen kerpiç, antik çağlardan beri kullanılan bir kompozit malzemedir. Tabiatta doğal olarak bulunan kemik ve ahşap da, doğal seçim yolu ile tasarlandıkları düşünülürse, karma sistemlere örnek olarak gösterilebilir.



Görsel 1.1. Yapısal kompozit örnekleri olarak modern betonarme sütun ve kerpiç

1.2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde takviye fazı süreklilik arz eden anafaz içinde kesikli olarak dağılır. Takviye faz çeşitli geometrik formlarda olabilir. Bu bakımdan kompozit malzeme sistemleri anafaz ve takviye olarak kullanılan malzemenin cinsine göre, takviye olarak kullanılan bileşenin geometrik formuna göre ve bileşenlerin yapısal olarak bir araya geliş şekline göre sınıflandırılabilirler.

1.2.1.1. Anafaz veya takviye malzemesine göre sınıflandırma

1.2.1.1.1. Metal-Matris kompozitler

Metal matrisli kompozitler, anafaz olarak genellikle sünek bir metalin kullanıldığı kompozitlerdir. Metal matris kompozitlerde çeşitli geometrik ve mekanik özelliklere sahip takviyeler kullanılabilir. Metal matris kompozitler sıklıkla; sürekli fiber, kırılmış fiber ve parçacık formlarındaki bor, karbon, silikon karbid (SiC) ve alümina (Al_2O_3) malzemeleri ile takviye edilirler.

Metal matris kompozitler, matris olarak kullanılan metale göre daha yüksek esnemezlik, gelişmiş aşınma direnci, gelişmiş sürünme dayanımı ve yüksek sıcaklık özellikleri sergilerler [8]. Son zamanlarda geliştirilen teknikler ile metal anafazın grafit nanotabakalar gibi nano ölçekteki malzemeler ile takviyelenmesi çalışmaları, geleneksel metal matrisli kompozitlerin çeşitli faktörlerle sınırlanan özelliklerinin daha da geliştirilmesi adına umut vermektedir [9].

Metal matrisli kompozitler, görece daha yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozitlere göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterme ve yanmazlık gibi avantajlar sağlamaktadırlar. Ancak polimer matrisli kompozitlere göre oldukça maliyetlidirler. Bu nedenle kullanımları sınırlıdır [3].

1.2.1.1.2. Seramik-Matris kompozitler

Seramik malzemeler, çok yüksek erime noktalarına sahip olmaları nedeniyle, jet motorları gibi yüksek çalışma sıcaklığı gerektiren ortamlarda geniş uygulama bulmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oksidasyona olan doğal dirençlerinin de bunda payı vardır. Ancak, seramiklerin kırılgan yapıları ve düşük toklukları bu malzemelerin yapısal elemanlar olarak kullanımını engellemektedir.

Seramik malzemelerin doğal kırılma özelliklerinin üstesinden gelmek için son yirmi yılda birçok çalışma yapılmıştır [10]. Anafaz olarak kullanılan seramik malzemenin içine fiber, parçacık ve kılsı (whisker) formlarında başka bir seramik malzemenin takviyelenmesi kırılma tokluğunda önemli artışlar sağlamıştır.

Kırılma özelliklerinde etkili rolü olan ve anafazda başlayan çatlak ilerlemesi, parçacık, fiber veya kılsı takviyeler tarafından engellenmekte veya ötelenmektedir. Örneğin takviye olarak fiberlerin kullanımı, yüksek sıcaklıkta esnemezlik ve tokluk özelliklerini geliştirmekle sınırlı kalmayıp ayrıca yıkıcı hasar (catastrophic failure) olasılığını da azaltmaktadır. Bu bakımdan, özellikle havacılık ve savunma endüstrilerinde, fiber takviyeli seramik matris kompozitler gelecek vaat etmektedir. Çekme dayanımının yüksek sıcaklıklardaki servis ömrünün belirlenmesinde etkin rolü olduğundan karbon fiberler en önemli takviye adayları arasındadır [11].

Havacılıkta, motor verimliliği bakımından, kullanılan malzemelerin hafif olmaları ve yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyabilmeleri beklenmektedir. Seramik matris kompozitler süper alaşımlardan daha hafiftirler ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. Bu nedenlerle bazı motor elemanlarında seramik matris kompozitlerin kullanımına hali hazırda başlanmıştır [12].

1.2.1.1.3. Karbon-Karbon kompozitler

Karbon-Karbon kompozitler, karbon anafazın karbon fiberler ile takviye edilmesi ile elde edilmektedirler. Görece yeni ve yüksek maliyetli olan bu kompozit malzemelerin henüz geniş bir uygulama alanı bulunmamaktadır. Oksitleyici olmayan yüksek sıcaklık ortamlarında, yüksek elastik modül, yüksek özgül mukavemet, yüksek ısı şok dayanımı, yüksek sürünme direnci özelliklerini muhafaza edebilirler [13]. Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan birçok alternatife göre daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler.

Düşük yoğunluğa, yüksek termal iletkenliğe ve düşük ısı genleşme katsayısına sahip olmaları nedeniyle en iyi yüksek sıcaklık yapısal malzemesi olarak değerlendirilirler. Ses üstü hızlarda, yüksek basınç ortamında ve 3000 °C üzerindeki sıcaklıklarda sıra dışı avantajlar sağlamaları nedeniyle uzay ve savunma sanayilerinde tercih edilmektedirler. İyi ısı aşınma (ablation) performansları, özellikle katı yakıt roket motoru nozullarında kullanımlarına olanak vermektedir [14].

Ancak, karbonun 500 °C üzerinde oksitlenmeye başlaması nedeniyle, bahsedilen sert ortamlarda kullanılabilecek, düşük oksijen geçirgenliğine sahip ve karbid oluşturmayacak kaplamaların kullanımı gereklidir [15].

1.2.1.1.4. *Polimer-Matris kompozitler*

Polimer-Matris malzemeler, anafaz olarak polimerlerin kullanıldığı karma sistemlerdir. Diğer kompozit malzemelerde olduğu gibi, anafaz, bütün yapıyı bir arada ortam olma işlevini görür. Polimer anafaz görece sünek yapıda olduğu için yapısal elemanın üzerine uygulanan stresin daha geniş alanlara dağılmasını, stresin iletilmesini sağlar. Böylece sistemin kırılma tokluğu artar. Ancak uygulanan stresin küçük bir kısmı anafaz tarafından karşılanır. Bu bakımdan anafaz olarak kullanılan polimer ile takviye olarak kullanılan malzeme arasındaki bağlanma önem arz etmektedir. Kompozitin mukavemeti büyük ölçüde bu bağın niteliğine dayanmaktadır [3]. Ayrıca, anafaz, kullanılan takviyelerin dış çevre koşullarından izole edilmesine yardımcı olarak takviyeler üzerinde çevre nedeniyle oluşabilecek kimyasal reaksiyonlar ve mekanik aşınma gibi etkilerin önlenmesine yardımcı olur.

Polimer-matris kompozitler anafaz olarak kullanılan polimerin termoset veya termoplastik olmasına göre alt sınıflara ayrılabilirler. Polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), poliüretan ve polieter eter keton (PEEK) gibi termoplastik malzemeler, polimer anafazlı kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar [7]. Termoplastikler, ısıtıldıklarında moleküler yapıları bozulmadan erime özelliği gösterdiklerinden, basıncın da yardımı ile şekillendirilerek tekrar kullanılabilirler ve geri dönüştürülebilirler. Isıtma-soğutma döngüsü ile işleyen imalat süreçleri, seri üretim yöntemlerinde döngü zamanı ve hız açısından, termosetlere göre önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Termoplastikler, camsı geçiş sıcaklığına yaklaştıkça mekanik özelliklerinde düşüş gösterirler ve yumuşarlar [16] . Bu nedenle, bazı nadir termoplastiklerde 200 °C'nin üzerine çıkabilen çalışma sıcaklığı, termosetlerin çalışma sıcaklığından düşüktür. Erime sıcaklığına yaklaştıkça karbon-karbon bağlarında kopmalar görülebilir. Bu da mekanik özelliklerin azalmasına neden olarak geri dönüşüm sayısını sınırlar. Ayrıca termosetlere göre daha yüksek viskozite değerine sahip olmaları üretim süreci açısından zorluklar yaratmaktadır.

Fenolik reçineler, polyester reçineler, vinilester reçineler, epoksi reçineler ve polyamidler termoset anafazlı kompozitlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Termoplastiklerin aksine, sıcaklığı belirli bir kritik değere gelene kadar artırdıkça termosetler daha da sertleşirler ve kritik sıcaklık aşıldığında bozunmaya başlarlar [16]. Yine de, termosetlerin yaklaşık 300 °C olan azami kullanım sıcaklığı, metal ve seramiklere kıyasla düşük bir seviyede kalmaktadır [7].

Polimer anafazlı kompozitlerde genel problem diğer anafaz cinslerinin çalışma sıcaklıklarına göre düşük olan camsı geçiş sıcaklığına yaklaşılmasıdır. Bu sıcaklığa yaklaşıldıkça birçok fiziksel özellik istenmeyen yönde değişim gösterir. Polimer anafazlı sistemlerde diğer potansiyel problemler: ortamdaki nem, radyasyon ve atomik oksijen gibi etmenler nedeniyle özellik kayıplarının yaşanması; fiber destekli kompozitlerde fiber yönüne dik yöndeki mukavemetin düşük olması ve anafaz ile takviye arasındaki ısıl genleşme farkı nedeniyle büyük şiddette kalıntı gerilimlerin oluşması olarak sıralanabilir [7].

Polimer-matris kompozitler, görece üretim kolaylıkları ve maliyetleri nedeniyle çok geniş uygulama alanına sahiptirler. Yüksek ekonomik hacme sahip birçok sektör uygulaması için polimer anafazın özellikleri yeterlidir. Sınırlı üretim tekniklerine, yüksek üretim maliyetlerine ve çok özgün uygulama alanlarına sahip metal-matris, seramik-matris ve karbon-karbon kompozitlere nadiren ihtiyaç duyulur.

1.2.1.1.5. Melez kompozitler

Literatürde, kompozitlerin sınıflandırılmasında, melez (hybrid) kavramı daha çok fiber destekli kompozitler için kullanılmaktadır. Kavram tek cins anafaz içinde iki veya daha fazla sayıdaki farklı tipte ve özellikteki takviyelerin kullanımına işaret etse de, tabakalı ve sandviç yapıdaki kompozitler açısından bakıldığında tanım bulanıklaşmaya başlamaktadır. Bu nedenle melez kompozitlerin tanımının, kullanılan anafaz/takviye cinsine göre yapılan sınıflandırmaya dâhil edilmesi daha uygun görünmektedir.

Melez karma malzemelerin en önemli avantajı, işlevsel amaca yönelik olarak tasarlanacak kompozit sistemin nihai özelliklerinin elde edilmesinde sağladığı esnekliktir. Bu kompozitler için, sıklıkla, cam ve karbon fiberler ile oluşturulmuş melez sistemlerin istenilen performansı gösterirken aynı zamanda maliyet açısından sağladığı kazanımlardan örnekler verilir. Bunun nedeni cam fiberlerin maliyetinin daha düşük olmasının yanında mekanik özellikler bakımından da düşük performans sergilemesi ve karbon fiberlerin yüksek maliyetlerine karşın daha iyi mekanik performans sergilemesidir. Böylece melez kompozit sistemlerin kullanımı ile mekanik özellikler ve maliyet arasında bir denge kurulabilir.

Esasen, daha genel bir bakış açısıyla ele alındığında, melez sistemlerin karma malzemenin bileşke özellikleri üzerinde sağladığı esneklik, yalnızca maliyet değişkeni ile ilgili değildir.

Örneğin, profesyonel performans bisikletlerinde kullanılan jantlar tamamıyla karbon fiber destekli epoksi kompozit sisteminden üretilebilmektedir. Bu bisikletlerde en önemli parametre toplam ağırlık olduğundan maliyet faktörü büyük ölçüde göz ardı edilir. Bununla birlikte, jantın frenler ile temas ettiği kısımlarda cam-epoksi tabakasının kullanıldığı örnekler bulunmaktadır. Burada hedeflenen yapının ağırlığını arttırma riskine rağmen maliyetleri düşürmeyi göze almak değildir. Cam-epoksi sistemi, frenler ile jantın sürtünmesinden oluşan mekanik aşınmaya karşı karbon-epoksi sisteminden daha iyi performans gösterir. Amaç, bu işlevsel özelliğin iyileştirilmesidir.

Bu nedenle, kompozit sistemlerin melezleştirilmesi, farklı kazanımlar ve kayıplar arasında arzulanan nihai özelliklere en yakın dengenin kurulabilmesi bağlamında geleneksel kompozitlere göre daha geniş bir seçenek yelpazesi sunar.

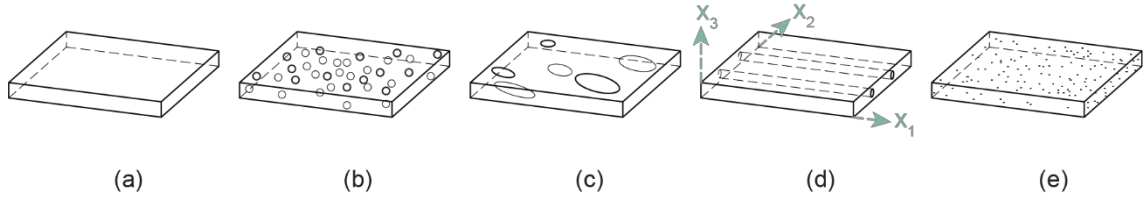
1.2.1.2. Takviyelerin geometrik formuna göre sınıflandırma

Kompozit malzeme sistemleri, anafaz olarak kullanılan malzemenin cinsine bakılmaksızın, anafaza takviye edilen bileşenlerin geometrisine göre de sınıflandırılmaktadırlar. Takviyenin formuna göre yapılan sınıflandırmada geleneksel olarak parçacık ve fiber formlarının ayrımı yapılmaktadır. Ancak bazı kaynaklarda parçacık olarak adlandırılan takviyeler başka kaynaklarda ince tabaka (flake) olarak nitelenebilir. Yine bazı kaynaklarda parçacıklar büyüklüklerine göre büyük-parçacık destekli ve dağılım (dispersion) destekli olarak aktarılan sistemler için diğer kaynaklarda parçacık destekli ve nanokompozit kategorileri uygun görülebilmektedir.

Kullanılan takviyenin üç yöndeki uzunluk oranı (aspect ratio), fiziksel ölçeği ve dağılımı, uygulanan yüzey işlemi (surface treatment), topaklanma (aggregation) ve yönelim karma sistemin özellikleri etkilemektedir [17]. Takviye bileşenlerin geometrisine göre yapılan sınıflandırmalar için kullanılan terimler farklılık gösterse de buradaki odak noktası, kullanılan formunun kompozitin son özellikleri üzerinde etkisi olup olmadığıdır.

İki yönde yayılmış ince tabaka formundaki takviyeler, düşük uzunluk oranına nedeniyle veya tabakaların rastlantısal olarak yönlenmiş olmaları nedeniyle, takviye olarak küresel parçacıkların kullanımına yakın ve eşyönlü bir etki yaratabilirler. Aynı sistemdeki ince tabakalar, başka bir üretim yöntemi kullanılması durumunda, anafazın yüksek kayma hızına sahip akışı nedeniyle yönlenebilirler ve kompozit malzeme bazı özellikler bakımından tamamen farklı, eşyönsüz, bir davranış sergileyebilir. Böylece, ortaya çıkan görüngü farkının kısa yoldan ifadesi için, sınıflandırmada “ince tabaka” teriminin kullanımı tercih edilebilir.

Aşağıda Şekil 1.3 üzerinde, yalnızca anafaz (a); anafazın parçacık formundaki bileşenler ile (b), ince tabaka formundaki bileşenler ile (c), yüksek uzunluk oranına sahip fiberler ile (d) ve nano ölçekteki bileşenler ile (e) takviyelenmesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kompozitlerde kullanılan farklı formlardaki takviyelerin şematik gösterimi

1.2.1.2.1. Parçacık takviyeli kompozitler

Anafazın, bütün yönlerde birbirine yakın uzunluğa sahip, eş eksenli (equiaxed), parçacıklar ile desteklenmesi ile elde edilirler. Kompozitin özelliklerini değiştirmek veya geliştirmek için kullanılabilirler gibi daha pahalı olan anafaz malzemesinin yerini doldurarak maliyeti düşürmek içinde kullanılabilirler. Parçacıklar mükemmel bir şekilde eş eksenli (küresel) olmasalar bile, anafaz içindeki dağılım ve yönelimleri genellikle rastlantısal olduğundan, parçacık takviyeli kompozitler eşyönlü özellikler gösterirler.

Parçacıklar anafaza göre daha dayanımlı ve sert tercih edilirler. Parçacık-anafaz arayüzündeki adezyon yardımıyla uygulanan yükler anafaz üzerinden parçacıklara iletilir ve anafaz desteklenir. Fakat parçacıklar anafazdaki kayma (slip) davranışına etkili bir şekilde engel olamazlar. Bu nedenle parçacıklar mukavemeti arttırmaktan çok, genellikle anafazda bulunmayan alev geciktiricilik ve iletkenlik gibi işlevsel özelliklerin elde edilmesi için kullanılırlar. Dahası, ısıl eğilme sıcaklığı, çekme (shrinkage) ve son ürünün görünüşünü iyileştirme amaçlı da kullanılabilirler [18]. Elde edilecek özellikler, kullanılan anafaz ve takviye malzemesinin kullanım oranının ağırlıklı ortalaması olarak tahmin edilebilmektedir. Bu olgu, genellikle karışımlar kuralı (rule of mixtures) olarak bilinmektedir.

Bu kompozitler için seri üretime uygun birçok üretim tekniğinin bulunması, düşük maliyetlerinin yanında ayrıca bir avantajdır. Polimer anafazlı kompozitlerde, parçacık takviyesi ile düşürülen özgül ısı ve yükseltelen ısı iletkenlik üretim sürecine olumlu katkı sağlamaktadır [18].

1.2.1.2.2. İnce tabaka takviyeli kompozitler

Bu kompozitlerde kullanılan takviyeler, pul veya yaprağa benzeyen, geometrinin bir yönde değer yönlerine göre daha kısa olduğu yapılardır. İnce tabaka şeklindeki takviyelerin özgül yüzey alanı, parçacık formundaki takviyelere göre daha yüksektir. Bu nedenle mukavemet olan etkileri daha fazladır [17]. Ayrıca ince tabaka şeklindeki takviyenin geometrik eşyönsüzlüğü arttıkça esneklik katsayısına yaptığı katkı da artmaktadır [18].

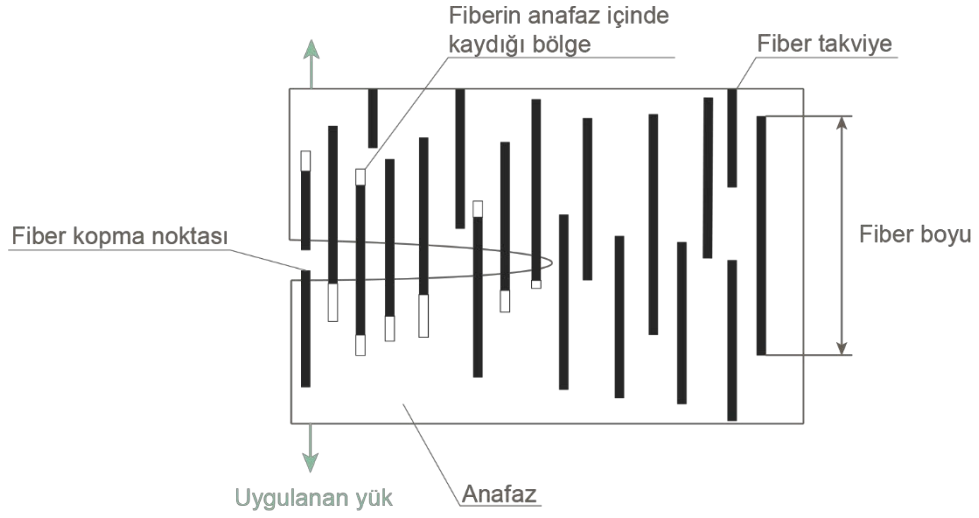
1.2.1.2.3. Fiber takviyeli kompozitler

Bir yöndeki uzunluğu diğer yöndeki uzunluklarına göre oldukça fazla olan, düzgün kesitli, kalınlığı veya çapı 250 µm değerinin altında ve uzunluk oranı (aspect ratio) 100 veya daha fazla olan yapılar *fiber* olarak anılırlar [19].

Cam fiberler 1930'lardan beri üretilenlerdir, yapısal uygulamalarda kullanılacak yüksek esnemezliğe sahip cam fiberlerin üretimi 1950'li yıllarda başlamıştır. Yapısal uygulamalarda kullanılacak ilk ileri teknoloji fiberler olan bor fiberler 1959 yılında ticarileşmişlerdir. Ardından, 1960'lı yıllarda aramid fiberler, 1970'li yıllarda karbon fiberler ve 1980'li yıllarda polietilen fiberler ticarileştirilmiştir. Diğer ileri teknoloji fiberlere silikon karbid, alümina, çelik ve tungsten örnek olarak verilebilir [12, 15–17].

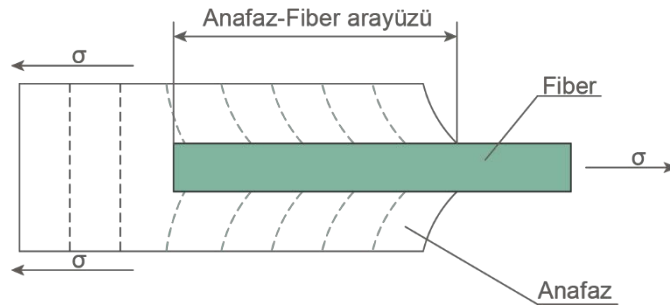
Fiberler, takviye olarak en çok kullanılan formlardan biridir. Genellikle yapısal, uygulamalarda kullanılan bu sistemlerde fiberler yükün büyük bir kısmını taşıma işlevi görürler. Fiberler, genellikle yüksek esneklik katsayısına sahip, yüksek dayanımlı fakat sünek olmayan kırılğan malzemelerden imal edilirler. Anafaz olarak sıklıkla sünek yapıda düşük esnemezliğe sahip malzemeler kullanılır. Böylece, sistem içinde fiber formunda kullanılan malzemenin yüksek mukavemet ve esneklik katsayısı gibi arzulanan özellikleri korunurken, kırılğanlıktan dolayı oluşabilecek yıkıcı (catastrophic) hasarların önüne geçilebilir. Fiber destekli kompozitler de hasar aşamalı olarak ilerler, aniden gerçekleşmez.

Şekil 1.4' de karma sistem içinde ilerleyen hasar şematik olarak gösterilmiştir. Anafazın içinde kalan fiber boyu belirli bir kritik değeri geçtiğinde, hasara neden olan yüklemeye fiberi koparacaktır. Eğer anafaz içinde kalan kısım bu kritik boydan daha küçük ise anafaz-fiber arası kuvvetler, fiberin anafaz içinde kaymasını engelleyemeyecek ve anafaz içinde Şekil 1.4' de görülen boşluklar oluşacaktır. Fiber takviyeli kompozitlerde hasara neden olan enerji, bu nedenle aşamalı olarak soğurulur.



Şekil 1.3. Fiber takviyeli karma sistemde hasarın ilerlemesi

Aşağıda, Şekil 1.5' de, fiber takviyeli kompozit malzemede fibere aktarılan yükün fiberi çevreleyen anafaz üzerinde yarattığı deformasyon şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi, fiberin bulunmadığı anafaz bölgesinde yük düzgün dağılımıyken, anafaz-fiber arayüzüne yaklaşıldıkça anafaz üzerindeki yerdeğişimler (displacement) artmaktadır. Bu nedenle arayüzde oluşan gerilimler, anafaz-fiber arayüzünün yüzey alanıyla orantılı olacaktır. Anafaz içinde gömülü olan fiberin uzunluğu ve fiberin çapı (fiberin düzgün silindirik geometride olduğu kabul edilirse), anafaz-fiber arası etkileşimin olduğu arayüz alanını etkileyen iki temel parametredir.



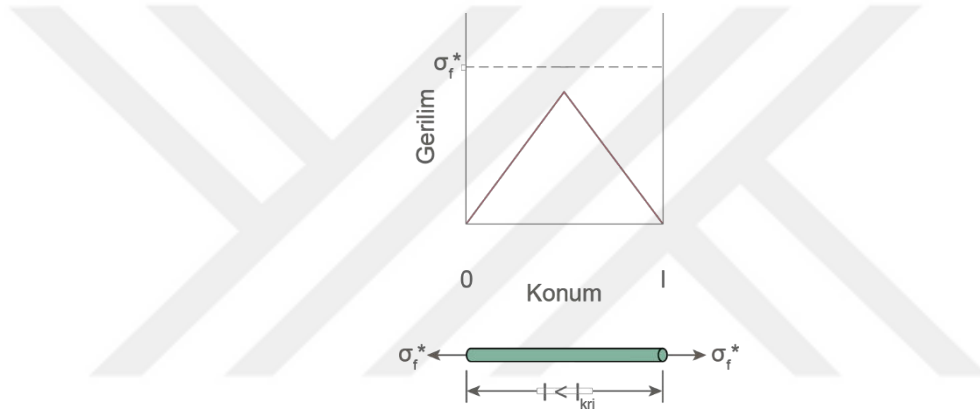
Şekil 1.4. Aktarılan yük sonucu fiberi çevreleyen anafazdaki deformasyon örüntüsü

Ayrıca fiberin hasara uğrayıp kopmaması için fiberlerin çekme dayanımlarının, anafaz-fiber etkileşiminin fiber üzerinde oluşturduğu gerilimden yüksek olması gerekir.

Böylece, arayüz içinde gömülü olan fiber için kritik boy l_{kri} , düzgün silindir şeklinde olduğu kabul edilirse fiberin çapı d , kullanılan fiberlerin azami çekme dayanımı σ_e^* ve anafaz-fiber arası etkileşimin kesme dayanımı τ_c olmak üzere; takviye olarak kullanılacak fiberlerin anafazı etkili bir şekilde destekleyebilmesi için gerekli kritik fiber boyu Denklem (1.1) ile hesaplanır [3].

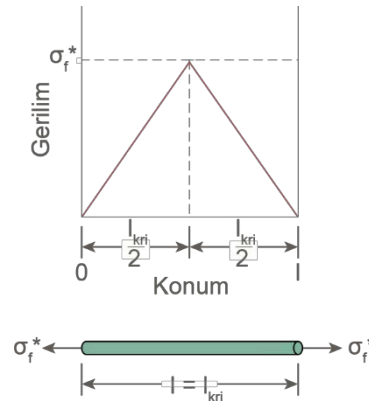
$$l_{kri} = \frac{\sigma_e^* d}{2\tau_c} \quad (1.1)$$

Şekil 1.6' da görüldüğü gibi, fiberler kritik boydan daha az uzunluğa sahiplerse arayüzde oluşan gerilim fiberlerin azami çekme dayanımından daha düşük seviyede olacak ve fiberler anafaz içinde hareket edeceklerdir.



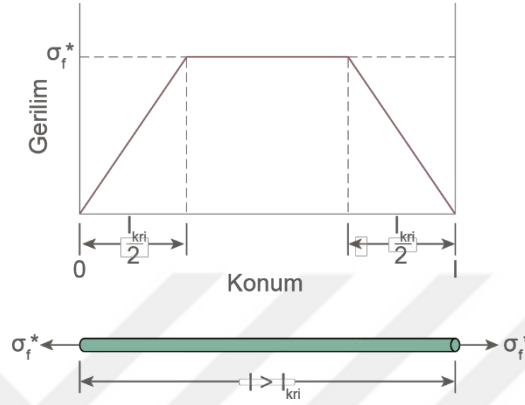
Şekil 1.5. Kritik boydan küçük fiberler üzerinde oluşan gerilim profili

Şekil 1.7' de kritik uzunluktaki fiberin uzunluğu boyunca karşıladığı gerilimin grafiği verilmiştir. Bu durumda anafaz-takviye arası etkileşim fiberin azami çekme dayanımına eşit bir gerilim yaratığından fiber tam orta kısmından deformasyona uğrayacaktır.



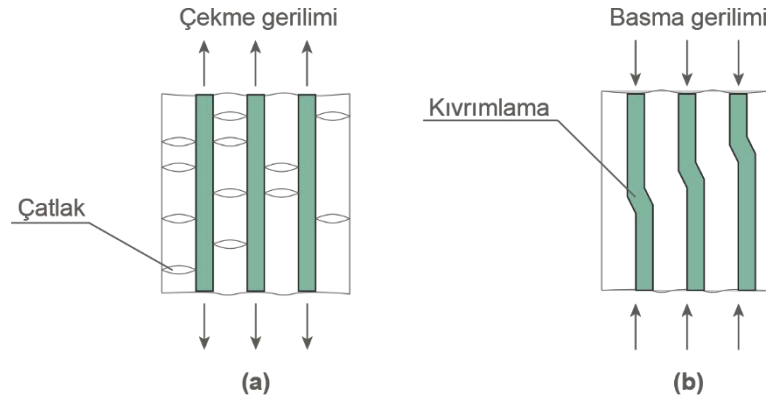
Şekil 1.6. Kritik boyda eşit uzunluktaki fiberler üzerinde oluşan gerilim profili

Takviye olarak kullanılan fiberlerin boyu, fiber çapı, fiberin azami çekme dayanımı ve anafaz-fiber arası bağın dayanımı değişkenlerine göre tayin edilen kritik fiber uzunluğunu aştığında oluşan gerilim profili Şekil 1.8' de görülmektedir. Fiber, başı ve sonundaki kritik fiber uzunluğunun yarısı kadar olan kısımlar haricinde çekme dayanımı kadar yüklenir ve en zayıf olduğu yerden hasarlanmaya başlar.



Şekil 1.7. Kritik boydan daha uzun fiberler üzerinde oluşan gerilim profili

Fiber destekli malzemeler çekme gerilimi altında yalnızca fiber hasarına veya fiberler ile anafaz arası yüzeydeki kayma hasarlarına uğramazlar. Anafaz-fiber arası bağ da oluşan gerilimin anafaz içinde aktarılması esnasında anafaz içinde çatlakların oluşması da söz konusudur. Ayrıca fiber destekli kompozit malzemelerin basma dayanımları çekme dayanımlarına göre daha düşüktür. Bunun temel nedenlerinden biri fiber geometrisindeki malzemelerin burkulmaya (buckling) uğrama eğilimleridir. Şekil 1.9' da fiber takviyeli kompozitlerde sıkça görülen anafaz çatlama ve kıvrımlama (kinking) hasar modları görülmektedir.

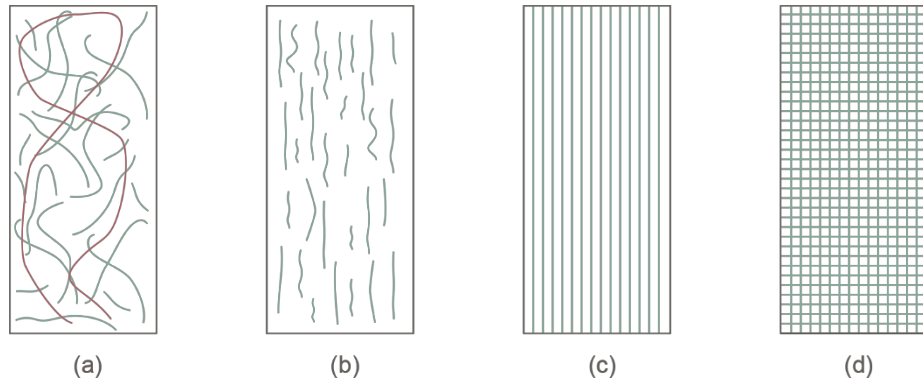


Şekil 1.8. Fiber takviyeli kompozitlerde anafaz çatlama (a) ve kıvrımlama (b)

Fiber takviyeli kompozitler, fiberlerin matris içinde dizilişlerine ve malzemenin bütüne oranla uzunluklarına göre ikiye ayrılmaktadır.

Anafaz, yapının bütününe oranla kısa fiberler ile desteklenebilir. Bu nedenle bu şekildeki kompozit yapıların, fiberler açısından süreksizlik arz ettiği söylenebilir. Bununla birlikte, kullanılan fiberlerin mutlak uzunluğu kompozit yapının tamamının ölçülerinden uzun olsa dahi, fiberler eğilip bükülmeleri ve sarmallar oluşturmaları nedeniyle yapı içindeki küçük alanlara hapsolabilirler. Bu nedenle, fiberlerin uzunlukları ile alakalı olarak sürekli (uzun) ve süreksiz (kısa) ayrımlarının yanında yönlendirilmiş olup olmadıklarının ayrımı da önemlidir. Şekil 1.10' da farklılık arz eden fiberler ile desteklenmiş karma sistemlerin şematik gösterimi verilmiştir. Şekilde, kesikli (kısa) fiberlerin rastlantısal olarak anafaz içinde yönlendiği durum (a), kesikli fiberlerin anafaz içinde yönlendirilmiş olarak dağıldığı durum (b), yapının bütünü boyunca süreklilik (uzun) arz eden fiberler (c) ve yapının bütünü boyunca süreklilik gösterirken işlevsel amaca yönelik olarak kumaş halinde dokunmuş fiberler ile desteklenmiş anafaz (d) görülmektedir. Şekilde (a), kırmızı ile gösterilen fiberin toplam uzunluğu yapının iki yöndeki ölçülerinden daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Ancak bu ve benzeri fiberlerin karma sistemin genel davranışına etkisi, şekilde görülen kesikli ve yönlendirilmemiş diğer fiberlerin etkisinden farklı değildir.

Bu nedenle fiber takviyeli kompozitler, eğer fiberler kesikli ise, yönlendirilmiş veya yönlendirilmemiş olarak; eğer fiberler sürekli ise yönlendirme özellikleri bakımından kategorize edilirler.



Şekil 1.9. Takviye fiberler açısından özelliklere sahip kompozitlerin gösterimi

1.2.1.2.4. Nanokompozitler

Kompozit malzemelerde kullanılan, parçacık, ince tabaka ve fiber formundaki takviyelerin boyutları mikrometre ölçeğindeyken, nanokompozitlerde kullanılan takviyeler nanometre ölçeğindedir. Nanokompozitler de, en az iki farklı katı fazdan oluşan malzeme sistemleridir ama fazlardan en az birinin boyutları malzeme özelliklerini dramatik bir şekilde etkileyecek olan 100 nanometre ölçeğinin altında olmalıdır [22].

Birim hacimde bulunan parçacık sayısı, parçacıkların boyutlarınının 10 kat düşmesi ile 1000 kat artmaktadır. Dolayısıyla takviye olarak kullanılan malzemenin yüzey alanı artar ve anafaz-takviye arası yüzey etkileşimlerinin neden olduğu özgün özellikler tamamıyla yeni bir malzeme sınıfı tanımlar [23].

Nanokompozitler bileşenlerinden farklı fiziksel özellikler sergilerler. Nanokompozitlerin bazı özellikleri, bileşenlerinin özellikleri toplamından daha yüksek olabilmektedir. Bu karma sistemlerden istenilen performansı elde edilebilmesi için en önemli konulardan biri, takviye malzemelerin topaklanmasını önleyerek anafaz içinde homojen dağılımlarını sağlamaktır.

1.2.1.3. Yapısal sınıflandırma

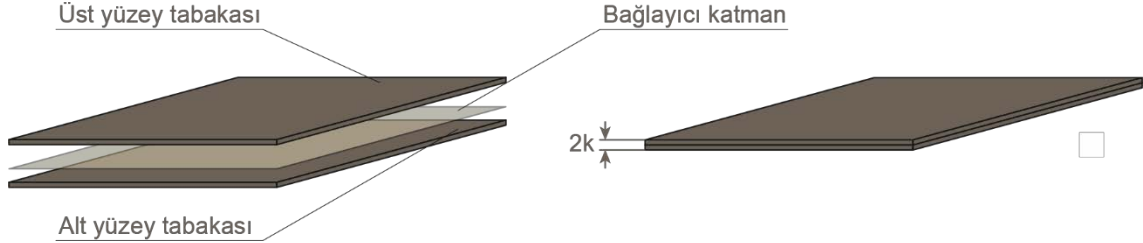
Tanım gereği kompozit malzemeler, homojen özellik gösteren metaller, polimerler ve seramikler gibi farklı malzemelerin, yığınsal (bulk) olarak farklı geometrilere bir araya getirilmeleri şeklinde de tanımlanabilirler. Bu bağlamda, genellikle tabakalı veya sandviç kompozit malzemelerden bahsedilir.

1.2.1.3.1. Sandviç kompozit yapılar

Sandviç yapılar, üst ve alt yüzeylerinde ince tabaka halinde bir çeşit malzemenin, bu ince tabakaların arasında da genellikle düşük yoğunluklu başka bir cins malzemenin bulunduğu yapılardır. Bu yüzey ve çekirdek (core) malzemelerinin belirli bir geometri ve belirli bir ölçekteki bileşimi olarak tasarlanan sandviç yapılar, yüksek eğilme esnemezliği, yüksek özgül dayanım ve yüksek burkulma dayanımı sağlarlar.

Sandviç yapılarda, yüzeydeki tabakalar, yüksek dayanımlı malzemelerden oluşur. Çekirdeğin yüzey tabakalarının arasını doldurması ile elde edilen tabakalar arası mesafe, yapının eğilmesine yol açan yüklemelere karşı moment kolu olarak görev alır. Böylece eğilme momentleri, yüzey tabakalarında çekme ve basma yüklerine dönüşür.

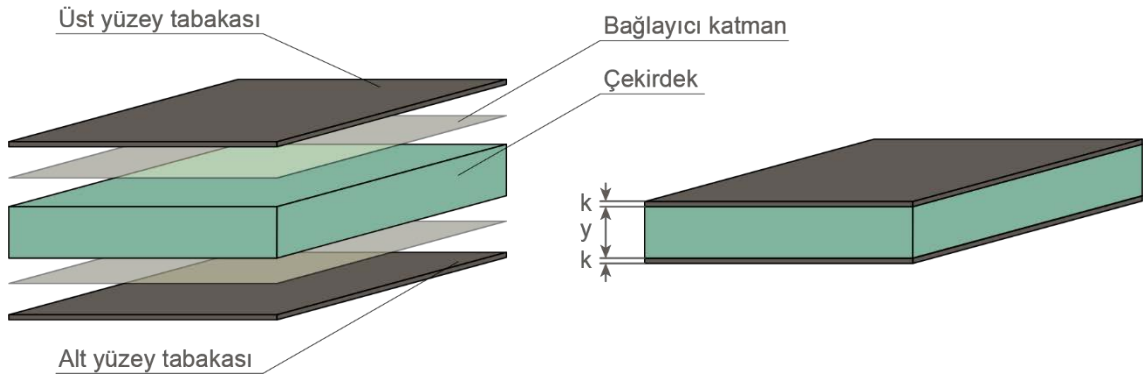
Şekil 1.11’ de yalnızca yüzey malzemesinden elde edilen iki birim kalınlığına sahip tabakalı yapı görülmektedir. Yüzey malzemeleri sıklıkla metal alaşımları ve fiber destekli polimerik kompozitlerden oluşmaktadır. Bu tabakalar düzlem-içi (in-plane) gerilmeleri karşılamaktadır.



Şekil 1.10. Yalnızca yüzey malzemesinin kullanımı ile oluşturulan tabakalı yapı

Yüzey tabakaları arasında istenilen özelliklere sahip çekirdek malzemesinin yerleştirilmesiyle sandviç yapı oluşur. Amaç genellikle eğilme ve burkulma dayanımını artırırken aynı zamanda yapının özgül ağırlığını da düşürmek olduğundan, çekirdek malzemesi olarak kesme dayanımı yüksek ve düşük yoğunluklu malzemeler seçilir. Çekirdek malzemesinin mekanik özelliklerinin yanında yanmazlık ve ısı özellikleri de önemli bir kısıt olabilmektedir. Çekirdek malzemesi olarak sıklıkla, polimer köpükleri, bal peteği yapıları (honeycomb), kauçuk ve balsa kullanılır. Yüklerin, yüzey tabakaları ile çekirdek arasında aktarımı bağlayıcı bir arayüz vasıtasıyla gerçekleşir.

Şekil 1.12’ de iki birim kalınlığına sahip yüzey tabakaları arasında keyfi kalınlığına sahip çekirdek malzemenin kullanımı ile oluşturulmuş sandviç yapının şematik gösterimi verilmiştir. Tipik bir kiriş (beam) teorisine göre çekirdek ile nihai kalınlığı dört katına (8 birim) çıkarmak, eğilme esnemezliğini başlangıçtaki değerinin 37 katına kadar arttırmaktadır. Ağırlık ise başlangıç değerinin sadece %6’sı kadar artar [24].



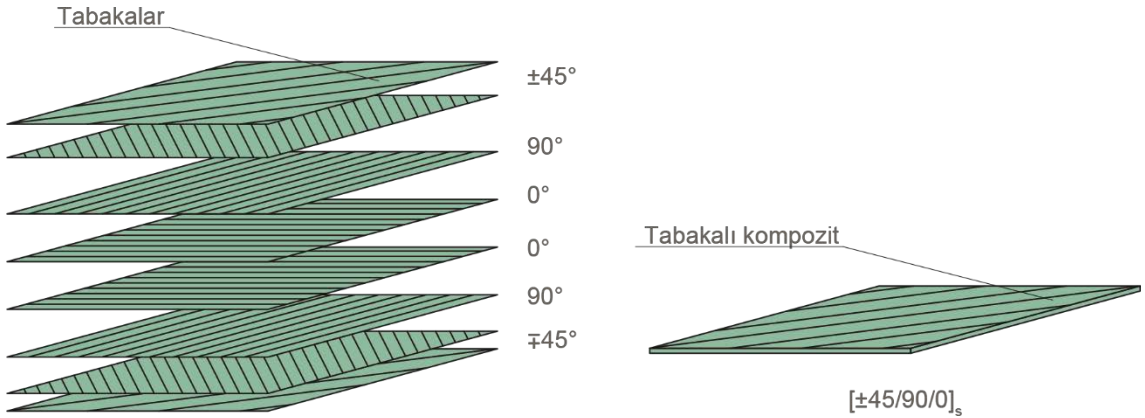
Şekil 1.11. Yüzey tabakalarının arasında çekirdeğin kullanımı ve sandviç yapı

1.2.1.3.2. Tabakalı kompozit yapılar

İnce tabakalar halindeki malzemelerin üst üste istiflenmesi ile tabakalı kompozit malzemeler elde edilmektedir. Tabakalar tek tip malzemedan oluşabilir veya tabakaların kendisi karma yapıda olabilir. Karma yapıli kompozit tabakalar çoğunlukla fiber destekli kompozit malzemelerden seçilir.

Daha önce de belirtildiği gibi fiber destekli kompozit malzemeler, fiberlerin yönlenme ve uzunluklarına göre farklı özellikler sergilemektedirler. Bu nedenle tabakalı kompozit yapılarda, yönlenmiş özellik gösteren sürekli fiber takviyeli kompozit tabakaların kullanımı nadir rastlanan bir durum değildir. Yön bağımlı özellik gösteren tabakaların, özelliklerine, tabaka kalınlığına ve yönlerine göre üst üste istiflenmesi tabakalı kompozitin arzulanan özelliklere göre tasarlanması bağlamında büyük esneklik sunar.

Şekil 1.13'de sürekli fiber destekli kompozit tabakaların farklı yönlerde üst üste istiflenerek lamine edilmesi ile elde edilen tabakalı kompozitin şematik gösterimi verilmiştir. Şekilde gösterilen tabakalar, kalınlıkları ve özellikleri bakımından birbirlerinin aynısıdır. Bu tabakaların, şekilde verileden farklı yönlerde istiflenmeleri ile oluşacak tabakalı kompozit yapı ilkinde göre daha farklı nihai özellikler sergileyecektir.



Şekil 1.12. Tabakalı kompozit yapının şematik gösterimi

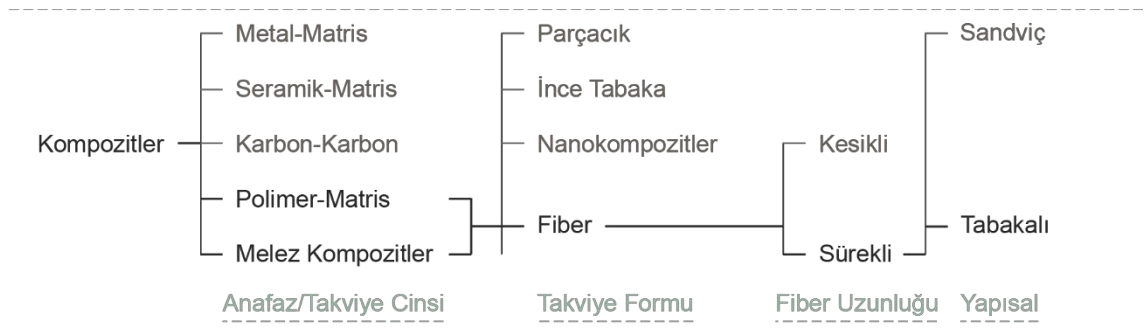
2. İLERİ KOMPOZİT MALZEMELER

Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler, uzay, havacılık ve savunma endüstrilerinin ileri teknoloji uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar [6]. Bu nedenle sürekli fiber destekli kompozit malzemeler genellikle ileri kompozit malzemeler (advanced composite materials) olarak anılmaktadırlar. Ayrıca ileri kompozitler denildiğinde, ileri fiberlerin (advanced fibers) kullanıldığı kompozitler de akla gelmektedir [7].

Yukarıda da belirtildiği gibi, kompozit malzemelerin hatta genel olarak malzemelerin, bu şekilde kategorilere ayrılması edimlerinde birçok farklı ölçüt göz önüne alınabilmektedir. Bu nedenle, daha açık ve anlaşılır olmak adına, yukarıda bahsedilen farklı sınıflandırmalar üzerinden yapılan bir *ileri kompozit malzeme* tanımı daha uygun olacaktır.

Bu tez çalışmasının odağında, sürekli fiberler ile desteklenmiş, polimer anafazlı tabakların bir araya gelmesi ile oluşan, tabakalı yapıdaki kompozit malzemeler bulunmaktadır. Seçilen üretim yöntemi (elyaf sarma) açısından, anafaz olarak tek tip reçine kullanımı daha uygundur. Bunun yanında, tabakaların tamamı tek tip fiberler ile desteklenebileceği gibi farklı tabakaların farklı fiberler ile destekleneceği melez kompozit sistemlerin kullanımı da öngörülmüştür.

Şekil 1.14' de kompozit malzemelerin sınıflandırılması ve bu sınıflandırma içinde ilgilenilen kısım şematik olarak gösterilmiştir. Çalışmanın geri kalanında *ileri kompozit malzemeler* terimi, şekilde (Şekil 2.1) koyu renkli olarak vurgulanan kısmın kapsamı ile paralel kullanılacaktır. Böylece, literatürde sık karşılaşılan, geleneksel, *ileri kompozit malzemeler* tanımının çalışma konusuna göre daraltılmasının daha yararlı olacağı düşünülmüştür.



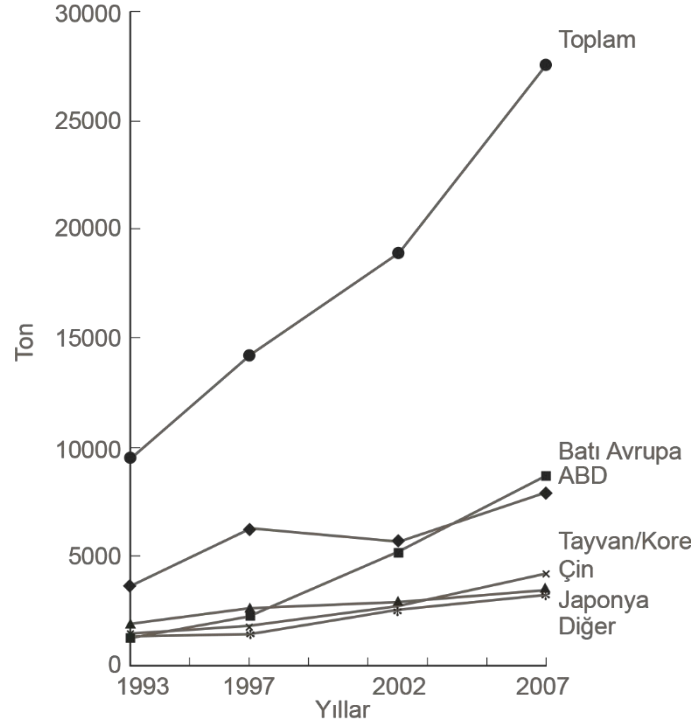
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasının şematik gösterimi

2.1. İleri Kompozitlerin Genel Uygulama Alanları

İleri kompozit malzemeler günümüzde birçok endüstride kullanılmaktadırlar. Üretim yöntemlerini geliştirme çabalarının, geçmişten günümüze sürekli olarak devam etmesinin bunda büyük katkısı olmuştur. Günümüzde ileri kompozit malzemelerin uygulama alanları çok geniş ve çeşitli olduğundan, sadece temel yapısal uygulamalara örnekler vermek yerinde olacaktır.

İleri kompozit malzemelerin ilk kullanım alanları havacılık ve uzay endüstrileri ile birlikte denizcilik uygulamalarını da içeren savunma sanayileri olmuştur. Sonrasında, üretim tekniklerinin geliştirilmesi, hem anafaz ve takviye olarak kullanılan malzemelerin hammadde maliyetlerini düşürmüştü hem de anafaz ve takviyenin bir araya getirilerek kompozit sistemi elde etme sürecinin maliyetlerini azaltmıştır. Maliyetlerin azalması ve konu üzerinde teknik bilginin yaygınlaşmasıyla ileri kompozitler daha kolay ulaşılabilir duruma gelmişlerdir.

Ayrıca, dünya genelinde değişen politik durum, savunma harcamalarında kesintilere yol açmış ve askeri uygulamalarda karbon fiberlerin kullanımında düşüş yaşanmıştır. Böylece, ortalama yarım yüzyıldır kullanımda olan karbon fiberler gibi ileri fiberlerin ticari uygulama arayışları ivmelenmiştir [25].



Şekil 2.2. Dünya karbon fiber tüketim değerleri (SRI) [26]

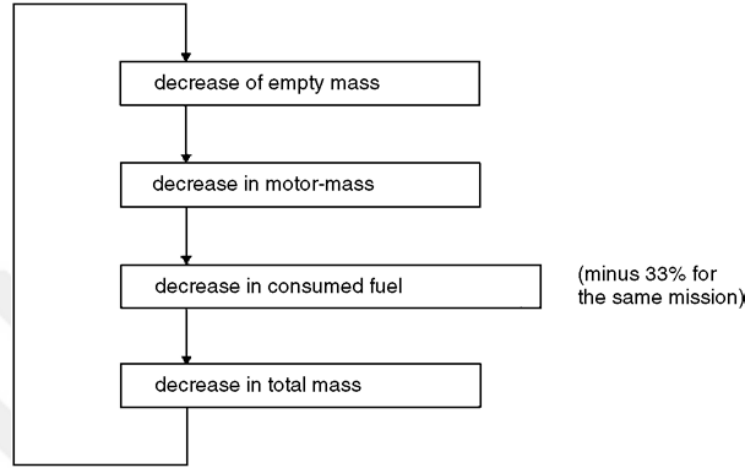
Yukarıdaki grafikte SRI danışmanlığın 2007 yılı karbon fiber tüketim tahminleri görülmektedir. Geçmişte farklı kaynaklarca 2015 yılı karbon fiber tüketimlerinin 35,000 ton olacağı öngörülmüştür [25]. Oak Ridge laboratuvarı tarafından 2016 yılında yayınlanan ve temiz enerji ekonomisinde karbon fiber tedarik zinciri için ayrılan kaynak ve yapılan yatırımlar bağlamında ticari fırsatların tanımlanmasını hedefleyen teknik raporda, üç farklı kaynağın, karbon fiber ve karbon fiber takviyeli polimerler için talep tahminlerine yer verilmiştir. Bu raporda yer alan verilere göre 2012 yılı tüketimi ortalama 45,746 ton olarak aktarılmıştır. Dolayısıyla SRI danışmanlığın 2015 yılı tüketim tahminlerinin 2012 yılında aşıldığı görülmektedir. Raporda yer alan verilere göre, talebin önümüzdeki yıllarda da ivmelenerek artacağı öngörülmektedir [27].

Bugün Türkiye kompozit sektöründe orta ve büyük ölçekli 180 şirket bulunmaktadır. Türkiye kompozit malzeme pazarı 1.225 milyar Avro ticari hacme ulaşmıştır. Uygulamada sağladığı sıra dışı avantajlarıyla, geleneksel mühendislik malzemelerine alternatif olarak kullanımları artan kompozit malzemelerin pazar payları her geçen yıl büyümeye devam etmektedir. Diğer gelişmekte olan ülkelerde olduğu gibi, kompozit sektörünün büyüme hızı Türkiye’de de Avrupa ve Dünya büyüme hızının üzerinde seyretmektedir. Bu büyüme oranının önümüzdeki yıllarda da devam edeceği tahmin edilmektedir [28].

Günümüzde, geçmişe göre daha kolay ulaşılabilen ileri kompozitlerin kullanımları, yukarıda bahsedilen ileri teknoloji uygulamalarından daha yüksek ekonomik hacme sahip; otomotiv, denizcilik, spor gereçleri, elektronik aygıtlar, altyapı, inşaat, mobilya, enerji, petrol ve sağlık gibi alanlarda oldukça yaygınlaşmıştır. İnşaat iskelesi, basamaklı merdivenler, yüksek basınç tankları, güç aktarma milleri, performans bisikletleri ve benzeri ürünler, ileri kompozitlerin kullanıldığı tipik son ürünlere örnek olarak verilebilir.

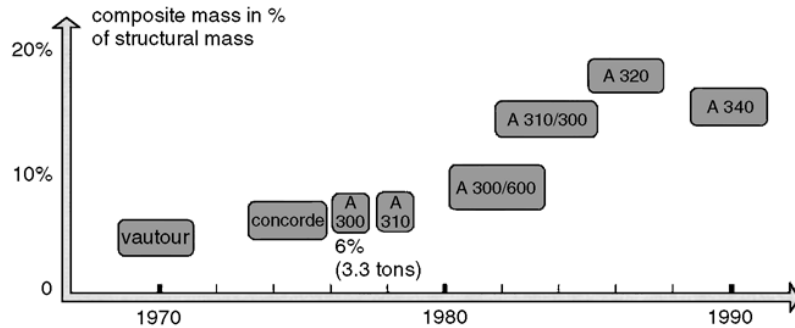
Havacılıkta ileri kompozitlerin kullanılmak istenmesinin ardında yatan temel motivasyonlardan biri, ileri kompozitlerin geleneksel alternatiflerine göre daha hafif olmasında yatmaktadır. Belirli bir uçuş menzili hedeflendiğinde, geleneksel malzemelerden imal edilmiş bir hava aracının toplam kalkış yükü ile yalnızca aracı oluşturan yapısal elemanlarının ağırlığı arasındaki fark, ileri kompozit malzemeler ile üretilmiş bir hava aracının toplam kalkış yükü ile yalnızca yapısal elemanlarının ağırlığı arasındaki farktan daha düşük olacaktır. Yani geleneksel malzemelerden üretilen araç kendi ağırlığına göre daha düşük bir oranda yük taşıyabilecektir [29].

Bu durum aşağıdaki Şekil 2.3 ile açıklanabilir. Aracın yalnızca yapısal elemanlarından oluşan kütlesi düşeceğinden, araçta kullanılması gereken motor gibi bileşenlerin de daha hafif tasarlanması mümkündür. Böylece hedeflenen menzil için gereken yakıt miktarı da azalır. Böylece toplam ağırlık düşer ve düşen toplam ağırlığı taşımaya gereken yapısal elemanların ağırlığı da tekrardan azaltılabilir.



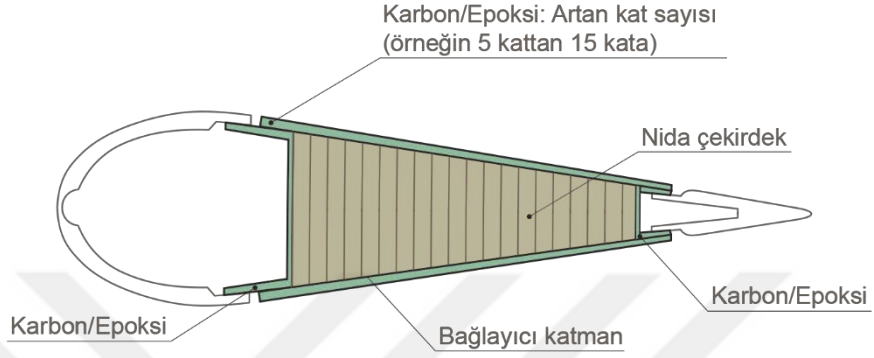
Şekil 2.3. Hafifletmenin basamaklı etkisi [29]

F-14 yatay dengeleyicilerinin bor fiber destekli epoksi yüzeylerinin 1969 yılında üretilmesinden beri fiber destekli polimerlerin havacılık endüstrisinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Başlangıçta, hava araçlarının yapısal strüktürünün yalnızca kısıtlı bileşenlerinde ileri kompozitler kullanılmaktayken, bu yapıların dayanıklılıkları güven oluşturmuş ve zaman içinde birçok farklı yapısal bileşende ileri kompozitler kullanılmıştır [21]. Aşağıdaki Şekil 2.4 'de farklı hava araçlarında ileri kompozit kullanımının zamanla artışı görülmektedir.



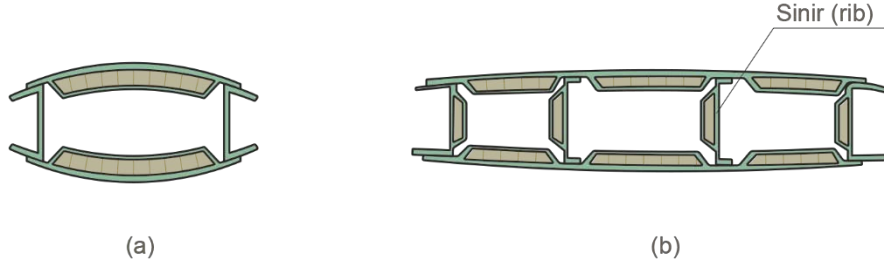
Şekil 2.4. Havacılıkta kompozit kullanımının değişimi [29]

Aşağıda havacılıkta kullanılan yapısal kompozitlere şematik örnekler verilmiştir. Şekil 2.5' de kanat kutusunu oluşturması hedeflenen karbon/epoksi tabakalı kompozitleri arasında rijitliği artırma amacıyla kullanılan nida çekirdek görülmektedir. Yapının ağırlığı çekirdek olarak kullanılan malzemenin kalınlığı ile orantılı olarak artacaktır.



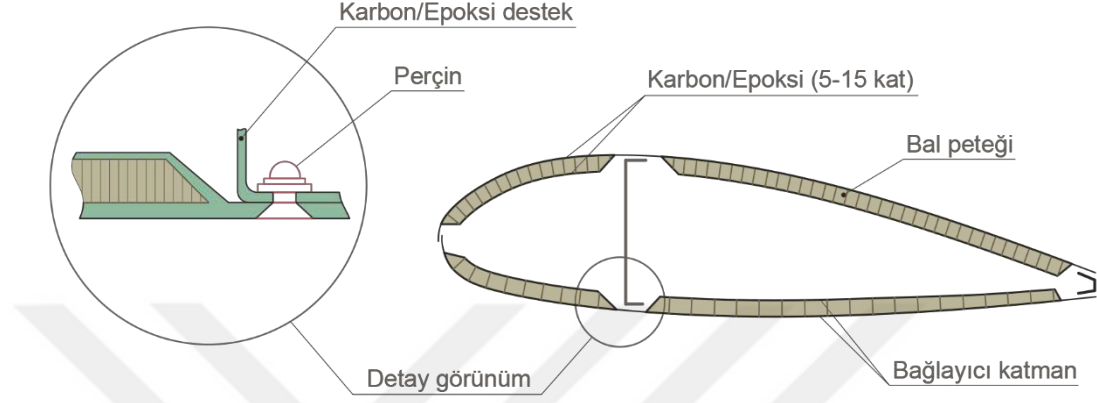
Şekil 2.5. Kanat kutusu (wing box) [29]

Eğer, çekirdeğin kalınlığı belirli bir değeri (150 mm) geçmek zorundaysa yüzeydeki tabakalı kompozitler birbirinden ayrı olarak desteklenmektedir. Şekil 2.6' da bu duruma örnek olan kısa (a) ve uzun (b) paneller görülmektedir. Uzun panellerin deforme olmamaları için araya takviye sinir (rib) yapıları atılmaktadır [29].



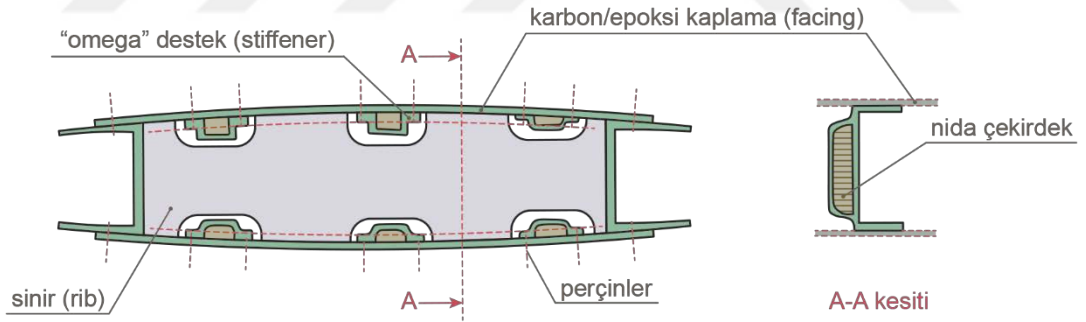
Şekil 2.6. Panellerde sandviç yapının kullanımı [29]

Şekil 2.7’ de alt ve üst yüzeylerin birbirinden bağımsız olarak sandviç yapıda üretildiği ve kesitin dikine olacak şekilde sinir kullanıldığı bir flap tasarımı görülmektedir. Rijitliği sağlayan siniri alt ve üst yüzeylere perçinlendiği detayına yer verilmiştir.



Şekil 2.7. Kompozit flap tasarımı örneği [29]

Şekil 2.8’ de alt ve üst yüzeyleri arası mesafenin giderek genişlediği bir kana kutusu için kullanılan farklı yapılara ve bunların montaj detaylarına yer verilmiştir.



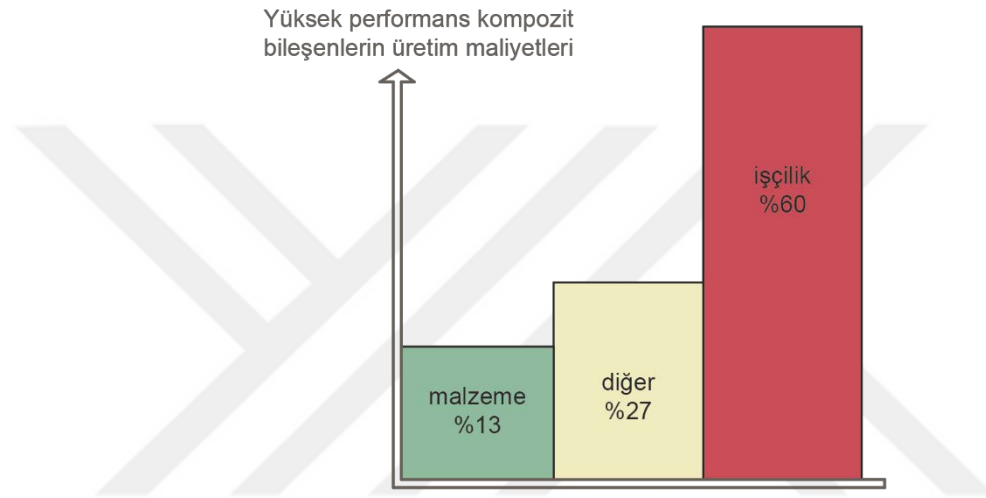
Şekil 2.8. Kanat kutusunda kullanılan takviye formları [29]

Gelecekte havacılıkta kullanılacak ileri kompozitlerin yalnızca geleneksel malzemeler için değil, ayrıca alüminyum/lityum gibi yeni hafif alaşımlar için de en az %20 ağırlık avantajı sağlayacak alternatifler olarak kullanılması hedeflenmektedir [29].

Ancak yukarıdaki şematik gösterimlerden de anlaşılabilceği gibi ileri kompozit malzemelerden imal edilen parçalar, geneli el işçiliği gerektiren karmaşık bir üretim sürecinden geçerler. Örneğin Şekil 2.8’ de görülen parçanın, sinir, “omega” destek (stiffener) ve kaplama (facing) gibi bileşenleri, teknisyenler tarafından ayrı ayrı üretilir ve yine el işçiliği ile perçinleme veya bağlayıcı arayüz kullanımı ile birleştirilir.

Bu nedenle, ileri kompozit malzemelerden imal edilen havacılık bileşenlerinde işçilik maliyetleri oldukça yüksektir. İşçilik maliyetlerinin aşağı çekilmesi için seri üretim ve otomasyona uygun ileri kompozit malzeme üretim yöntemlerinde gelişme sağlamak, uçak üreticilerinin temel amacı haline gelecektir [29].

Şekil 2.9' da kompozit bileşenlerin üretiminde, malzeme maliyetleri ve diğer maliyetlerin (kalıp, cihazlar için ilk yatırım ve işletme gibi) yanında işçilik maliyetleri görülmektedir. İşçilik maliyetlerinin %60 mertebesinde olduğu göz önüne alındığında seri üretim ve otomasyona uygun üretim yöntemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.9. Kompozit bileşen üretiminde maliyet dağılımı [29]

Gelecekte üretim maliyetlerinin azaltılması hususunda, işletme maliyetlerini azaltacak otoklav dışı üretim yöntemlerine, üretimi oldukça hızlandıran ısıllı şekillendirme (thermo forming) ve otomasyona uygun fiber yerleştirme (fiber placement) gibi yöntemlere ağırlık verileceği öngörülmektedir.

Örneğin aşağıdaki şekilde (Şekil 2.10) görülen uçak (Proteus) kabini fiber yerleştirme yöntemi ile tek parça halinde üretilebilmekte ve bu da maliyetleri oldukça düşürmektedir.



Görsel 2.1. 7 eksenli fiber yerleştirme cihazıyla üretilen Proteus kabini [26]

İleri kompozit bileşenler uçakların yanı sıra helikopterlerde de büyük oranda kullanılmaktadırlar. Helikopterin güç aktarımı ve kontrol gibi çalışan parçalarında ileri kompozit kullanım oranları %50 seviyelerindedir. Helikopterler için tasarlanan bileşenlerin uçaklar için tasarlanan bileşenlere göre mükemmellikten daha uzak olduğu göz önüne alınırsa, bu araçlarda kullanılan kompozit malzeme oranının uçaklara nazaran çok daha ivmeli şekilde artacağı ortaya çıkmaktadır. Helikopter bileşenlerine rotorlar ve helikopter pervaneleri örnek olarak verilebilir.

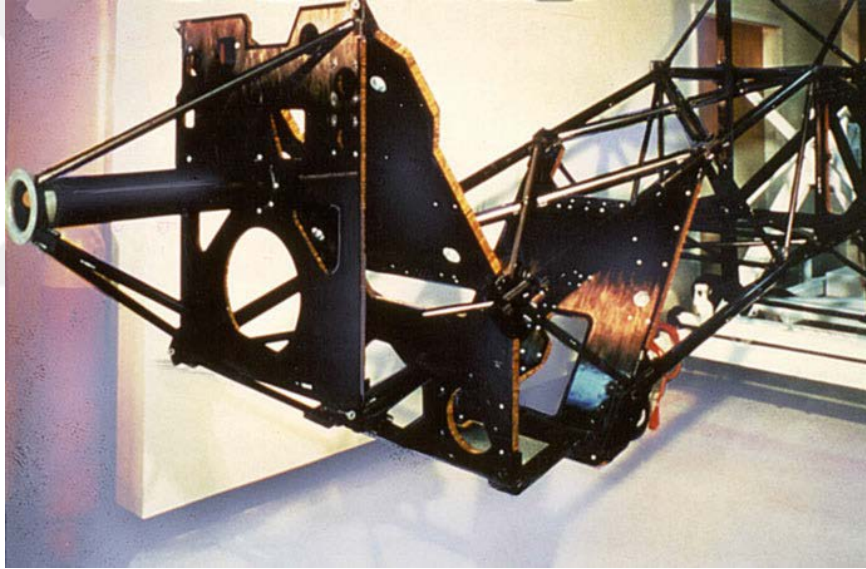
Uçak ve helikopter pervanelerinde kompozit kullanımı yüksek yorulma direncinin yanında karmaşık geometrilere üretim imkânı sunmaktadır. Polimer esaslı ileri kompozitler ayrıca turbo fan jet motorlarında da kullanılmaktadırlar. Şekil 2.11' de General Electric firmasının GENx turbo fan jet motorunda kullandığı motor bıçakları görülmektedir.



Görsel 2.2. GENx turbo fan motorunun karbon fiber/epoksi bıçakları (blade) [20]

Boeing 787 ve 747 kullanılan GEnx motorunun, önceki versiyonlarına göre daha sessiz ve verimli çalıştığı, ayrıca daha yüksek baypas oranına sahip olduğu vurgulanmaktadır [20].

Havacılıkta olduğu gibi uzay uygulamalarında da ağırlığı azaltmanın önemi büyüktür. Bunun yanı sıra yörüngedeki yüksek sıcaklık değişimlerine rağmen boyutsal kararlılık gösterecek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, otomatik olarak açılıp kapanma özelliğine sahip 5 m çapındaki bir uydu anteninin, gönderdiği veya topladığı sinyallerin kalitesi açısından çok yüksek boyutsal kararlılığa sahip olması gerekmektedir. Bu tip uygulamalarda düşük termal genleşme kat sayısı ve yüksek özgül mukavemet değerleri açısından karbon fiber takviyeli kompozitler sıklıkla kullanılmaktadırlar. Şekil 2.12' de Intelsat 5 uydusunun ana strüktür ve antenlerinin ileri kompozit malzemelerden üretildiği görülmektedir.



Görsel 2.3. *Intelsat 5 uydusunun strüktür ve antenlerinin ileri kompozit yapısı [20]*

Denizcilik uygulamalarında, özellikle korozyona olan dirençleri ile ön plana çıkan polimer esaslı ileri kompozitler birçok bileşende sıklıkla kullanılmaktadır. Küçük kanolarda büyük yatlarla kadar birçok deniz aracının gövdesi cam veya karbon takviyeli kompozit malzemelerden üretilebilmektedir. Günümüzde rekreasyon amaçlı kullanılan botların neredeyse %90'ı ya cam fiber takviyeli polyester yada cam fiber takviyeli vinilester reçineler ile üretilmektedir [21]. Savunma sanayisi açısından bakıldığında, binlerce metre derine dalabilen denizaltılar, eskortlar, devriyeler ve botlar ilk akla gelen denizcilik uygulamalarıdır.

Aşağıda, Şekilde 2.13' de Hyperion 2 yatının 59 m uzunluğundaki tek parça direği görülmektedir.



Görsel 2.4. Hyperion 2 yat direği [26]

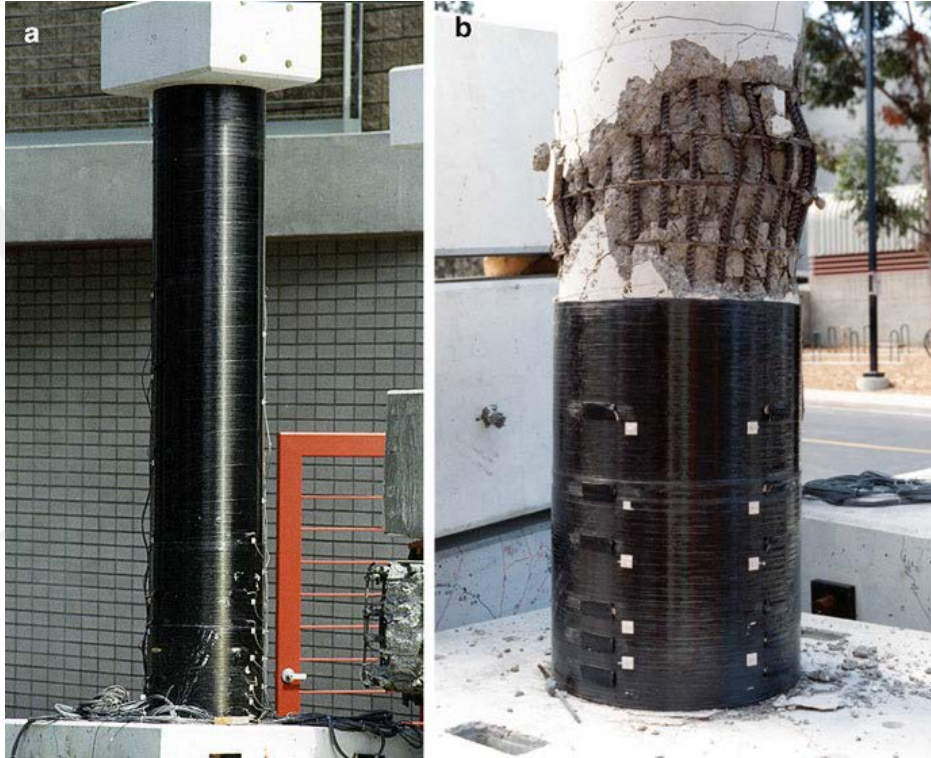
İleri kompozit malzemeler, köprüler, binalar ve diğer sivil altyapı uygulamalarında, beton ve çeliğe alternatif olabilecek büyük bir potansiyele sahiptirler. Bunun temel nedeni, polimer esaslı kompozit malzemelerin sivil altyapı uygulamalarında büyük bir problem teşkil eden korozyona olan dirençleridir. Korozyon direnci sayesinde yapıların ömrü uzarken, bakım ve tamir masrafları azalır.

Özellikle tuzlu suya maruz kalan köprülerde kullanılan beton, içindeki çelik desteklerin korozyona uğramasıyla zamanla çatlayarak kullanılmaz hale gelir. Bunun yanı sıra, altyapı uygulamalarında kullanılan kompozit malzemelerin hafif olması, bu yapıların taşıyabileceği yük miktarını arttırmakta, köprü bileşenlerinin taşınması ve montajını kolaylaştırmakta ve daha uzun köprülerin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [21]. Şekil 2.14' de cam takviyeli polimer (CTP) köprünün Almanya B3 otoyolu üzerine yerleştirilmesi görülmektedir.



Görsel 2.5. CTP köprünün Frankfurt yakınlarındaki B3 otoyoluna yerleştirilmesi [16]

Alt yapı ve inşaat sektöründe bahsedilen avantajlarının yanında, kompozit malzemeler ayrıca hasarlanmış, zayıflamış veya güncel standartların dışında kalmış betonarme veya çelik yapıların güçlendirilmesinde, tadilatında veya yenilenmesinde de kullanılmaktadırlar. Aşağıda (Şekil 2.15) betonarme sütunun karbon/epoksi kompozit kılıf ile kaplanması (a) ve basma yükünün uygulanması ile sütunun kılıflanmış kısmının dayandığı fakat kaplama yapılmamış bölgedeki çelik çubukların burkulma davranışı gösterdiği görülmektedir.

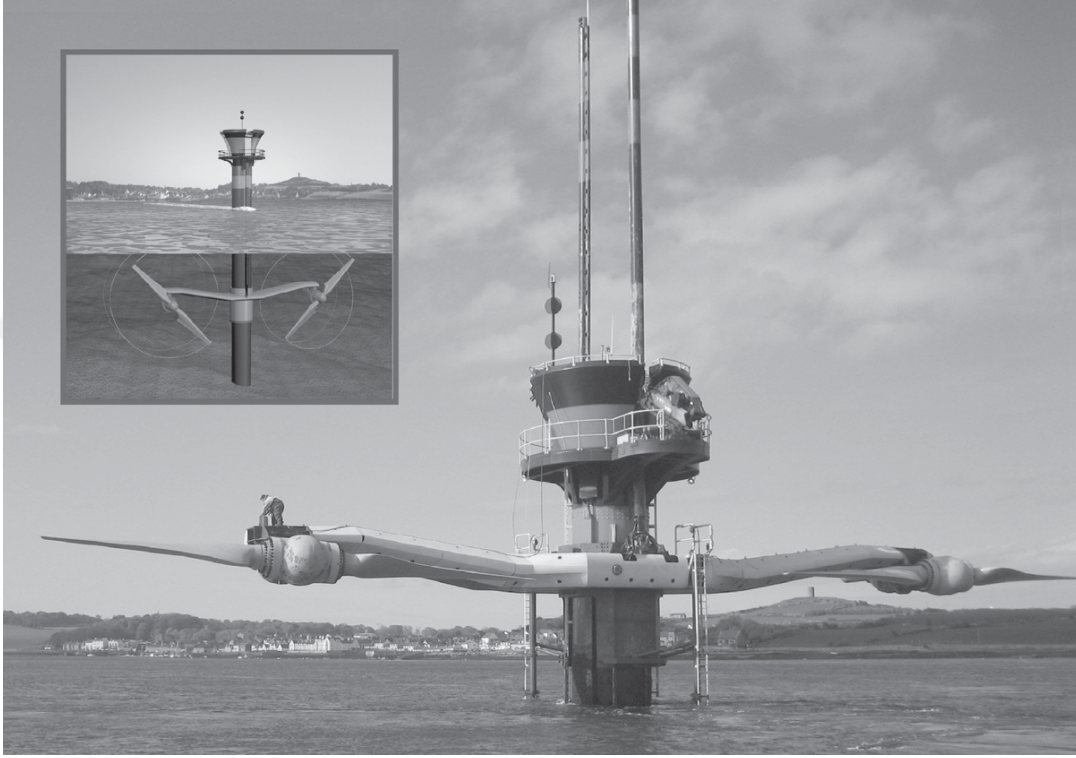


Görsel 2.6. Karbon/epoksi kılıf ile kaplanan beton sütunlar [20]

Yenilenebilir enerji uygulamalarında da polimer esaslı kompozitlerin sağladığı avantajlar bulunmaktadır. Örneğin büyük boyutlardaki rüzgâr türbinlerinin pervaneleri aynı zamanda hem hafif olmalı hem de gerekli rijitliğe sahip olmalıdır. Ayrıca, kullanılan malzeme, yıldırım gibi doğal olaylara açık olan bu yapıların gerekli şekilde korunabilmesine olanak sağlamalıdır. Bu nedenlerle rüzgâr türbinlerinde genellikle CTP malzemeler kullanılmaktadır.

Açık denizlerde rüzgâr hızı daha yüksek olduğundan enerji hasadı daha yüksek olacaktır. Polimer esaslı kompozitlerin yüksek korozyon direnci, açık deniz rüzgar türbinlerinin bakım maliyetlerinin düşük seviyelerde kalmasına imkân verir.

Bununla birlikte yüksek korozyon direnci gelgit ve dalga enerjisi hasatlarında kullanılan türbinlerinde üretimine olanak sağlamaktadır. Aşağıda (Şekil 2.16) ticari ölçekte enerji üretme kapasitesine sahip ilk gelgit türbini SeaGen görülmektedir. SeaGen karbon ve cam fiber takviyeli bileşenlerden üretilmiştir [16].



Görsel 2.7. Ticari ölçekte enerji üretimi yapan ilk gelgit türbini [16]

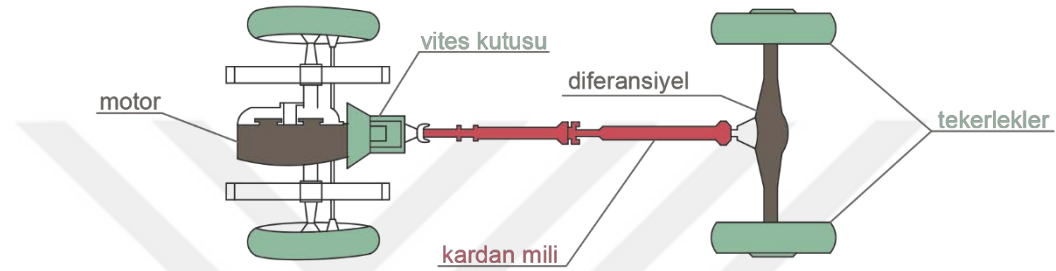
İleri kompozitlerin ağırlık kazanımları bu malzemelerin, yüksek performans otomobillerde ve spor gereçlerinde kullanımını yaygınlaştırmıştır. İleri kompozit malzemelerin kullanıldığı spor gereçlerine örnek olarak, tenis raketleri, golf sopaları, oltalar, bisiklet kadroları, su ve kar skileri, kanolar, kürekler, sörf tahtaları, oklar, okçuluk yayları, egzersiz ekipmanları, kasklar, atletik ayakkabı tabanları, vd. verilebilir.

Fosil yakıtların çevresel etkilerinin neden olduğu kaygılar ve elektrikli araçlarda sınırlı enerji depolama imkânı gibi faktörler nedeniyle ileri kompozitlerin otomotiv sektöründe kullanımının gelecekte daha da ivmeleneceği açıktır.

Bu malzemelerin diğer kullanım alanlarına örnek olarak petrol arama platformları ve sondaj borularında kullanımı, basınçlı kaplar, robot kolları, protezler ve güç aktarma millerinde kullanımı verilebilir.

2.2. İleri Kompozit Kompozitlerin Kardan Millerinde Kullanımı

En basit tanımla, kardan mili, binek araçlarda, aracın motorunda üretilen gücü aracın tekerleklerine aktaran bir yapısal elemandır. Şekil 2.17' de görülebileceği gibi, motorda krank milinden başlayan dairesel hareketi vites kutusundan diferansiyele aktarır. Eksenel simetriye sahip formlar, örneğin içi boy veya dolu silindirler, burulmaya karşı daha dirençli geometrik yapılardır [2]. Bunun yanı sıra güç aktarmadaki dairesel hareketin doğası gereği kardan milleri silindirik formlarda üretilirler.



Şekil 2.10. Güç aktarım elemanı olarak kardan milinin şematik gösterimi

Geleneksel olarak metallerden imal edilen kardan milleri, yüksek açısal hızlarda dönmeleri sebebi ile rezonansa girerek hasara uğrayabilirler. Bu nedenle, kardan millerinin eğilme doğal frekansı (bending natural frequency) çalışma koşullarında karşılaşılabilecek devirlerin üzerinde tutulmalıdır. Doğal eğilme frekansı milin uzunluğunun karesi ile ters orantılı ve kullanılan malzemenin özgül rijitliğinin karekökü ile doğru orantılı değişmektedir [30]. Bu sorunun üstesinden gelmek için, geleneksel malzemelerden üretilen kardan milleri, daha kısa parçaların bir araya getirilmesi ile çok parçalı olacak şekilde üretilmektedirler.

Çok parçalı kardan mili tasarımı, hem parça çeşitliliğini artırarak üretim ve montajlama sürecini daha maliyetli hale getirir hem de kullanılan ek parçalar ağırlığı daha da arttırmaktadır. Örneğin, parça halinde üretilen kardan milleri üzerinde üç adet kardan mafsalının bulunması, malzeme seçiminde özgül ağırlığı karma malzemelere göre daha yüksek olan geleneksel metallerin kullanılmasının yanında ağırlığı ve maliyeti arttıran unsurlardır.

Kardan millerinin üretiminde geleneksel olarak kullanılan metaller yerine sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozitleri kullanmak birçok yarar sağlar. Bu yararların en başında kompozit malzemelerin geleneksel metallere oranla daha yüksek özgül esnemezlik ve dayanımlarının olması nedeni ile yapısal elemanın kütlelerinin azaltılmasına imkân vermeleri gelir.

Atalet kütlesinin ve ağırlığın düşürülmesi güç aktarımını daha verimli hale getirecektir. Ayrıca, metallere oranla daha düşük esnemezlik modülüne sahip kompozit malzemeler, güç aktarımı sırasında dönme momentinin doruğa ulaştığı anlarda, şok sönümleyici etki göstererek güç aktarım organlarının ömrünü uzatabilir [31].

Kardan millerinin 70%'i, üretiminde alüminyum veya çelik kullanılan iki parçadan oluşan kardan milleridir [29]. Şekil 2.18' de altta iki parçadan oluşan geleneksel bir kardan mili ve üstte ileri kompozit malzemedan üretilmiş tek parça kardan mili görülmektedir.



Görsel 2.8. Tek parça (üstte) ve iki parça (altta) kardan mili örnekleri [32]

Kardan milleri endüstrinin daha yüksek verimlilik ve performans beklentilerini karşılamak amacı ile 1987 yılında ortaya çıkmışlardır. Şekil 2.19' da 1987 yılında GTO şampiyonasını kazanan Dan Gurney'in takımında başarıyla kullanılan kardan mili örneklerinden biri görülmektedir [32].



Görsel 2.9. 1987 yılında Dan Gurney'in takımında kullanılan kompozit kardan mili [32]

Kardan milini dönen bir kütle olarak düşündüğümüzde. Motorun ürettiği gücün yaklaşık %17-22'lik kısmı güç aktarma elemanlarının kütlelerinin döndürülmesine heba edilir. Ağır metal parçaların yüksek ataletleri, parçanın devrindeki her artma veya azalma enerji harcanmasına neden olacaktır. Yapılan çalışmalar kompozit malzemeler ile geleneksel çelikler arası dönme atalet momenti farklarının %45.8 ve alan atalet momenti farklarının %64.1 seviyelerinde olabildiğini göstermiştir. Bu elemanların kütlelerini azaltmanın, enerji yitimlerinin düşürülmesinin doğrudan bir yolu olduğu açıktır [33]. Literatür de yapılan çalışmalar, çelik malzemelere göre kardan millerinin ağırlığın 86.9% nispetinde (yüksek modül karbon/epoksi için) azaltılabileceğini göstermiştir [34].

Kompozit malzemelerin üstünlükleri olan, korozyona karşı direnç ve yüksek yorulma dirençleri yanında kompozit kardan mili uygulamalarında titreşim ve gürültünün azaltılması da sağlanabilir. Ayrıca bir kaza veya hasar anında kırılan metal kardan mili yola saplanarak aracı havaya fırlatabilir, araç tabanını delerek yolculara zarar verebilir ve yüksek devirlerde dönmesi nedeni savrulan parçaları çevresine tehdit oluşturabilir. Kompozit bir kardan mili ise böyle bir durumda, darbe sönümleyerek kendi yapısını oluşturan ince elyaflara ayrılacaktır.

2.3. İleri Kompozitlerin Genel Üretim Yöntemleri

Polimer esaslı kompozitlerin yüksek performans avantajları, birçok endüstrinin bu malzemelerin yeni kullanım alanlarının keşfedilmesi veya artırılması arayışını tetikleyecek şekilde ilgisini çekmiştir. Böylece, kompozit yapıların tasarımı ve üretimine yönelik evrimsel ve devrimsel yollar takip edilmiştir [35].

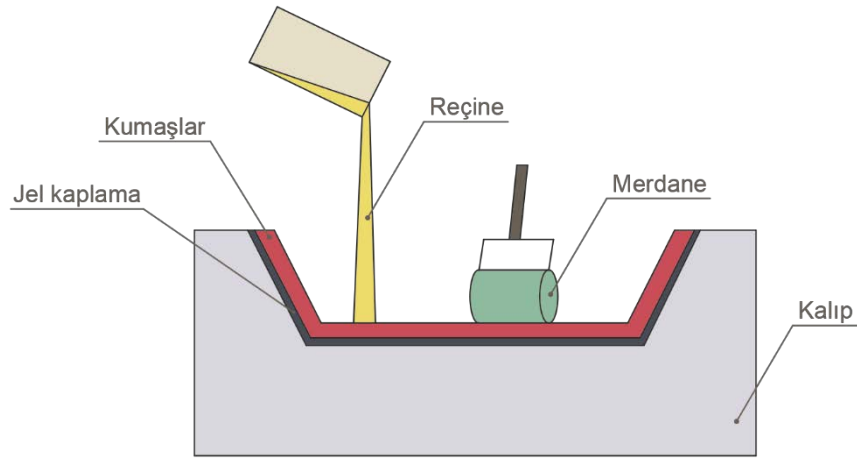
Ancak son yıllarda kompozit üretim endüstrisi maliyetler verimliliği açısından yoğun baskı altındadır. Bunun temel nedeni sürekli fiber takviyeli kompozitlerin, geleneksel malzemeler gibi seri üretim ve otomasyona uygun olmamalarıdır. Kısa fiber takviyeli kompozitler bu durumdan daha az etkilenmektedirler. Ancak sürekli fiber takviyelerin sağladığı üstün performans kısa fiber takviyeli kompozitler ile yakalanamaz. Ayrıca ileri kompozitlerin bir avantajı gibi görünen malzeme özelliklerinin amaca uygun olarak değiştirilebilmesi (tailoring) durumu, üretim süreci açısından dezavantaja dönüşebilmektedir. Çünkü bu özellik doğrudan üretim sürecinin etkisi altındadır.

İleri kompozitler ilk zamanlarda, çok yüksek olan maliyetlerine rağmen ağırlık kazanımları amacıyla yalnızca sayılı birkaç endüstri tarafından kullanılabilmişlerdir. Bu endüstriler genellikle askeri amaçlı, uzay ve havacılık endüstrileridir. Bu dönemde yapılan üretimler oldukça maliyetli olan emek yoğun iş gücüne dayalı süreçleri içermektedir. Geçmişte otomasyona uygun ve tekrarlanabilir üretim yöntemlerinin bulunmayışı, maliyetleri arttırmış böylece yüksek hacimde üretim potansiyeli olan spor gereçleri veya otomotiv gibi diğer endüstrilerde kullanımı kısıtlamıştır [35].

İleri kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin gelişmesinde, soğuk savaş döneminin bitiminden sonra askeri uygulama bütçelerinin kesintiye uğraması böylelikle üreticiler üzerinde maliyetleri düşürme ve yeni uygulama alanları bulma yönünde yoğun baskıların oluşması göz ardı edilmemelidir.

Günümüzde ileri kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla, elle yatırma (hand lay-up), reçine transfer yöntemi (resin transfer molding), ıslak kalıplama (liquid compression molding), pultrüzyon (pultrusion), elyaf sarma (filament winding), elyaf ve bant yerleştirme (automated fiber placement ve automated tape laying), vakum torbası yöntemleri (vacuum assisted resin transfer molding ve vacuum assisted process) ve otoklav yöntemleri kullanılmaktadır.

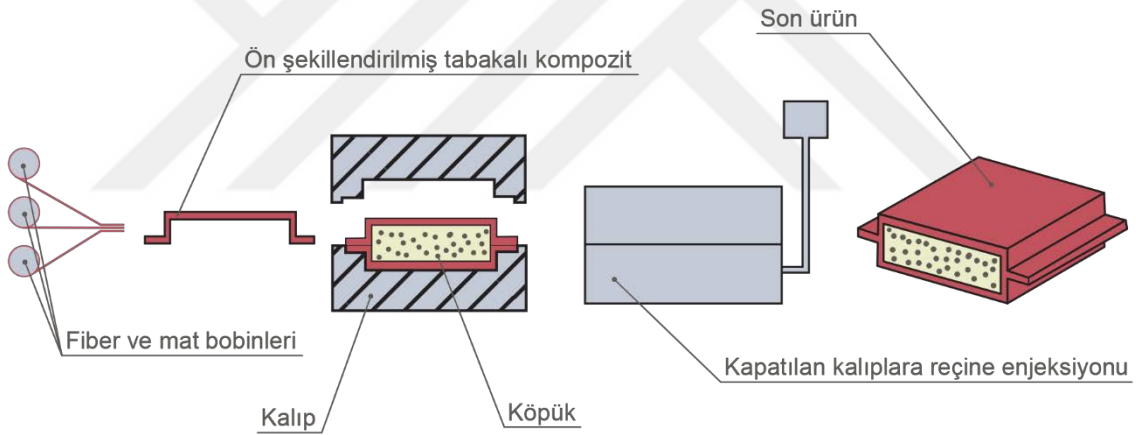
En basit ileri kompozit üretim yöntemlerinden biri olan elle yatırmada, sürekli fiberlerden örülmüş kumaşlar, fırça yardımı ile reçine emdirilerek kalıp üzerine yatırılır. Merdaneler ile baskı uygulanmasıyla kumaşların fazla reçine emmeleri önlenir. Elle yatırma yöntemi yoğun el emeği ve becerisi gerektirir. Seri üretime uygun olmadığından parça adedi düşük olan ve tekrarlanabilirlik beklenemeyen uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 2.20' de elle yatırma yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Elle yatırma yönteminin şematik gösterimi [20]

Reçine transfer yönteminde elle yatırma yönteminden farklı olarak, iç içe geçen iki kalıp kullanılır. Kalıp yüzeylerine bağlı olarak, kompozit bileşenini iki yüzeyi de istenilen hassasiyette üretilebilmektedir. Yöntem ile elle yatırmaya göre daha yüksek parça adetlerinde üretim yapılabilir ancak kalıp maliyetleri daha yüksektir. Şekil 2.21' de reçine transfer yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.

Yöntemde fiber, kumaşlar ve matların kalıplamadan önce hazırlanması gerektiğinden bu yöntemde de el işçiliği önemli rol oynamaktadır. Çeşitli yöntemler ile önceden şekillendirilen takviye malzemeleri kalıplar arasına yerleştirilir. Ardından yüksek basınçta reçine enjeksiyonu ile fiberler ıslatılır. Kullanılan malzemelere özgü kürlenme işleminin ardından son ürün elde edilmektedir. Şekil 2.21' de özellikle havacılık uygulamalarında sıklıkla kullanılan sandviç yapıdaki bir kompozit bileşenin reçine transfer yöntemi ile elde edilmesi görülmektedir. Şekilde, ön şekillendirilmiş destek malzemeleri arasına çekirdek olarak işlev görecek köpük malzemesinin konulmasının ardından kalıplama işleminin gerçekleştiği görülmektedir.

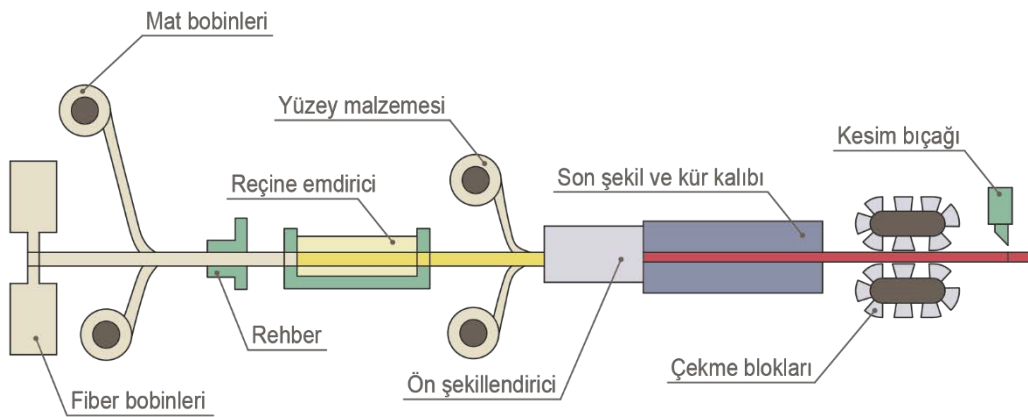


Şekil 2.12. Reçine transfer yönteminin şematik gösterimi [21]

Islak kalıplama yönteminde de reçine transfer yönteminde olduğu gibi, kompozit bileşenini iki kalıp arasında kürlenmesi söz konusudur. Reçine transfer yönteminden farklı olarak bu yöntemde, kumaşlar kalıpların arasına ıslatılmış halde konulmaktadır. Yöntem yeni bir yöntem olmamasına karşın, özellikle otomotiv sektöründe seri imalat uygulama potansiyelleri daha net görüldüğü için son zamanlarda ilgi odağı haline gelmiştir.

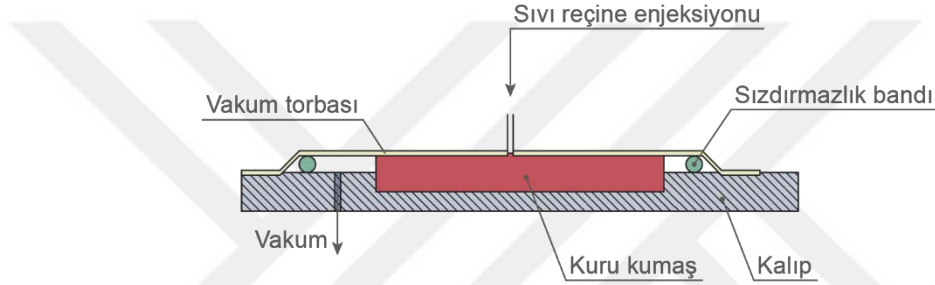
Pultrüzyon yöntemin en ilgi çekici özeliği sürekli bir üretim yöntemi olmasıdır. Şekil 2.22' de görüldüğü gibi, kompoziti takviyeleyecek fiberler ve matlar bobinlerden rehber üzerine getirilerek, parçanın kesiti boyunca içten dışa doğru istenildiği gibi istiflenir. İstiflenen takviyeler, reçine banyosu veya reçine havuzu olarak adlandırılan bir reçine emdirici düzeneğe içinden geçirilerek reçine ile ıslatılır. Kullanım alanına göre, gerekirse, reçine emdirme işleminin ardından en dışta kaplama malzemesi kullanılabilir. Bu şekilde elde edilen kompozit malzeme şekillendirme ve kürlenmenin aşama aşama gerçekleşeceği bir dizi kalıp içerisinde geçirilir. Bu sırada şekil verme ve kürlenme işleminin gerçekleşmesi için sıcaklık ve basınç uygulanır. Kompozit malzemenin bu kalıplar içinde ilerleyebilmesi için çekme blokları tarafından sürekli çekilmesi gerekmektedir. Elde edilen bileşen belirli bir uzunluğa ulaştığında kesim bıçağı tarafından kesilmektedir.

Orta derecede bir ilk yatırım maliyeti gerektiren bu yöntem, tekrarlanabilirlik, otomasyon ve sürekli üretim avantajları sunmaktadır. Ayrıca parçanın üretim doğrultusunda yönlendirilen sürekli elyaflar bu yönde dayanım üstünlükleri sağlamaktadır. Bahsedilen bu avantajlarının yanında, yalnızca basit ve sabit kesitli parçaların üretimine imkân sağlaması, şekillendirme işleminin başlangıcında fiberlerin yeterince ıslatılmamasından kaynaklanan tıkanmalar sonucu tüm operasyonun durdurulma olasılığının var olması ve aşınmadan dolayı şekillendirme ve kür kalıplarının maliyetleri yükseltmesi dezavantajlar olarak sayılabilir.



Şekil 2.13. Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi [20]

Vakum torbasının kullanıldığı yöntemlerde, önceden reçine emdirilmiş kumaşlar veya kuru kumaşlar kullanılabilir. Eğer kuru kumaşlar kullanılıyorsa, metal kalıba istiflenen kumaşların üzerine hava sızdırmazlığını sağlayacak şekilde bir vakum torbası geçirilir. Vakum torbası-kalıp düzeneğinin uygun bir bölgesinden parçaya enjekte edilen reçine, vakum yardımı ile başka bir bölgeden tahliye edilir. Bu sırada takviye malzeme ıslatılmış olur. Vakum torbası ve kalıp arasında, kalıp ayırıcı katmanlar, vakumun homojenliğini sağlayacak gözenekli kumaşlar (distribution media) ve membranların kullanılması (vacuum assisted process) mümkündür. Önceden reçine emdirilmiş kumaşlar genellikle havacılık sektöründe tercih edilmektedirler. Aşağıda (Şekil 2.23) yöntemin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 2.14. Vakum torbası yönteminin şematik gösterimi [21]

Takviye malzemelerin kalıba istiflenmesinin yanı sıra vakum torbası düzeneğinin hazırlanması da işçilik gerektirdiğinden, bu yöntem genellikle az sayıda parçanın üretildiği uygulamalarda kullanılmaktadır. Yöntem ile oldukça büyük boyutlardaki parçalar üretilebilmektedir. Yöntemin, parçanın kesit kalınlığının değişmesi, porozite ve kuru kalan bölge gibi sıkıntıları bulunmaktadır. Bu nedenle sıklıkla otoklav ile birlikte kullanılmaktadır.

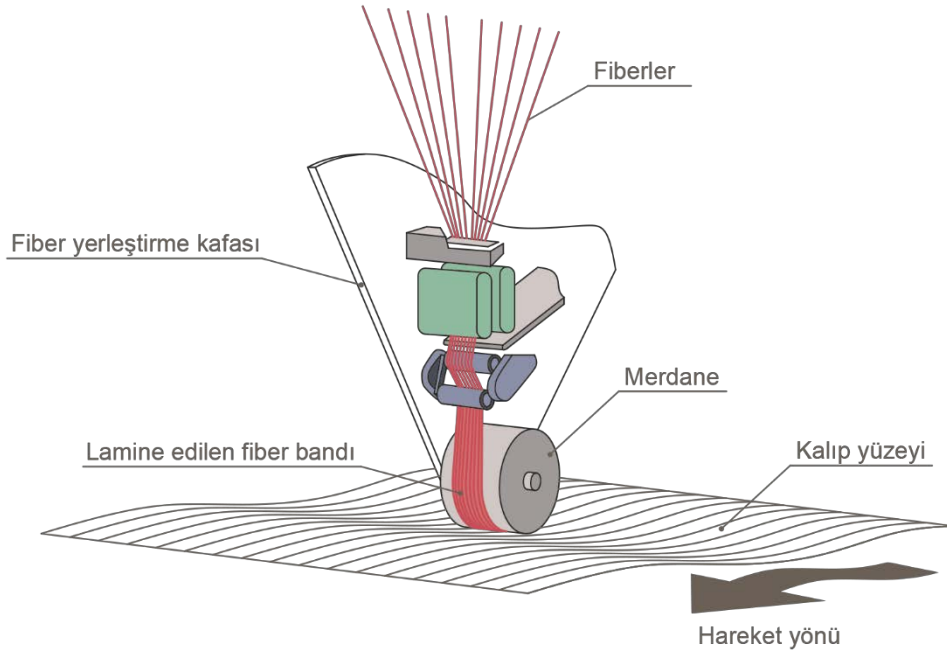
Temelde, otoklav, basınç ve sıcaklığın eş zamanlı olarak ayarlanabildiği bir basınçlı kaptır. Parçalar, vakum torbası düzeneği bozulmadan otoklav içine alınırlar. Ardından otoklav içerisindeki yüksek basınç ve sıcaklık koşullarında kürlenirler. Böylece parça içindeki porozite ve kalınlık değişimi gibi sorunlar azami seviyeye indirilir. Otoklavların sınırlı hacimleri ve yüksek işletme maliyetleri üreticileri otoklav dışı üretim yöntemleri arayışına itmiştir. Vakum torbası yöntemlerinde membranların kullanılması bu arayışın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Aşağıda kompozit üretiminde kullanılan bir otoklav örneği görülmektedir.



Görsel 2.10. Kompozit üretiminde kullanılan bir otoklav örneği [20]

Otomatik fiber ve bant yerleştirme tekniği, son yıllarda adından sıklıkla söz edilen, ileri kompozit üretiminde seri üretim ve otomasyona uygunluk, yüksek tekrarlanabilirlik, karmaşık geometrideki parçaların üretimi ve aynı zamanda termoset ve termoplastik reçinelerin kullanımına olanağı sunan devrimsel bir yöntemdir. Şekil 2.25' de yöntem şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.15. Otomatik fiber ve bant yerleştirme tekniğinin şematik gösterimi [20]

Yöntem, bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) bir kafanın kalıp yüzeyi üzerinde istenilen bölgelere fiber veya bant formundaki takviyeleri yerleştirilmesi şeklinde özetlenebilir. Genellikle önceden reçine emdirilmiş termoset veya termoplastik takviyeler kullanılmaktadır. Termoplastik anafaz kullanımı durumunda, ısı uygulaması ile anafaz kafa içerisinde eritilir ve baskı merdanesinden geçerek kalıp yüzeyine uygulanır. Kompozit malzemenin ortam sıcaklığında soğumasının ardından istifleme gerçekleştirilmiş olur. Termoset kullanımında ise, fiber veya bantların merdane yardımı ile kalıp üzerine basılmasının ardından ultraviyole ışınlar veya elektron demetleri ile son kütleme gerçekleştirilir. Yöntemin bir avantajı da iskarta oranlarını büyük ölçüde düşürmesidir. Fakat cihazlar için gereken ilk yatırım maliyetleri, bahsedilen diğer yöntemlere göre oldukça yüksektir.

2.4. İleri Kompozitlerin Elyaf Sarma Yöntemi İle Üretimi

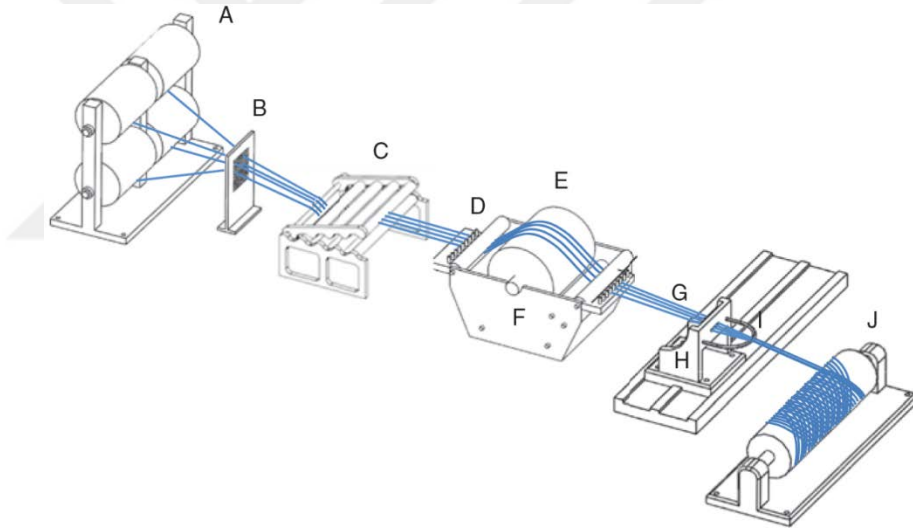
Elyaf sarma metodu 1940'lı yıllardan beri kullanılmakta olan bir ileri kompozit üretim yöntemidir [32]. Elyaf sarma metodu genel olarak silindirik veya aksel simetrideki veya küresel geometrideki içi boş kompozit parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Yöntem ile kimyasal ve yakıt depolama tankları, basınç tüpleri ve roket motoru kabukları, borular, güç aktarma milleri gibi parçalar üretilebilmektedir. Özellikle 90'lı yıllardan sonra bilgisayarlı kontrol sistemlerinin gelişimi ile daha karmaşık şekiller de üretilmeye başlanmıştır. Bunlara örnek olarak uçak gövdeleri, baretler veya kasklar, helikopter pervaneleri ve rüzgâr türbinleri verilebilir.

Sarma işlemi, önceden reçine emdirilmiş (prepreg) bantların (kuru sarma) veya işlem sırasında reçine banyosundan geçirilerek ıslatılan fiberlerin (ıslak sarma), dönen merdane üzerine istenilen kat sayısı ve açıları ile biriktirilmesi sonucunda tamamlanır. Fiberler veya prepregler merdane üzerine belirli bir gerginlik ve hız ile sarılır. Eğer reçine termoplastik ise işlem sırasında ıslanmış fiberler üzerine ısı uygulanır. Eğer reçine termoset ise sargı merdane ile birlikte otoklavda veya seri üretimde ilerlerken kürlenebilir. Bu nedenle işlem sırasında kürlenmeden veya reçinenin ısıtılmasından dolayı ortama ısı yayılır. Ayrıca gerilerek sarılan fiberler arasındaki kürlenmemiş reçine fiber yönlenmelerinde kaymalara neden olabilir. Dahası, fiber bantları arasında kalabilecek hava nedeni ile kompozit içinde küçük boşluklar (voids) oluşabilir. Merdanenin veya kompozitin sıcaklık değişimleri ile genleşmesi termal gerilim ve gerinmelerin oluşmasına sebep verebilir. Bu gerinimler, başlangıçta sarılım sırasında fiberlere uygulanan gerginlik sonucu oluşan gerinimlere eklenir [35].

Birbirinden bağımsız olarak seçilip kontrol edilebilen süreç değişkenleri, sarma hızı, fiber gerilimi ve ısıtma derecelerdir. Bu nedenle süreç modellenmesi, merdane ve kompozit içi sıcaklıkları, kürlenme seviyelerini, viskositeyi, fiber pozisyon ve açılarını, gerinim ve gerilmeleri, poroziteyi ve sarma ve kürlenme zamanlarını dikkate alarak yapılmalıdır. Hareket eden fiberler içinde reçine taşınımı (transport), kürlenme kinetiklerine bağlı olarak vizkositedeki değişimler; akış, enerji ve reaksiyon kinetiklerinin çalışılmasını gerektirir [35].

Bu yöntemle alakalı birçok üretim yöntemi varyasyonu bulunmaktadır. Reçine banyosu ile emdirme yöntemi endüstride baskın olarak kullanılan yöntemdir ve genellikle termoset reçine sistemlerinin kullanılmasını içerir. 'Reçine Sistemi' terimi önceden karıştırılmış reçine ve sertleştirici bileşeni ifade etmek için kullanılır.

Geleneksel ıslak elyaf sarma makinesinin şematik gösterimi şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Geleneksel elyaf sarma makinesinin şematik gösterimi [36]

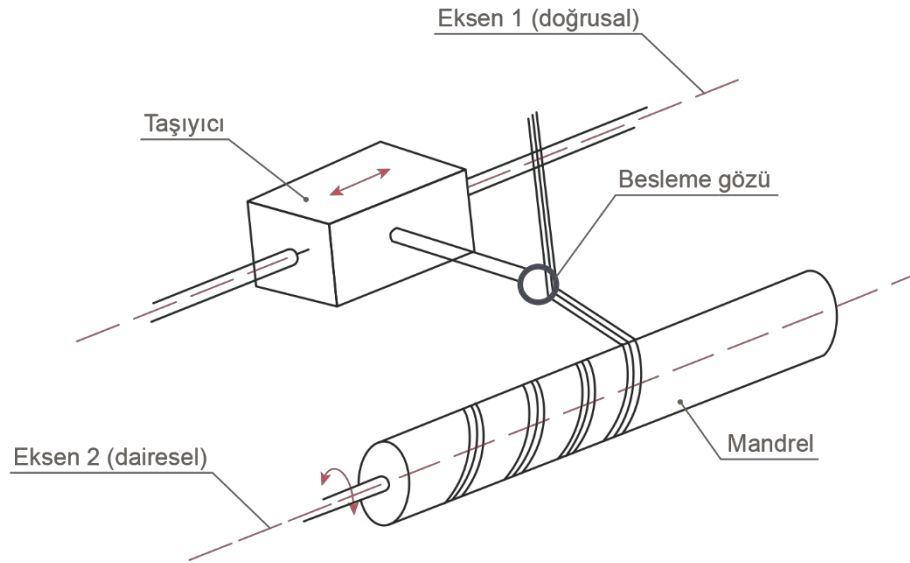
Bobinlerden gelen takviye fiberler (A) bir seri kılavuzdan (B) ve gergi sisteminden geçirilir (C). Fiber, bir birine dolaşmalarını engelleyen pimler arasından geçirilirler (D). Bahsedilen aşamalardan geçerek dönen ıslatma davulu üzerine gelen fiberler üst üste gelmeyen homojen bir dağılımda ve gerilimdedirler (E). Fiberler, dönen ıslatma davulu yardımıyla reçine banyosundan gelen reçine sistemi ile ıslatılır (F). Reçine sisteminin bileşenleri (örneğin, epoksi ve âmin) reçine banyosu içine boşaltılmadan önce gerekli oranlarda karıştırılmıştır.

Reçine emdirilmiş fiberler (G), fiberleri yatayda yönlendiren doğrusal eksene (H) ve ayrı reçine halatlarını şerit veya bant şeklinde bir araya toplayan besleme gözüne (D-gözü) gelmiştir (I). Bu şerit dönen eksen üzerindeki merdaneye sarılır (J). Yatay yönlendiricinin dönme eksenine paralel hareket hızı ve merdanenin dönüş hızının oranları sarım açılarını belirlerken toplam dönüş sayısı da kat kalınlığını verir [36].

Elyaf sarma cihazları CNC sistemler ile kontrol edildiğinden otomasyona uygundur. Yöntem, tekrarlanabilir, hassas toleranslara sahip ve insan hata payı olmayan düşük fireli ürünleri çıktı olarak verebilir. En hızlı ileri kompozit üretim yöntemlerinden biri olması nedeni ile seri üretime çok uygundur. Ayrıca 2 eksenli bir elyaf sarma makinesinin ilk yatırım maliyeti pultrüzyon ve otomatik fiber yerleştirme cihazlarına göre oldukça makuldür. Eğer üretilecek parçalar çok karmaşık bir geometriye sahip değil iseler 2 eksenli elyaf sarma cihazları ile kolayca üretilebilirler.

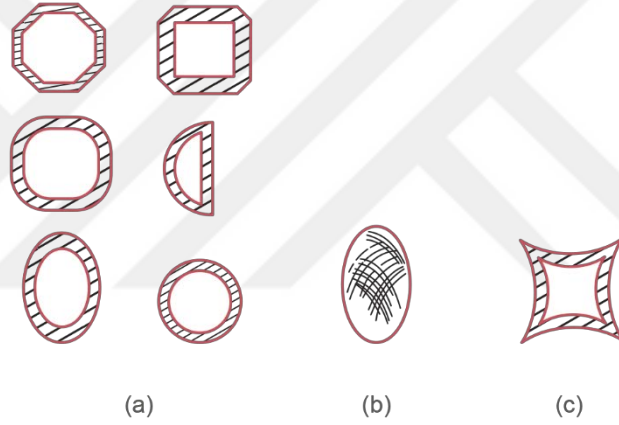
Takviye olarak kullanılacak elyaflar ek bir işleme gerek kalmadan ham halleri ile reçine sistemi ile işlenerek ürüne dönüştürülebilir. Dolayısı ile üretim maliyetleri düşüktür. Yöntem, havacılık ve uzay endüstrilerinde kullanılabilecek yetkinliktedir. Bazı uygulamalarda kompozit üretim tekniği olarak tek seçenek konumundadır. Başka bir deyişle, elyaf sarma tekniği ile katma değerli ürünler elde etmek mümkündür.

2 eksenli elyaf sarma cihazlarının kullanımı, silindirik şekilli kompozit malzemelerin yüksek performansta üretilebildiği ana proses tekniklerinden birisidir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 2.27) iki eksenli bir elyaf sarma cihazı ve cihaz üzerinde bulunan doğrusal ve dairesel iki eksen gösterilmiştir.



Şekil 2.17. İki eksenli bir elyaf sarma cihazının şematik gösterimi [21]

Süreç sırasında, fiberler birbirlerine göre belli açılarda paketlenerek tabakalı yapıyı oluşturur ve yüksek mukavemet temin ederler. Fiber demetleri, yüzeylerinin reçine ile kaplanacağı reçine banyosu içerisinde geçirildikten sonra ıslanmış demetler mandrel etrafına kontrollü bir örüntü ile sarılarak mandrelin şeklini alırlar. İstenilen açılara sahip örüntünün oluşturulabilmesi için, taşıyıcının (carriage) bulunduğu doğrusal eksenin (Şekil 2.27’de Eksen 1) ve mandrelin bulunduğu dairesel eksenin (Şekil 2.27’de Eksen 2) hızlarının oranlanması gerekmektedir. Bu yöntem, dairesel eksen etrafında simetrik, negatif eğriliğe sahip olmayan, yüksek hacim oranlı ve fiber yöneliminin kontrol edilebildiği parçaların üretiminde kullanılır. Şekil 2.28’ de iki eksenli bir elyaf sarma cihazı ile üretilebilecek parça kesitleri (a), dört veya daha fazla eksen sayısına sahip cihazlar ile üretilebilecek küresel geometri (b) ve elyaf sarma cihazları ile üretilemeyecek negatif eğriliğe sahip parça kesiti (c) örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.18. Elyaf sarma yöntemi ile üretilebilecek parça geometrileri [21]

Islak sarma işleminin tamamlanmasının ardından, reçine tipik olarak ısıtmanın da yardımı ile polimerize olarak katılaşır. Katılaşma sonrası, parça mandrelden sıyrılarak ayrılır.

Composites Turkey dergisinin “Türk Kompozit Sektörü 2015 Yılı Değerlendirmesi ve 2016 Yılı Beklentileri” raporuna göre 1,225 milyar Avroluk ekonomik hacme ulaşan fiber takviyeli polimer kompozit malzeme pazarında, üretimin %40 gibi büyük bir kısmı elyaf sarma (ES) yöntemi ile yapılmaktadır. Raporda, yöntemin pazar payı açısından en yakın rakiplerinin %19 ile Termoplastik Enjeksiyon ve %18 ile El Yatırması olduğu belirtilmektedir [28].

Geçtiğimiz yıllarda dönemin ekonomik durumuna bağlı olarak, sektörde, %8-12 arası büyüme görülmüştür. 2016 yılında sektörün %5 civarında büyüme göstereceği beklenmektedir. Uzay ve Havacılık sektöründe kompozit malzemelerin pay oranının %9'dan %12'ye, Yapı ve İnşaat'ta %6'dan, %10'a çıkacağı tahmin edilmektedir [28].

Elyaf sarma, ileri kompozitlerin üretiminde kullanılan en hızlı üretim tekniklerinden biridir. Dahası, tekrarlanabilirlik, otomasyona uygunluk, çok yönlü/esnek kullanım olanağı, nispeten karmaşık geometride üretim imkânı, görece düşük ilk yatırım (2 eksenli cihazlar), düşük işletme/hammadde maliyetleri gibi ileri kompozitlerin üretiminde nadir rastlanan özellikleri bir arada sunan yegâne yöntemdir. Bu bakımdan, Türkiye için elyaf sarma teknolojisinin stratejik önemi büyüktür.

Türkiye ve Orta Doğu ülkelerinin altyapı ihtiyaçları, CTP boru sektöründe büyük talep oluşturmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de, 2 eksenli, bilgisayar nümerik kontrolü (CNC) bulunmayan, torna tezgâhından modifiyeli elyaf sarma cihazları üretilmektedir. Bu nispeten "basit" cihazlar, CTP boru üretimi için gereken asgari teknolojiyi sağladıklarından, bu sektörde arz yaratılabilmektedir. Şekil 2.29' da iki eksenli bir elyaf sarma cihazı ile üretilen CTP boru görseli görülmektedir.



Görsel 2.11. İki eksenli bir elyaf sarma cihazı ile üretilen CTP boru örneği [37]

Ancak Türkiye'de, elyaf sarma tekniği ile üretim yapan üreticiler, genellikle, ürettikleri son ürünlerin bazı uluslararası standartlarda belirtilen isterleri karşılayıp karşılamadığına bakmakta, aynı isterleri daha hafif, daha düşük maliyet ve zaman gerektiren, tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği yüksek, daha kaliteli ürünlere eniyileme çabası içine girmemektedirler.

Oysa devamlı elyaflar, elyaf takviye çeşitlerinin en ucuz ve en güçlü olan formlarıdır. Bu elyaflar işlev isteklerine göre seçilebilir, yönlendirilebilir ve istiflenebilirler. İlave olarak bu formun maliyet ve dayanım getirileri yanında elyafların ana faza takviyelimesin sürecinin otomasyonu, iş gücü maliyetlerinin aşağı çekilmesini, tekrarlanabilirliğin artırılmasını ve fire oranlarının düşmesini temin eder. Bu bakımdan elyaf sarma sürecinin fiberler ile ilgili parametrelerine bakılacak olursa, takviye olarak seçilen fiberlerin mukavemetlerinin ve tabakaların açısız istif düzeninin son ürün performansında hatırı sayılır bir etkide olduğu görülecektir [38]. Tablo 2.1' de Filament sarma süreç parametrelerinin basınç tüpü performansına etki oranları sıralamasını görülmektedir.

Tablo 2.1. *Filament sarma parametrelerinin tüp performansına etki sıralaması [38]*

Sıralama	Deneyisel Parametre	Son ürün mekanik performansı etkileme Oranı (%)
1	Öngerilme	71
2	Fiber mukavemet değişimi	62
3	Tabakaların açısız istif düzeni	62
4	Reçine B evresi (sarım zamanı)	57
5	Sarım sırasında oluşan fiber hasarları	57
6	Fiber ıslanması	57
7	Sarım öngerilme gradyanı	48
8	Reçine muhtevası	43

2.5. İleri Kompozit Malzemelerin Özellikleri

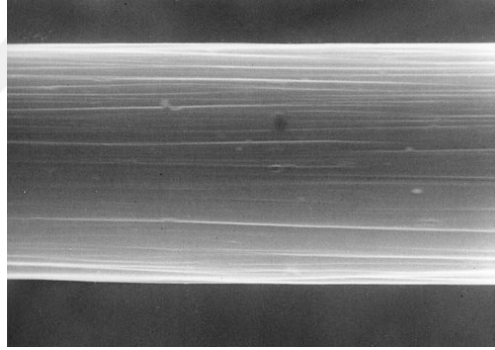
İleri kompozit malzemelerde anafaz olarak genellikle epoksi, vinilester, polyester gibi termosetler ve polieter eter keton (PEEK), polifenilen sülfid (PPS), polisülfon (PSU) gibi termoplastikler kullanılır. Polimer anafazın kullanımı, maliyetleri düşürür ve seramik, metal ve karbon anafazlı diğer kompozitlere göre daha basit üretim yöntemlerinin kullanımına olanak verir.

İleri kompozit malzemelerde cam, karbon, kevlar ve bazalt gibi fiberler kullanılmaktadır. Kullanılan fiberler yüksek esneklik katsayıları ve dayanımları nedeniyle tercih edilirler. Ayrıca yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olarak sürekli fiberlerin, küçük fiber çapına, yüksek uzunluk oranına ve yüksek esnekliğe sahip olmaları gerekmektedir.

Fiberlerin mümkün olduğunca küçük çap değerine sahip olmalarının istenmesinin temelde iki nedeni vardır. Yukarıda da değinildiği gibi, küçük çaplı fiberlerin anafaz ile etkileşime girecek yüzey alanları daha yüksektir. Böylece anafaz-fiber arayüz etkileşimleri kompozit malzemenin nihai özelliklerini daha yüksek oranda etkilemeye başlar, kompozitin tokluk ve sünekliği artar.

Küçük fiber çaplarının tercih edilmesinde ikinci neden, çap küçüldükçe fiberler üzerinde kusur bulunma olasılığının azalmasıdır [6]. Malzemedeki kusurların azalması ile mukavemet teorik limitlerine yaklaşmaktadır.

Genellikle kırılğan yapıda olan ileri fiberlerin bu doğası eğilme sırasında önemli bir engel teşkil etmektedir. İleri fiberlerin çekme esneklik katsayıları çap değişimi ile değişmezken, eğilmeye karşı esnemezlik miktarı çap ile yakından alakalıdır. Fiberlerin çapı küçüldükçe, eğilme esneklikleri artar. Prensipte, kırılğan yapıdaki ileri fiberlerin çapı yeterince küçültüldüğünde, eğilmeye karşı metaller ve polimerler kadar esnek tepki vermeleri mümkündür [20]. Şekil 2.30' da PAN bazlı karbon fiber görülmektedir.

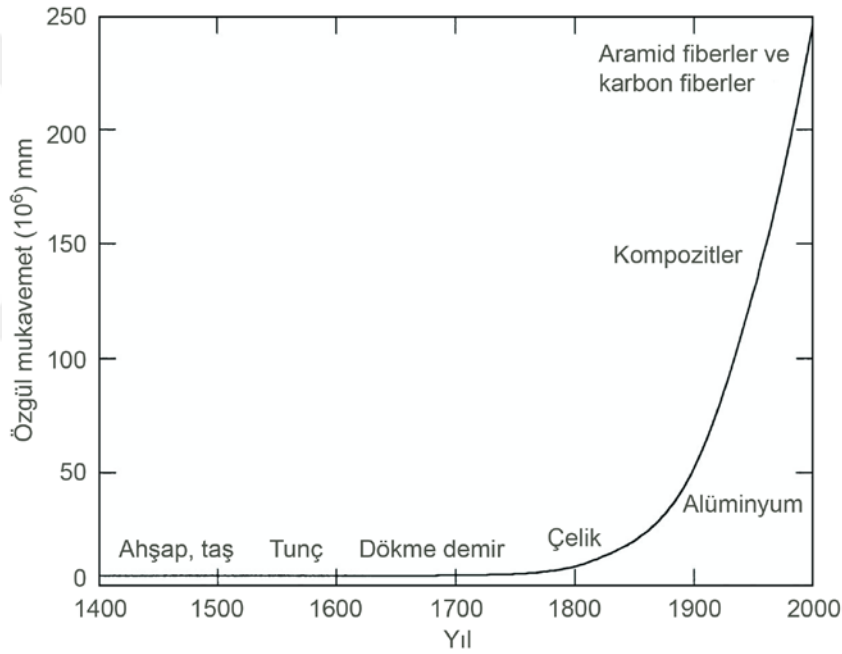


Görsel 2.12. *8 μm çapındaki karbon fiberin elektron mikroskobu görüntüsü [20]*

Yüksek fiber uzunluğu, uygulanan yüklerin büyük bölümünün anafaz üzerinden fiberlere aktarımını sağlar. Sürekli fiberlerin, kompozitin mekanik özelliklerini kesikli fiberlere göre 10-100 kat arası iyileştirebildiği bilinmektedir [6].

Sürekli fiber takviyeli kompozitler, sağladıkları bu yüksek orandaki iyileşme nedeniyle de ileri kompozitler olarak anılmaktadırlar. İleri teknoloji kompozit malzemeler geleneksel malzemelerinden farklı bazı özgün özellikler sergilemektedir. Bu nedenle geleneksel malzemelerin yerine kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. En önemli özellikleri arasında, yüksek mukavemet ve esneklik katsayısı, yüksek yorulma ve çarpma dayanımı, termal iletkenlik ve korozyon direnci sayılabilir.

Farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasında, genellikle özelliğin yoğunluğa oranı olarak ifade edilen, özgül özelliklerine bakılır [6]. İleri kompozitlerin belki de en önemli avantajları, özgül mukavemet ve özgül esneklik katsayılarının çok yüksek olmasıdır. Bu nedenle bu malzemeler yüksek dayanım gerektiren hafif malzemelerin üretiminde tercih edilirler.



Şekil 2.19. Çeşitli malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin karşılaştırılması [6]

Şekil 2.31' de bazı malzemelerin özgül mukavemet değerinin, yoğunlukla kullanıldıkları tarihlere göre sıralaması verilmiştir. Görülebileceği gibi günümüzde yaklaşıldıkça malzemelerin özgül mukavemet değerleri artmaktadır. Özgül mukavemet ve özgül esneklik katsayısı bakımından ileri kompozitlerin çelik ve alüminyuma göre daha üstün olduğu söylenebilir.

İleri fiberlerin kompozitin son özelliklerini etkileyen diğer parametreleri, fiberlerin yönlenme özellikleri, fiber kesit geometrisi ve fiberlerin malzeme özellikleri olarak sayabiliriz [6].

İleri kompozit malzemelerin özellikleri açısından fiberlerin yönlenme özellikleri önemli bir yere sahiptir. Sürekli fiber destekli bir laminede, fiberlerin yönlenmiş doğası kompozitin birçok özelliğini de yön bağımlı hale getirir. Eşyönlü (isotropic) malzemeler özellikleri bakımından yöne bağılı olmayan, eşyönsüz (anisotropic) malzemeler ise özellikleri yöne bağılı olarak değişen malzemelerdir [39]. Bu bakımdan ileri kompozit malzemeler için eşyönsüz özellik gösteren malzemelerdir denilebilir.

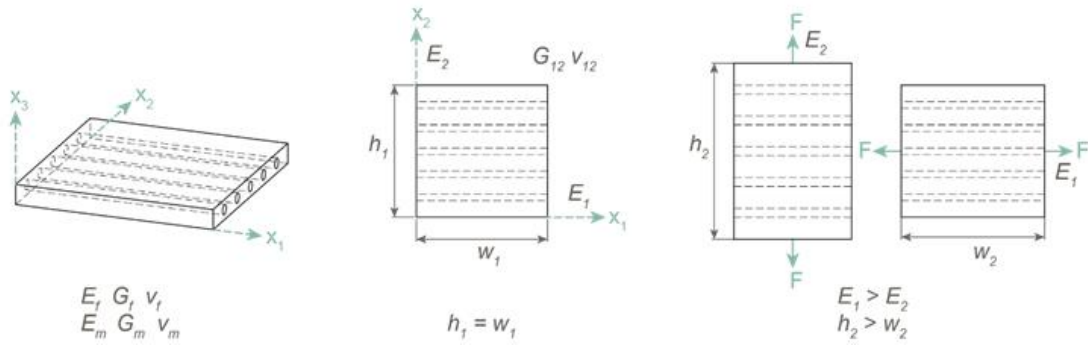
Eşyönsüz malzemelerin özellikleri, uzayda kendi yerel eksenlerinde farklı yönlerde farklı nicelikler göstermektedir. Konu, karakteristik özellikleri bakımından iki yönde etkin olan (iki boyutlu sayılabilecek davranış sergileyen) ince tabakalar olduğunda, eşyönsüz özellikleri iki boyuta sınırlayarak malzemenin davranışını kalınlık harici diğer yönlere indirgemek, malzeme davranışının tahmin edilmesinde büyük kolaylık sağlar. Bu bağlamda, ileri kompozitleri oluşturan tabakaların da ortotropik (orthotropic) özellikler sergilediğinin kabulü oldukça yaygındır.

2.5.1. İleri kompozitlerde ortotropi

İleri kompozitlerde hem kompoziti oluşturan anafaz malzemesinin hem de katkı yapması istenilen özellikleri bakımından nitelikli olacak şekilde seçilmiş takviye malzemesi eşyönlü özellikler göstermektedir. Buna karşın, anafaz ve yönlenmiş sürekli fiber takviyenin birleşiminden oluşan kompozit tabakanın özellikleri, eşyönsüz karakter sergiler [40].

Eşyönsüz malzemelerin özel bir sınıfı olan ortotropik malzemelerde, malzeme özelliklerinin simetrisi, birbirine dik üç düzlem tarafından belirlenmektedir. Tek yönde sürekli fiberlerle takviyelenen tabakalı kompozitlerde tabakanın iki boyutlu olduğu varsayımı yapılırsa, fiberlerin yönelimi ortotropik simetri eksenlerini tanımlar. Biri tabaka düzlemi içindeki fiber doğrultusu ile paralel diğeri ise düzlemde fiberlerin doğrultusuna dik olan bu iki yön, aynı zamanda tabakanın yerel eksenlerini de tayin eder [7].

Şekil 2.32' de görüldüğü gibi, tabakanın fiber yönünde (x_1) yüklendiğindeki şekil değişikliği, aynı büyüklükteki bir yük ile fiberlere dik olan yönde (x_2) yüklendiğinde oluşacak şekil değişikliğinden daha küçük olacaktır. Şekilde her iki durumda da, sırasıyla, yüzey normal vektörü yüke paralel olan kompozit kesit alanı ve kompozit tabakanın etkin olan iki yöndeki ilk ölçüleri eşit olduğundan esneklik katsayısı değerlerinin yöne göre farklılık gösterdiği açıktır. Kompozitin fiber yönündeki esneklik katsayısı değeri takviye olarak kullanılan fiberin esneklik katsayısı değerine daha yakinken, fiber yönüne dik doğrultudaki esneklik katsayısı değeri anafazın katsayısına benzerdir.



Şekil 2.20. İleri kompozit malzemelerde mühendislik sabitleri ve ortotropi [6]

Ortotropik olduğu varsayılan, sürekli fiber takviyeli kompozit tabakalarda, kompozit tabakanın mekanik özellikleri dört ayrı mühendislik sabiti ile belirlenmektedir. Bunlar, fiber yönü Young katsayısı E_1 , fiber yönüne dik Young katsayısı E_2 , kayma modülü G_{12} ve Poisson oranı ν_{12} sabitleridir [40].

Malzemenin bu dört mühendislik sabiti, kompozit tabaka içindeki fiber-anafaz oranı ile yakından alakalıdır. Tabaka içindeki fiber miktarı genellikle fiber hacim oranı, V_f , olarak belirtilir. Genel olarak kompozit tabakaların ilgilenilen özellikleri, kompozit içindeki bileşenler üzerinden basit hesaplamalar ile kabaca tahmin edilebilmektedir. Kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemenin bir yolu da, bileşenlerin özgül özelliklerini kompozite yaptıkları hacimsel katkı oranında toplamaktır. Bu yöntem, karışımlar kuralı (rule of mixture) olarak bilinir.

Karışımlar kuralında, kompozit özelliklerinin tahmini için bileşenlerin hacim oranlarından yararlanır. Örneğin, anafaz ve sürekli takviyeden oluşan iki bileşenli bir tabakalı kompozit için, takviye hacim oranı V_f ve anafaz hacim oranı V_m olsun.

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.1)$$

Karışımlar oranına göre, herhangi bir özellik, p , fiberlerin bu özellik bakımından sahip olduğu özgül değer p_f , ve anafazın sahip olduğu özgül değer p_m , referans alınarak tahmin edilebilir.

$$p = p_f V_f + p_m V_m = p V_f + p(1 - V_f) \quad (2.2)$$

Örneğin karışımlar kuralına göre kompozitin fiber yönü Young modülü hesaplanmak istenirse; eşitlik (2.3) kullanılabilir.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.3)$$

Kompozitin fiber yönüne dik doğrultudaki Young modülü, esnemezlik ($1/E$) üzerinden gidilerek aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.4)$$

Aynı savlar kullanılarak kompozitin Poisson oranı ve kayma modülü değerleri aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad (2.6)$$

Fiber takviyeli tabakalı kompozit yapıların mekaniği genel olarak makro ve mikro yapı seviyelerinde incelenmektedir. Makromekanik seviyede, kompoziti oluşturan tabakaların özgül özelliklerinin öncül olarak biliniyor olması gerekmektedir. Makromekanik analizi, tek bir tabakanın diğer tabakalar ile etkileşimini ve kompozitin toplam özelliklerine yaptığı katkının incelenmesini içerir. Ortotropik malzemeler eşyönlü malzemeler ile karşılaştırıldığında, hem malzemenin ortotropik özelliklerini irdelemek için daha karmaşık bir matematiksel model ile uğraşmak gerekir hem de laminenin mekanik tepkilerini karakterize edebilmek için daha fazla sayıda malzeme sabitine ihtiyaç duyulur. Yine de, kompozit laminenin makromekaniği, laminenin mukavemet analizi söz konusu olduğunda yeterince kavranmış durumdadır.

Verilen bir istif düzeni için gerilme-gerinme ilişkileri türetilebilir ve düzlem-içi (in-plane) ve düzlem-dışı (out-of-plane) deformasyon modları arası bağlaşım (coupling) mekanizmaları açıklanabilir. Böylece, istenilen esnemezlik (stiffness) karakterine sahip kompozit plaka tasarımı için makromekanik eşitlikler ortaya konabilir.

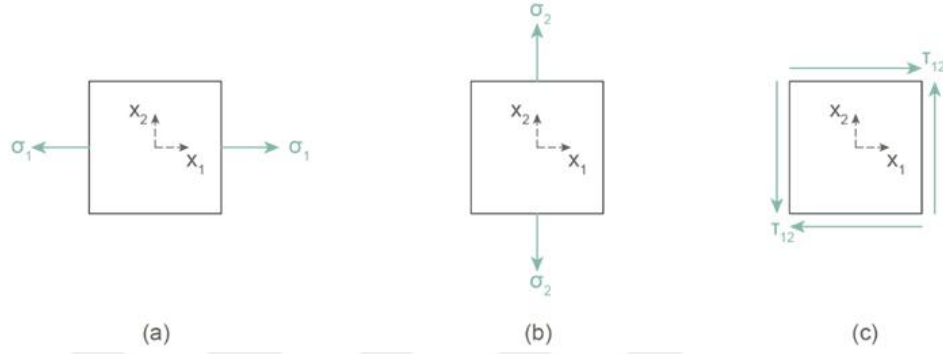
Diğer yandan, makromekanikte öncül olan tabaka özelliklerinin tahmininde dayanak olması gereken mikromekanik, o kadar iyi ortaya konulamamıştır. Mikromekanik, anafaz ile takviye bileşenleri arasındaki etkileşimler ile ilgilenmektedir. Tek bir tabakanın esneklik özellikleri, karışımlar kuralı temelinde, anafaz ve takviye bileşenlerinin özgün esneklik özellikleri üzerinden türetilebilir. Ne yazık ki, bu eşitliklerin hassasiyeti, makromekanik eşitliklerinde olduğu kadar iyi değildir [21,22].

Örneğin, mikrometre seviyesinde küçük çaplara sahip olsalar da fiberler içinde bir takım kusurlar bulunmaktadır. Fiberlerin çekme dayanımı da genellikle, fiber boyunca tekrarlayan fiber kusurları tarafından belirlenmektedir. Tek bir fiberi ele alacak olursak, fiberdeki kusur fiberin en zayıf noktası olduğundan, fiberin yük taşıma kapasitesini belirler. Diğer taraftan, anafaz ile desteklenmiş fiberlerde ise bir fiberin herhangi bir konumunda bulunan kusurun belirlediği yük taşıma kapasitesine yaklaşıldığında, fiberdeki yük anafaz üzerinden yakındaki komşu fiberlere aktarılır. Yük atarımının olduğu bölgede komşu fiberler üzerinde kusur bulunma zorunluluğu olmadığından, kompozit malzeme fiber kusurların tolerans gösterebilir. Dolayısıyla fiberlerin katkısı, mikromekanik hesaplamalarının öngördüğünden daha yüksek olacaktır [40].

Böylece kompozitin yük taşıma kapasitesi kusurlu olan ilk fiberin kopma dayanımı ötesine, kompozitin daha büyük bir bölgesinde çoklu fiber kopmalarına neden olarak kompozitin yük taşıma kapasitesini düşüren ve fiber kopmalarındaki dengesiz artış silsilesinin görüldüğü bir seviyeye artırılmış olur. Bu nedenle, fiber boyunca tekrar eden kusurlara sahip fiberlerin, tek başlarına gösterdikleri dayanımdan daha büyük bir mukavemeti kompozit içinde göstermeleri bile olgunun karmaşıklığını gösterir [6].

Birçok mühendislik uygulamasında esneklik özellikleri (E_1 , E_2 , ν_{12} ve G_{12}), karışımlar oranını kullanmak yerine, malzemeye yapılan testler ile belirlenir. Bu nedenle, belirli bir tasarım probleminin ihtiyaçlarına uygun anafaz ve takviye malzemesi birleşiminin seçimi genellikle tasarım eniyilemesinden önce yapılmalıdır. Dahası anafaz ve takviye malzemesine karar kılınmasında etkili faktörler sadece esneklik özellikleri değildir. Ayrıca, çevresel özelliklere tepki, hasar toleransı, maliyet ve yorulma (fatigue) gibi tasarım eniyilemesinde kapsanması daha zor olan faktörler de bulunmaktadır [40].

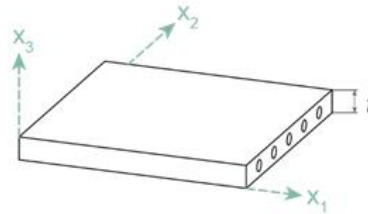
Şekil 2.33' de, bahsedilen dört mühendislik sabitinin belirlenmesi için yapılması gereken üç farklı test görülmektedir. Şekilde x_1 , kompozit tabakanın fiber yönünü belirtmektedir. Fiber yönünde çekme testi (a) E_1 değerinin, fiber yönüne dik yönde çekme testi (b) E_2 değerinin ve tabaka düzleminde uygulanan kayma gerilimi (c) G_{12} değerinin belirlenmesi için yeterlidir. ν_{12} değeri çekme testleri sırasında numune üzerine birbirine dik yerleştirilen iki gerilim ölçerin sağladığı veriler ile ortaya çıkar.



Şekil 2.21. Mühendislik sabitlerinin tespiti için uygulanan farklı gerilimler [6]

2.5.2. İleri kompozitlerin makromekaniği

Tipik bir kompozit tabaka için, tabakanın kalınlığı, t , diğer iki yöndeki uzunluk değerlerine oranla çok küçüktür. Eğer bir tabakanın kalınlığı ve düzlem-dışı yükleri, ihmal edilebilecek kadar küçük ise tabaka düzlem-içi gerilim altında varsayılır. Şekil 2.34' de görüldüğü gibi, normal vektörleri x_3 doğrultusunda olan alt ve üst yüzeylerine dışarıdan bir yükleme uygulanmadığından, σ_3 , τ_{31} ve τ_{23} gerilimlerinin de tabaka için ihmal edilebilir olduğu varsayılır.



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

Şekil 2.22. Kompozit tabakanın düzlem-içi gerilim varsayımının şematik gösterimi [6]

Kompozit tabaka için düzlem-içi gerilim varsayımı yapıldığında esneklik kuramının (theory of elasticity) gerilim-gerinim eşitlikleri, 2-boyutlu gerilim-gerinim eşitliklerine indirgenmesi mümkündür. ε_3 , γ_{31} ve γ_{23} gerinimlerinin ihmal edilmesi ile tabakanın gerilim-gerinim eşitlikleri aşağıdaki gösterilir.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [Q][\varepsilon] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

İndirgenmiş esnemezlik matrisi, $[Q]$, katsayılarının (Q_{11} , Q_{12} , Q_{22} ve Q_{66}) kompozit tabakanın bağımsız mühendislik sabitleri ile ifade edilişi aşağıdaki gibidir.

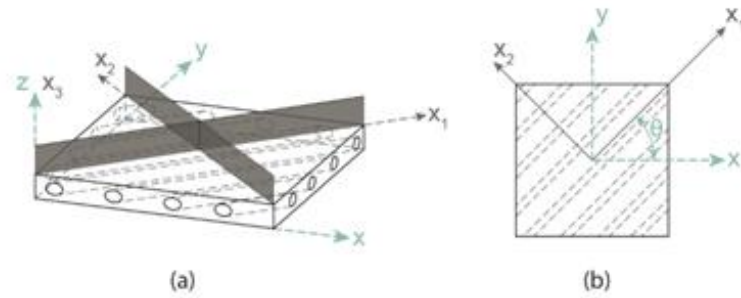
$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (2.8)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (2.9)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \quad (2.10)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (2.11)$$

Genel olarak, kompoziti oluşturan tabakaların tümü fiber doğrultuları aynı olacak şekilde istiflenmez. Bunun temel nedeni, tabakaların fiber yönünde yüksek dayanım ve esnemezlik özellikleri gösterirken, aykırı yönde bu özelliklerin düşük seviyelerde olmasıdır. Kompozit malzemenin istenilen özelliklerde tasarlanması amacı ile tabakaların yerel eksenleri, genellikle yapısal elamanın geometrisinin belirlediği genel eksenlere belirli bir açı yapacak şekilde istiflenmektedir.



Şekil 2.23. 2-boyutlu tabakanın simetri düzlemleri (a) ile yerel ve genel eksenleri (b)

Şekil 2.35' de şematik olarak gösterilen ortotropik tabaka, yerel eksenleri (x_1 ve x_2) genel eksenler (x , y ve z) ile θ açısı yapacak şekilde konumlanmıştır. Bu şekilde farklı açılar ile istiflenmiş ortotropik tabakalardan oluşan sürekli fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin son özelliklerinin ifade edilebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, öncelikle, her bir tabakanın gerilim-gerinim ilişkileri tabakalar için ortak olan x - y konaç dizgesi (x - y koordinat sistemi) üzerinden ifade edilmelidir.

θ , yerel ve genel eksenler arası açı olmak üzere;

$$s = \sin(\theta) \quad (2.12)$$

$$c = \cos(\theta) \quad (2.13)$$

Eksenler arası doğrusal dönüşüm matrisi, T ;

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Klasik tanımda mühendislik kayma gerinimi (engineering shear strain), tensörel kayma geriniminin (tensorial shear strain) iki katıdır.

Uyuşmazlığın giderilmesi ve eşitliklerde kayma geriniminin tensörel tanımı yerine mühendislik tanımının kullanımı için Reuter matrisi, R ;

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Böylece konaç dizgeleri arası gerilim ve gerinim dönüşümleri;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2 boyutlu kompozit tabaka için dönüştürülmüş indirgenmiş (transformed reduced) gerilim-gerinim ilişkileri;

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1}[Q][R][T][R]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Kısa gösterimle;

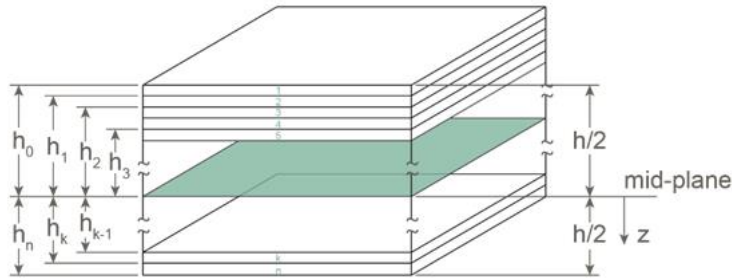
$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}][\varepsilon] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Burada \bar{Q} , dönüştürülmüş indirgenmiş esnemezlik matrisi (transformed reduced stiffness matrix) olarak adlandırılır. \bar{Q} Matrisinin elemanlarının tabakanın dört bağımsız mühendislik sabitinin ve θ açısının fonksiyonu olduğu aşikârdır.

2.5.3. Klasik lamine teorisi

İleri kompozitler, şekil 2.36' da görüldüğü gibi, kalınlıkları boyunca birbirine bağlı birçok ortotropik tabakanın üst üste lamine edilmesiyle meydana gelirler. Makromekanik bu tabakaların birbirleri ile olan ilişkilerini ve kompozit plakanın toplam özelliklerine yaptığı katkıyı konu alır. Mekanik özelliklerin makromekanik açıdan ortaya konmasında klasik lamine teorisi (classical laminate theory) genel geçer niteliktedir.

Eşyönlü malzeme özellikleri gösteren, uygulanan yük ve momentlerin prizmanın ağırlık merkezi ve simetri eksenlerinden geçtiği varsayılan, prizmatik bir kiriş için temel mukavemet varsayımları temel alınarak elde edilen eşitlikler; düzlem-içi yükleme altındaki plaklar için de türetilebilir. Eksenel gerilme, kayma gerilmesi, eğilme momenti ve burulma momenti gibi etkileri de içerecek eşitlikler sisteminin; plakanın orta-düzlemindeki gerinim (ε^0) ve eğrilikler (κ) kullanılarak geliştirilmesi için klasik lamine teorisi kullanılır.



Şekil 2.24. Kompozit tabakaların, tabakalı yapının kalınlığı yönündeki konumları

Klasik lamine teorisinde aşağıdaki varsayımlar kabullenilir [6]:

- Her lamine esnek (elastik), ortotropik ve homojendir.
- Tabakalar arası orta yüzeye dik olarak çizilen bir doğru parçası, deformasyon esnasında, yüzeye dik ve düzgün olarak kalmaya devam eder ($\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$).
- Her lamine incedir ve üzerine yalnızca düzlem-içi yükleme uygulanır (plane stress) ($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$).
- Lamine içindeki yerdeğişimler sürekli ve küçüktürler ($|u|, |v|, |w| \ll |h|$), burada h laminelerin toplam kalınlığıdır.
- Lamineler arası yüzlerde kayma (slip) gerçekleşmez.

Klasik lamine teorisine göre plaka üzerindeki gerinimler, orta-düzlemdeki gerinim (ϵ^0) ve eğrilikler (κ) cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilirler.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \epsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.21)$$

Böylece eşitlik (20), ϵ^0 ve κ değişkenleri üzerinden tekrar ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \epsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

Eğer elde edilen gerinimler, kompozit tabaka üzerindeki etki ettiği alan ile çarpılırsa, tabakaya etki eden net kuvvet ve momentler bulunur. Bu amaçla, x-y düzlemindeki birim uzunluk başına düşen gerinimler, tabakanın kalınlığı boyunca integrale alınmalıdır.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad (2.23)$$

ϵ^0 ve κ değişkenleri z ekseninden bağımsız olduğundan, (2.22) eşitliğinin her tabaka için, tabakanın kalınlığı boyunca, ayrı ayrı hesaplanıp birbirleri ile toplanması ile kompozitin genel özellikleri ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\epsilon^0\} \\ \{\kappa\} \end{Bmatrix} \quad (2.24)$$

Denklemden (2.24) görülen A , B ve D matrisleri sırası ile uzanımsal esnemezlik matrisi (extensional stiffness matrix), bağlaşım esnemezlik matrisi (coupling stiffness matrix) ve eğilme esnemezlik matrisi (bending stiffness matrix) olarak adlandırılır. Uzanımsal esnemezlik matrisi A , düzlem için kuvvetler ile gerinimleri ve eğilme esnemezlik matrisi D , eğilme momentleri ile plaka eğrilmelerini ilişkilendirir. Bağlaşım matrisi B ise, düzlem-içi gerinimler ile eğrilmeleri ve eğilme momentleri ile gerinimleri birbirine eşler. Bu eşlemelerin mümkün olmasının tek koşulu plakayı oluşturan tabakaların, plakanın orta-düzlemine göre simetrik olarak istiflenmemesidir. Çünkü denklemden (2.26) anlaşılacağı gibi, simetrik plakalarda bağlaşım matrisinin değeri sıfırdır.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}), \quad i = 1, 2, 6; \quad j = 1, 2, 6 \quad (2.25)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2), \quad i = 1, 2, 6; \quad j = 1, 2, 6, \quad (2.26)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), \quad i = 1, 2, 6; \quad j = 1, 2, 6. \quad (2.27)$$

3. MATEMATİKSEL MODEL VE OPTİMİZASYON

3.1. Ön Çalışma Numuneleri

Çalışmada matematiksel model ve optimizasyon kısmına geçilmeden, öncelikle, kardan mili tasarım problemine göre daha basit bir problem üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla tek bir işlevsel ister, basma dayanımı, ele alınmıştır. Bu işlevsel isterin nasıl sağlanabileceğini irdelemek adına, Türkiye'deki CTP boru üreticilerinin belirli bir standarda uyum sağlamak amacıyla sıklıkla kullandığı, deneme-yanılma yolu tercih edilmiştir.

Yapılan bu ön çalışmada cam, bazalt ve karbon fiberler ile ayrı ayrı ve melez olarak takviye edilmiş silindirik şeklindeki ileri kompozit yapılar elyaf sarma yöntemi ile üretilmiştir. Sonrasında, bu kompozit parçalardan ASTM D 2412 standardına göre numuneler elde edilmiş ve testleri yapılmıştır. Yapılan bu ön çalışmanın amacı, matematiksel model ve optimizasyon ve deneme-yanılma süreçleri arasındaki başarımların farklarının ortaya konulması olarak özetlenebilir.

3.1.1. Ön çalışma numunelerinin üretimi

Cam, bazalt ve karbon elyaflarının özelliklerinin basma dayanımı performansına olan etkilerinin gözlenmesi amacıyla üretilen ön çalışma numunelerinin üretiminde aşağıdaki şekilde (Şekil 3.1) görülen elyaf sarma cihazı kullanılmıştır. Elyafların, kullanılan silindirik mandreller üzerinde istenilen açılarda biriktirilebilmesi için 2 eksenli elyaf sarma cihazının dairesel ve düzlemsel hareket yapan eksenlerinin hızları birbirine oranlanmalıdır.



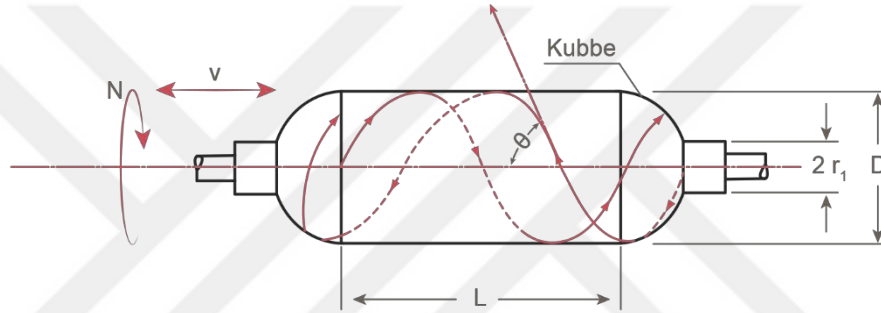
Görsel 3.1. Numune üretiminde kullanılan elyaf sarma cihazı

Eksen hızlarının birbirine bir birbirine oranlanabilmesi için, dairesel hareket eden eksenin açısal hızı veya belirli bir zamandaki devir sayısı yerine mandrel yüzeyinin doğrusal hızı kullanılmalıdır. Dönme hareketi yapan silindirik mandrel yüzeyinin doğrusal hızı, mandrelin açısal hızı ve mandrelin çapı ile orantılıdır.

Doğrusal hareketli eksendeki hız v , mandrel çapı D_m ve dairesel hız N olacak şekilde; elde edilmek istenilen açının tanjant değeri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tan \theta = \frac{v}{\pi D_m N} \cdot \quad (3.1)$$

Şekil 3.2' de yatayda doğrusal ve dairesel hareket yapan eksenler ile sarım açısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sarım açısının belirleyen parametrelerin şematik gösterimi [21]

Elyafın üzerine sarılacağı mandreller, 32 mm dış çapa sahip çelik boruların istenilen uzunluklarda kesilmesi ile elde edilmişlerdir. Aşağıdaki Şekil 3.3' de mandrel olarak kullanılan çelik boru ve bu borunun elyaf sarma cihazına sabitlenmesi görülmektedir. Elyaf sarma işleminden sonra numunelerin mandrelden kolayca ayrılması için mandreller üzerine kalıp ayırıcı uygulanmaktadır.



Görsel 3.2. Mandrel olarak kullanılan borunun elyaf sarma cihazına sabitlenmesi

Ön çalışmada anafaz olarak kullanılan epoksi reçine 2 bileşenli bir reçine sistemidir. Bileşenleri üretici firma tarafından verilen ağırlık oranında homojen olarak karıştırmak için aşağıdaki Şekil 3.4' de görülen karıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırma işlemi 5 dakika süresince 1000 dev/dk. hızda gerçekleştirilmiştir.



Görsel 3.3. 2 bileşenli reçinenin karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı

Karıştırılan reçine elyaf sarma cihazının reçine haznesine boşaltılmaktadır. Elyaf, öncelikle ön gerilme düzeneğinden ardından reçine banyosundan geçirilmektedirler. Böylece elyafların sarım öncesi belirli bir gerginliğe sahip olmaları ve reçine ile ıslatılmaları sağlanmaktadır.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.5), elyafların reçine ile dolu reçine havuzundan geçişi görülmektedir.



Görsel 3.4. *Elyafın reçine havuzunda ıslatılması*

Takviye olarak seçilen elyaflar, reçine havuzunda ıslatma işleminin ardından mandrele ulaşırlar ve istenilen açılarda mandreli kaplamaya başlarlar. Süreç esnasında takviye olarak kullanılan elyafların çeşidinin değiştirilmesi veya elyaf sarma cihazının eksen hızlarının ayarlanması ile her kat için sarım açısı ve destek malzeme tipinin bağımsız olarak ayarlanabilmesini sağlamaktadır.

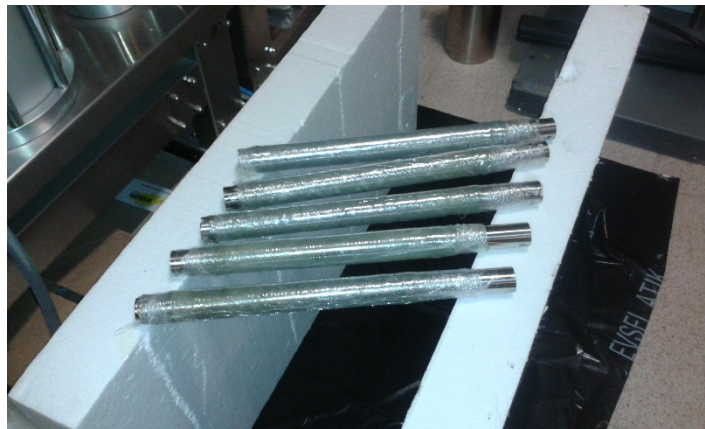
Şekil 3.6' da cam elyaf tabakanın üzerine karbon elyafların sarılması görülmektedir.



Görsel 3.5. Cam ve karbon elyaflardan oluşan melez kompozit silinir üretimi

Sarma işleminin tamamlanmasının ardından, mandrele beslenen elyaf kesilir ve silindirin tamamı üzerine şeffaf bir film sarılır. Bu filmin sarılmasındaki amaç, halen akışkan halde bulunan reçine üzerine dışarıdan baskı uygulayarak reçine fazlasının sistemden uzaklaştırılmasıdır. Film sarımının belirli bir ön gerilme altında yapılması gerekmektedir. Ancak kullanılan elyaf sarma cihazının filmin gerilimini ayarlayacak ön gerilme donanımı bulunmadığından bu işlem el yordamı ile yapılmıştır.

Sarım işleminin tamamlanmasının ardından numuneler üzerlerindeki film ile birlikte 12 saat boyunca oda sıcaklığında bırakılmışlardır. Bu süre içinde numuneler kürlenmişlerdir. Şekil 3.7' de $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ sabit açı değerlerine sahip cam elyaf destekli numunelerin oda sıcaklığında kürlenme aşamaları görülmektedir.



Görsel 3.6. Cam elyaf takviyeli numunelerin oda sıcaklığında kürlenmeleri

12 saat oda sıcaklığında kürlenmenin ardından numuneler, aşamalı olarak önce 2 saat 60 °C' de sonra 2 saat 80 °C' de etüvde bekletilmiş ve kürlenmelerini tamamlamaları sağlanmıştır.

Aşağıda (Şekil 3.8) 60 °C sıcaklıkta post-kürlenmesi gerçekleştirilen cam elyaf takviyeli numune görülmektedir.



Görsel 3.7. 60 °C sıcaklıkta post-kürlenmiş cam elyaf takviyeli numune

Belirtilen koşullarda kürlenme işleminin tamamlanmasından sonra numunelerin üzerindeki şeffaf filmler alınmış ve numuneler etiketlenmişlerdir. Şekil 3.9' da tartımları yapıldıktan sonra üretildikleri malzemelere göre etiketlenmiş numuneler görülmektedir.



Görsel 3.8. Farklı elyaflar ile takviyelenmiş numuneler

3.1.2. Ön çalışma test numunelerinin hazırlanması

Silindir şeklinde üretilen numunelerin esnemezlik karşılaştırmalarının yapılması amacı ile ASTM D 2412 standart test yöntemi kullanılmaktadır. Boru şeklinde ki yapıların esnemezlik özellikleri, test edilen borunun geometrik ölçüleri ile borunun imalatında kullanılan malzemenin özelliklerinin bir fonksiyonudur [42]. Üretilen numunelerden hazırlanan test numuneleri bahsedilen standarda uygun şekilde hazırlanmıştır.

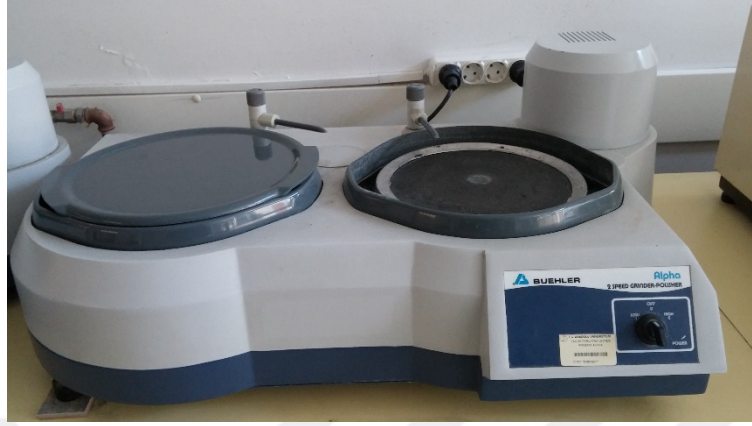
Üretilen kompozit silindirler Şekil 3.10' da görülen sulu kesme cihazında boyları nominal çaplarının 3 katının üstünde olacak şekilde kesilmişlerdir.



Görsel 3.9. Numune hazırlamada kullanılan sulu kesme cihazı

Kesim işlemi sonrasında silindir numunelerin iki ucu, 120, 400 ve 600 tane numaralı zımpara kâğıtları ile zımparalanmıştır. Bu işlemin iki amacı bulunmaktadır: numunelerin kesimi sırasında silindir uçlarında kalan çapakların giderilmesiyle bu yüzeylerin pürüzlerinin alınması ve silindir boylarının nominal çapın 3 katı olacak şekilde hassas olarak ayarlanması.

Aşağıda (Şekil 3.11) numunelerin zımparalanmasında kullanılan cihaz görülmektedir.



Görsel 3.10. Numune boyutlarının ayarlanmasında kullanılan zımpara cihazı

Üretim sürecinde numuneler 2 ayrı grup halinde üretilmişlerdir. Birinci grupta sadece cam elyaf takviyesi kullanılmış ve sarım açıları $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ olacak şekilde ayarlanmıştır. Her açı değeri için ikişer adet sadece cam elyaf destekli kompozit silindir üretilmiştir.

Birinci gurubun testlerinin tamamlanmasının ardından elde edilen veriler ışığında ikinci grup numuneler üretilmiştir. Bu grupta $\pm 65^\circ$ sabit sarım açısı kullanılmış ve ilk üç numunede tek tip elyaf kullanılmış sonraki üç numunede ise takviye olarak kullanılan elyafların bir arada kullanımları ile melez kompozit silindirler üretilmiştir. Şekil 3.12' de farklı malzemelerden üretilmiş numunelerin ASTM D 2412 testine hazır son halleri görülmektedir.



Görsel 3.11. ASTM D 2412 standardına uygun hazırlanmış numuneler

Kullanılan mandrellerin toplam uzunluğu ve iç çapları göz önüne alındığında, ASTM D 2412 standardına göre, üretilen her silindirden 3 adet numune üretilmektedir. Standarda göre belirli bir numune için 3 ayrı test yapılması yeterlidir. Böylece her iki grup için toplam 36 adet numune üretilmiştir.

Aşağıdaki tablolarda (Tablo 3.1-3.2) birinci ve ikinci grup numunelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Birinci grup numunelerin bilgileri

Numune kodu	Kullanılan takviye malzemesi	Üretilen silindir sayısı	Silindirlere çıkarılan numune sayısı	Sarım açısı	Kat sayısı
T: 1	E-Cam	2	6	[±45° ₃]	3
T: 2	E-Cam	2	6	[±55° ₃]	3
T: 3	E-Cam	2	6	[±65° ₃]	3

Tablo 3.2. İkinci grup numunelerin bilgileri

Numune kodu	Kullanılan takviye malzemesi	Üretilen silindir sayısı	Silindirlere çıkarılan numune sayısı	Sarım açısı	Kat sayısı
G	E-Cam	1	3	[±65° ₃]	3
B	Bazalt	1	3	[±65° ₃]	3
C	Karbon	1	3	[±65° ₃]	3
GB	E-Cam + Bazalt	1	3	[±65° ₃]	3
GC	E-Cam + Karbon	1	3	[±65° ₃]	3
GBC	E-Cam + Bazalt + Karbon	1	3	[±65° ₃]	1+1+1

Birinci grup ve ikinci grup numunelerin testleri farklı test cihazlarında yapılmıştır. Bu nedenle T:3 ve G kodlu numuneler, test sonuçlarının karşılaştırılarak kontrol edilmesi adına aynı şekilde üretilmişlerdir.

3.1.3. Ön testler

Birinci grup numunelerin testleri Anadolu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuvarında Instron markalı 8501 model numaralı cihaz ile gerçekleştirilmiştir. İkinci grup numunelerin testlerinde, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Instron 5581 cihazı kullanılmıştır.

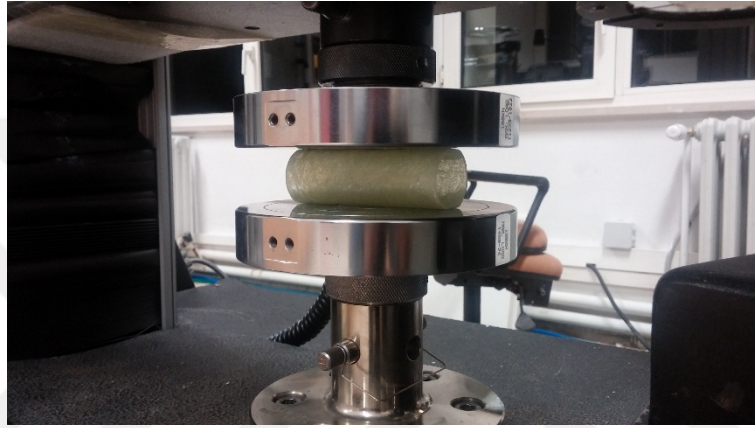
Aşağıda ikinci grup numunelerin testlerinde kullanılan Instron 5581 cihazı görülmektedir.



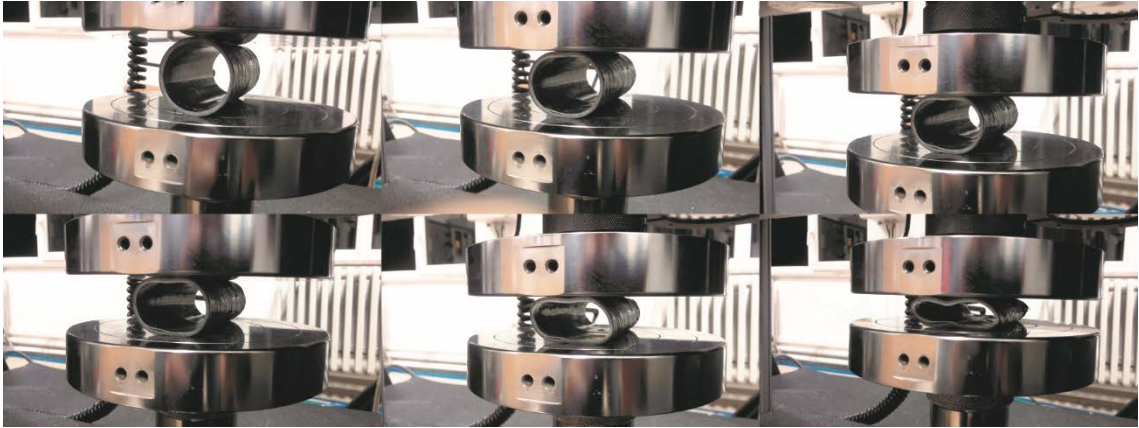
Görsel 3.12. Testlerde kullanılan Instron 5581 cihazı

Instron 8501 cihazında 100 kN azami yükleme değere sahip yük hücresi ve Instron 5581 cihazında 50 kN azami yükleme değerine sahip yük hücresi kullanılmıştır. Testlere başlamadan önce yük hücrelerinin elektronik kalibrasyonları yapılmıştır. Testler sırasında her iki cihaz da saniyede 10 adet veri toplayacak şekilde ayarlanmıştır. Testlerde kullanılan plakaların azami basma değerleri üretici firma tarafından 100 kN olarak belirtilmiştir.

Aşağıdaki şekilde basma plakaları görülmektedir. Standartta belirtildiği gibi, test esnasında, basma plakalarının birbirlerine yaklaşma hızı 12,5 mm/dk. olacak şekilde ayarlanmıştır. Numuneler basma plakalarının birbirine paralel yüzeyleri arasına plakaları ortalayacak şekilde (Şekil 3.14) yerleştirilmiştir. Her numunenin testinden önce plakaların darası alınmıştır. Sonrasında üstteki plaka numuneye hassas bir şekilde yaklaştırılarak maksimum 25 N değerine kadar bir ön yükleme uygulanmış ve bu noktada konum ve yükleme değerleri sıfırlanarak teste başlanmıştır. Testler Şekil 3.15' de görüldüğü gibi numunelerin kırılma noktasına kadar devam etmiştir.



Görsel 3.13. Azami 100 kN basma değerine sahip basma plakaları



Görsel 3.14. GBC (cam bazalt karbon) kodlu numunenin basılması

Test sırasında zaman, yer değiştirme ve yükleme verileri eş zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Aynı numune koduna sahip numuneler için yüke karşılık numune çapına oranla deformasyon grafikleri çizdirilmiştir. Bu grafikler aralarında karşılaştırma yapılabilmesi adına bir arada gösterilmiştir.

3.1.4. Ön çalışma test sonuçları

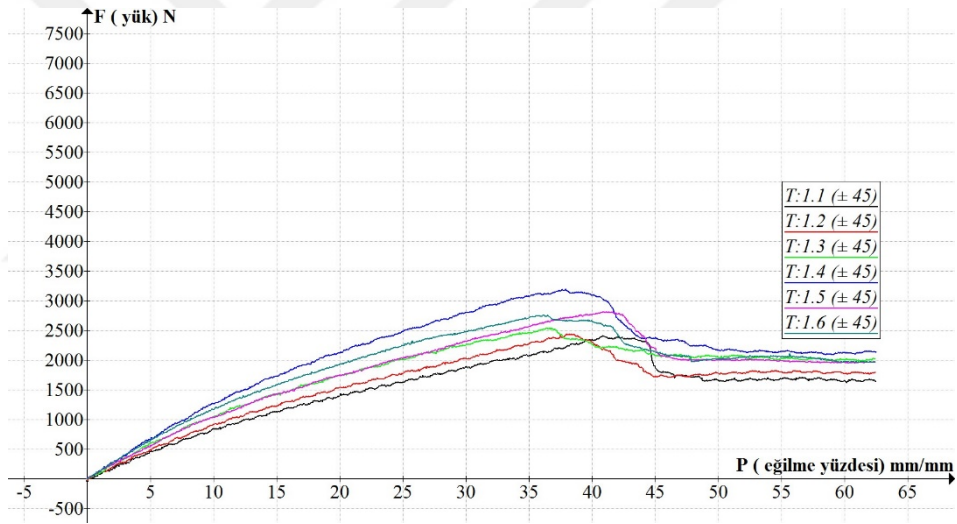
3.1.4.1. Birinci grup numune sonuçları

3.1.4.1.1. $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip numuneler

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.16) T:1 numune koduna sahip numunelerin test sonuç grafikleri verilmiştir. Grafikte x eksenini, P (eğilme yüzdesi) değerlerini; y eksenini, F (yük) değerlerini yansıtmaktadır. P değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

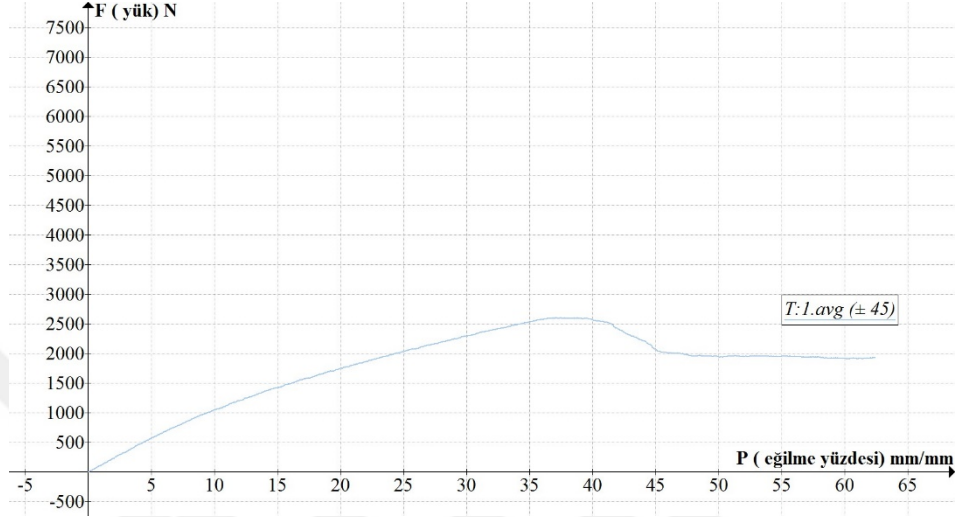
$$P = \left(\frac{\Delta y}{d} \right) 100 . \quad (3.2)$$

Burada Δy (mm) değeri, basma yönünde silindirin iç çapında oluşan deformasyon ve d (mm) değeri, silindirin iç çapını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. T:1 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

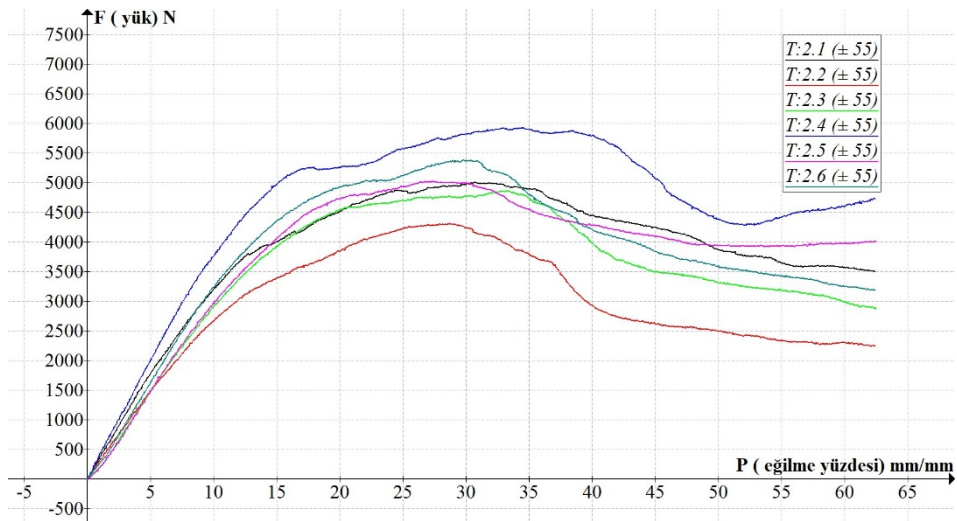
Şekil 3.17, T:1 numunelerinden elde edilen ortalama değerlerin grafiğidir. Şekil 3.17' de görülen T:1.avg eğrisinin verilerinden, bu numunelerin kırılmadan önce iç çap değerlerinin ortalama %37'si kadar esnediği anlaşılmaktadır. Bu esneme miktarına yol açan yük değeri 2602.6 N olarak okunmuştur.



Şekil 3.3. T:1 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

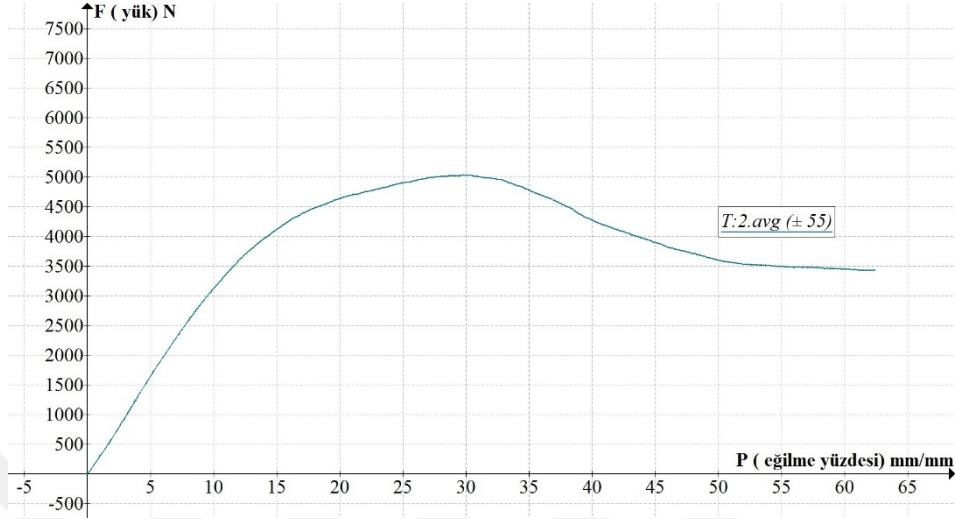
3.1.4.1.2. $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip numuneler

Şekil 3.18' de $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf destekli numunelerin test sonuçları görünmektedir. T:2 olarak kodlanmış bu numunelerin kırılmadan önceki dayanımlarının, $\pm 45^\circ$ sarım açısına sahip numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. T:2 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.19) T:2 numunelerinin verilerinden elde edilen değerlerin ortalamaları ile oluşturulmuş T:2.avg eğrisi görülmektedir.

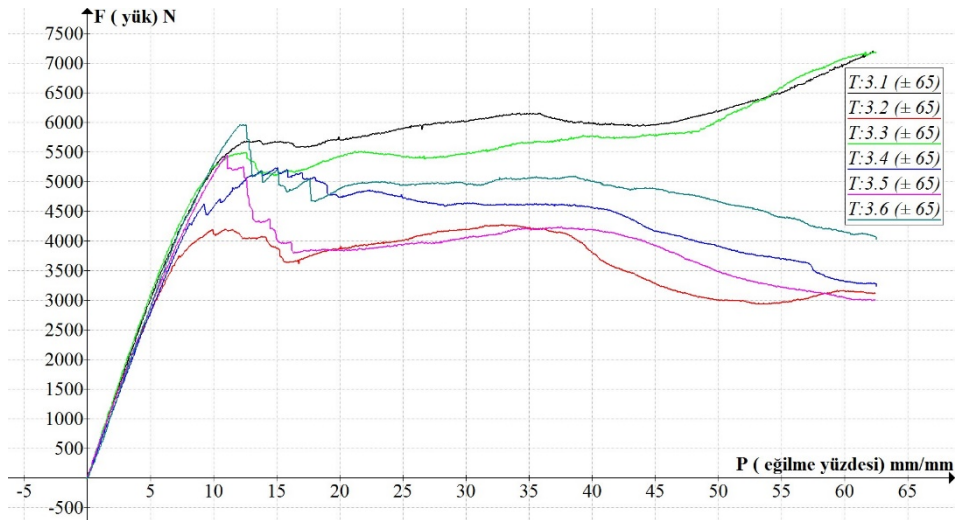


Şekil 3.5. T:2 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

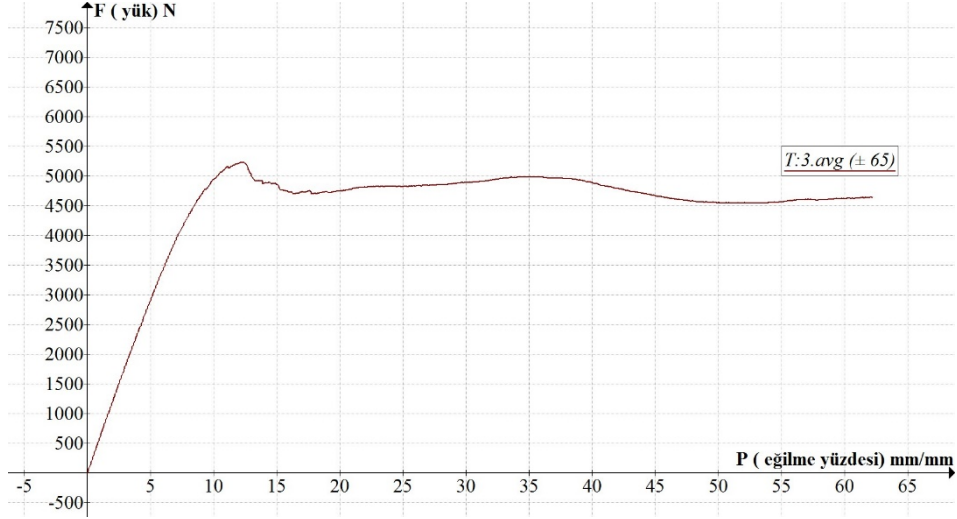
T:2.avg eğrisinin elde edildiği değerlere göre $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf destekli numuneler kırılmadan önce iç çaplarının %30'u kadar esnemektedirler. Bu esnemeye yol açan yük miktarı 5033.8 N olarak okunmaktadır.

3.1.4.1.3. $\pm 65^\circ$ sarım açısına sahip numuneler

Şekil 3.20' de T:3 numunelerinin test sonuçları görülmektedir. Bu numuneler $\pm 65^\circ$ sarım açısına sahip cam elyaf takviyeli numunelerdir. Önceki numunelerde olduğu gibi bu numunelerde toplamda 3 kat olacak şekilde üretilmişlerdir.



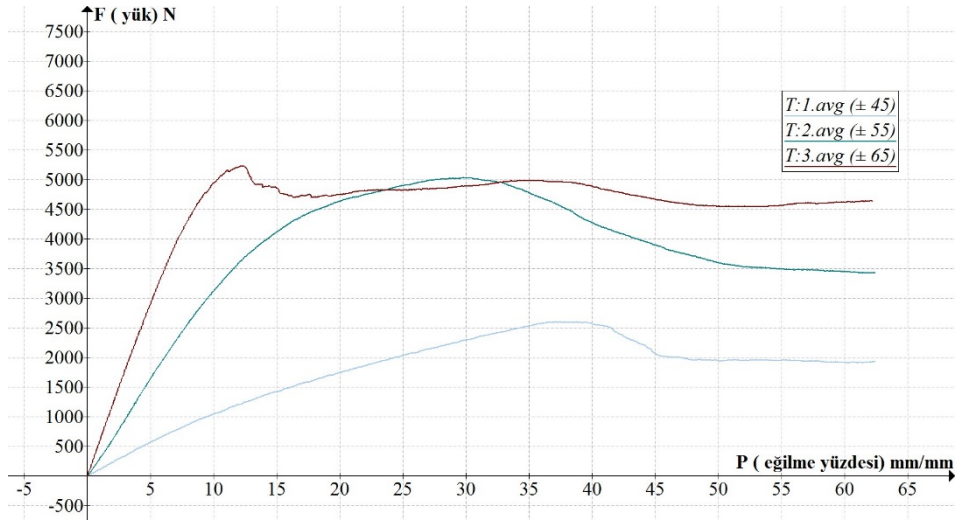
Şekil 3.6. T:3 numunelerinin yük-eğilme yüzdesi grafikleri



Şekil 3.7. T:3 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

T:3 numunelerinin testlerinden elde edilen verilerin ortalama değerlerinin kullanımı ile oluşturulan T:3.avg grafiği yukarıda, Şekil 3.21' de gösterilmiştir. Bu numunelerin 5239,2 N yük altında iç çapın %12'si kadar esnediği görülmektedir.

3.1.4.1.4. $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ sarım açılı cam elyaf destekli numunelerin karşılaştırılması



Şekil 3.8. T:1, T:2 ve T:3 numunelerinin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Yukarıdaki şekilde (Şekil 3.22) farklı sarım açılarında üretilmiş tüm numune gruplarının ortalama değer grafikleri bir arada verilmiştir.

Sarım açısı değeri arttıkça yanal basmaya olan dayanım artmaktadır. Bunun nedeni, açının artması ile birlikte yükün destek malzemesi tarafından daha yüksek oranda karşılanması olarak açıklanabilir. Grafikte koyu kırmızı olarak gösterilen T:3.avg eğrisi, $\pm 65^\circ$ sarım açısına sahip numunelerin test verilerinin ortalama değerleri ile elde edilmiştir. Kırılmadan önceki en yüksek dayanım bu egride görülmektedir. Fakat yanal basmaya olan dayanım arttıkça bu yöndeki eğilme yüzdesi azalmaktadır. Bu durum grafiklerin eğim değeri ile açıklanmaktadır. Kırılmadan önceki azami yüke kadar grafiklerin doğrusal olduğu varsayılırsa silindirin esnemezliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$PS = \frac{F}{\Delta y} \quad (3.3)$$

F_{max} (N), yanal basma dayanımı; Δy_{max} (mm), yanal basma dayanımına karşılık gelen yükleme değerindeki esneme miktarı; P_{max} (mm/mm), bu esneme değeri için hesaplanan eğilme yüzdesi ve PS_{max} (N/mm), bu değerler için hesaplanan esnemezlik değeri olacak şekilde aşağıdaki tabloda T:1.avg, T:2.avg ve T:3.avg eğrilerinin özellikleri verilmiştir.

Burada F (N), yanal yükü ve PS (N/mm), boru rijitliğini (pipe stiffness) ifade etmektedir.

Tablo 3.3. Birinci grup numunelerin özelliklerinin karşılaştırılması

Veri ortalaması	Fmax (N)	Δy_{max} (mm)	Pmax (mm/mm)	PSmax (N/mm)
T:1.avg	2602.6	11.866	37.080	219.339
T:2.avg	5033.8	9.532	29.787	528.097
T:3.avg	5239.2	3.976	12.425	1317.701

Tablodaki verilere göre sarım açısı arttıkça silindirin rijitliğinin ve yanal basma dayanımının arttığı bununla birlikte kırılmadan önceki esneme miktarının azaldığı söylenebilir. Buradan elde edilen sonuçlardan bir sonraki deney grubunun, en yüksek basma dayanımı ve rijitlik değerlerini veren $\pm 65^\circ$ sarım açısı ile üretilmesine karar verilmiştir. İkinci deney grubunda kullanılan malzemeler ve kullanım sıraları değiştirilmiştir.

3.1.4.2. İkinci grup numune sonuçları

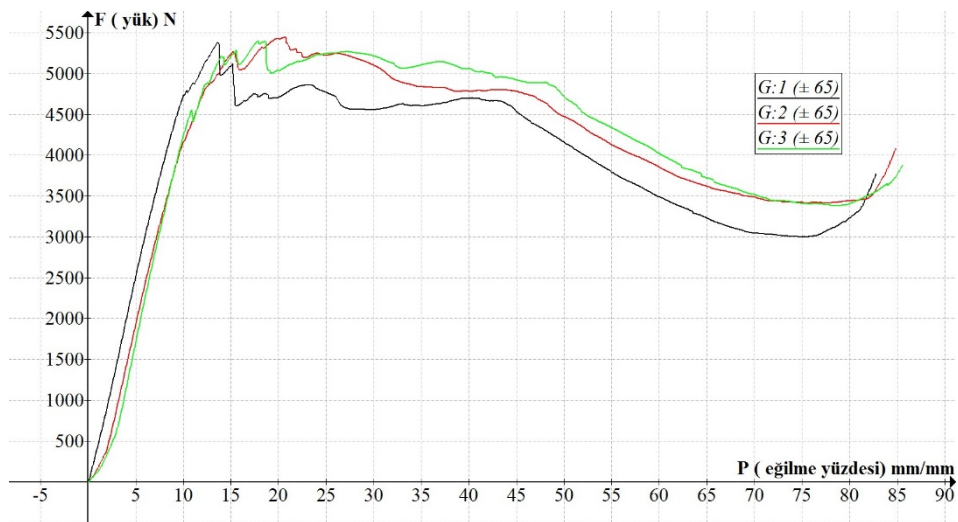
Üretim ve numune hazırlanma süreci yukarıda aktarıldığı gibi olan ikinci deney grubundaki silindirler de toplam 3 kat olacak şekilde $\pm 65^\circ$ sarım açısı ile üretilmişlerdir. Yanal basma dayanımına malzeme seçiminin etkisini belirlemek için bu numuneler farklı destek malzemeleri ile üretilmişlerdir. Toplamda 6 farklı kompozit boru üretilmiştir.

İlk üretilen kompozit silindir sadece cam elyafından üretilmiştir. Bu kompozit silindirin üretim parametreleri bir önceki test grubunda bulunan T:3 kompozit silindirleri ile aynıdır. Burada hedeflenen, farklı çekme/basma cihazlarında yapılan testlerin tutarlılığını sınamaktır. Bu kompozit silindirden hazırlanan numuneler "G" olarak kodlanmıştır.

Sonrasında aynı üretim parametreleri kullanılarak sadece bazalt elyaf destekli "B" numuneleri ve sadece karbon elyaf destekli "C" numuneleri üretilmiştir. Son olarak, farklı elyafların birlikte kullanıldığı melez yapıların davranışlarını gözlemek adına, içten dışa, cam-bazalt (GB), cam-karbon (GC) ve cam-bazalt-karbon (GBC) numuneleri üretilmiştir.

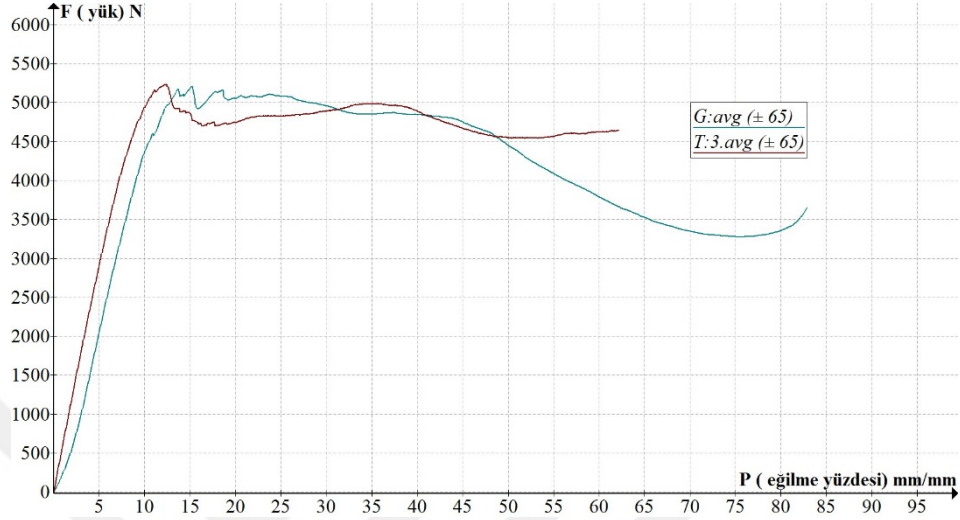
3.1.4.2.1. Karşılaştırma amaçlı üretilen $\pm 65^\circ$ cam elyaf destekli numune sonuçları

Aşağıda Şekil 3.23' de Instron 5581 cihazı ile testleri yapılan G kodlu numunelerin sonuçları görülmektedir. Sonuçların birinci grup numune sonuçları ile tutarlılık göstermektedir.



Şekil 3.9. G kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Şekil 3.24' de ise bu numunelerden elde edilen verilerin ortalama değerleri ile birinci gruptaki $\pm 65^\circ$ sarım açısına sahip T:3 numunelerinden elde edilen verilerin ortalama değerleri karşılaştırılmıştır.

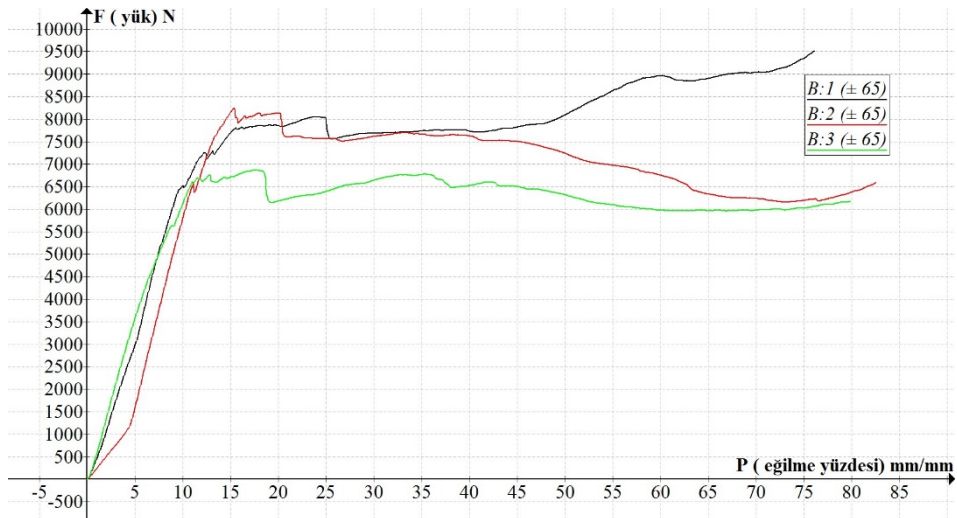


Şekil 3.10. G ve T:3 numunelerinin karşılaştırma grafikleri

G kodlu numunelerin 5179.0 N yük altında iç çapın % 14'ü kadar esnediği belirlenmiştir.

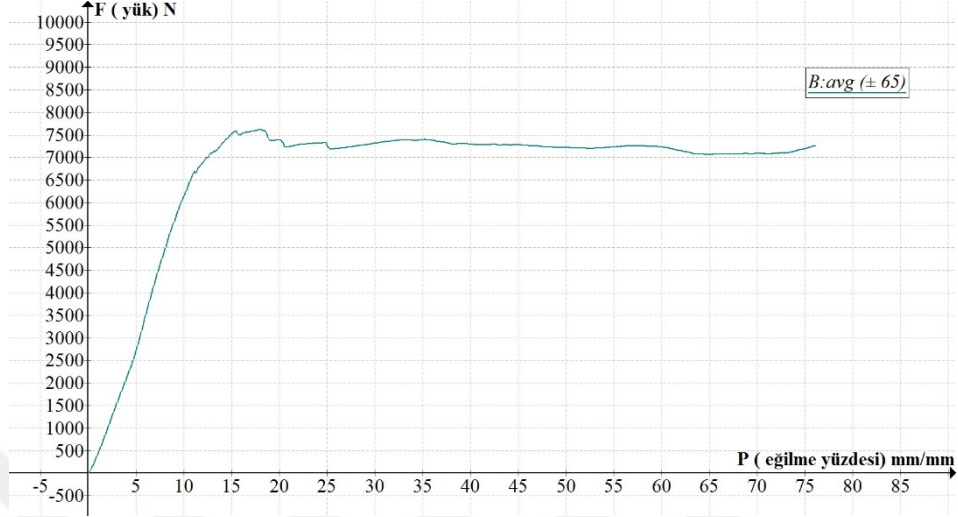
3.1.4.2.2. $\pm 65^\circ$ bazalt elyaf destekli numunelerinin sonuçları

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.25) bazalt fiberler ile desteklenmiş numunelerin test sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.11. B kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Şekil 3.26' da B kodlu numunelerin yük-eğilme verilerinin ortalaması görülmektedir.

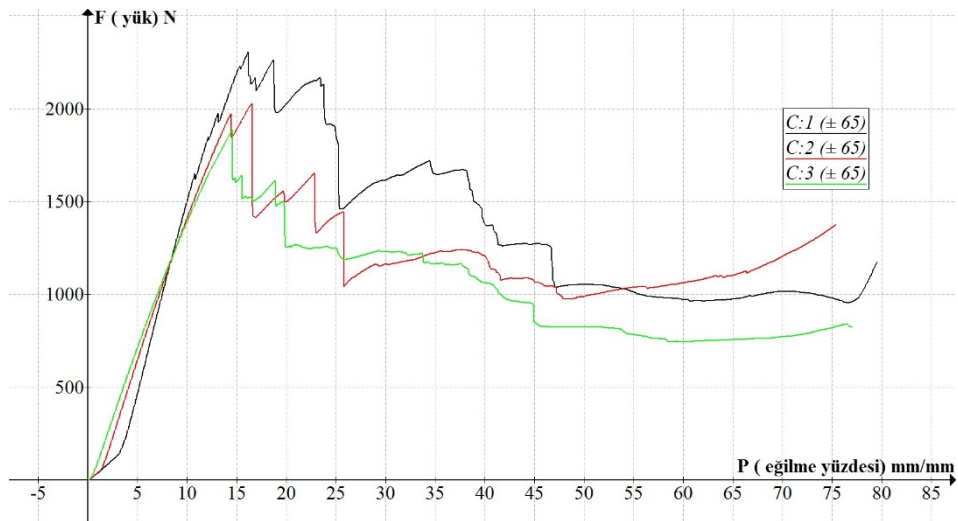


Şekil 3.12. B kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

Bazalt numuneler 7582.8 N yük altında iç çaplarının % 15'i kadar esnemektedirler.

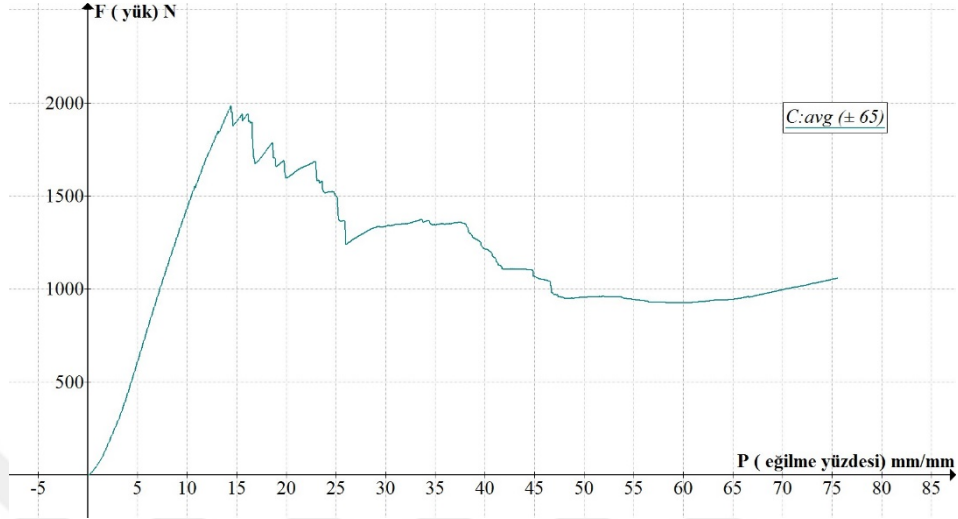
3.1.4.2.3. $\pm 65^\circ$ karbon elyaf destekli numunelerinin sonuçları

Aşağıda Şekil 3.27' de karbon fiberler ile desteklenmiş numunelerin test sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.13. C kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Aşağıdaki ikinci şekilde (Şekil 3.28) ise bu numunelerin test sonuçlarından elde edilen verilerin ortalama değerleri ile oluşturulmuş grafik görülmektedir.

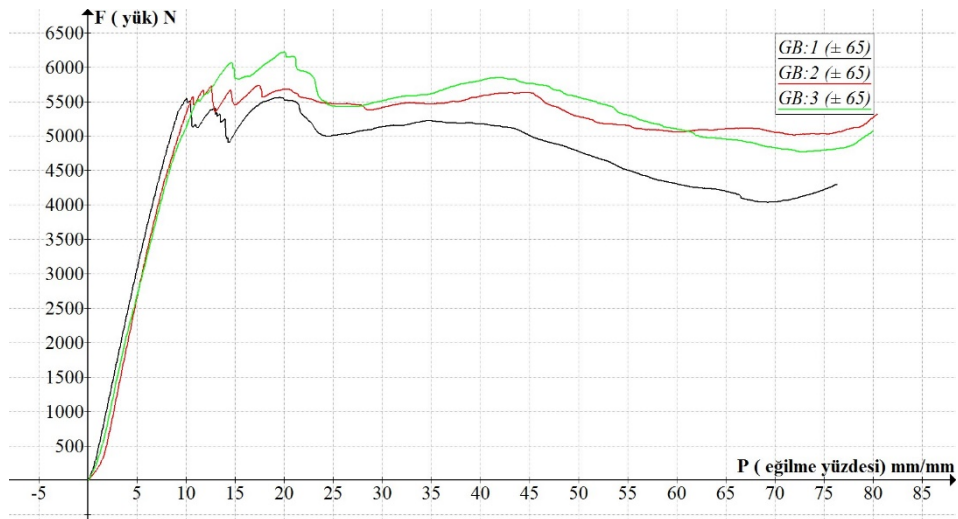


Şekil 3.14. C kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

Karbon takviyeli numuneler 1985.5 N yük altında iç çaplarının % 14'ü kadar esnemektedirler.

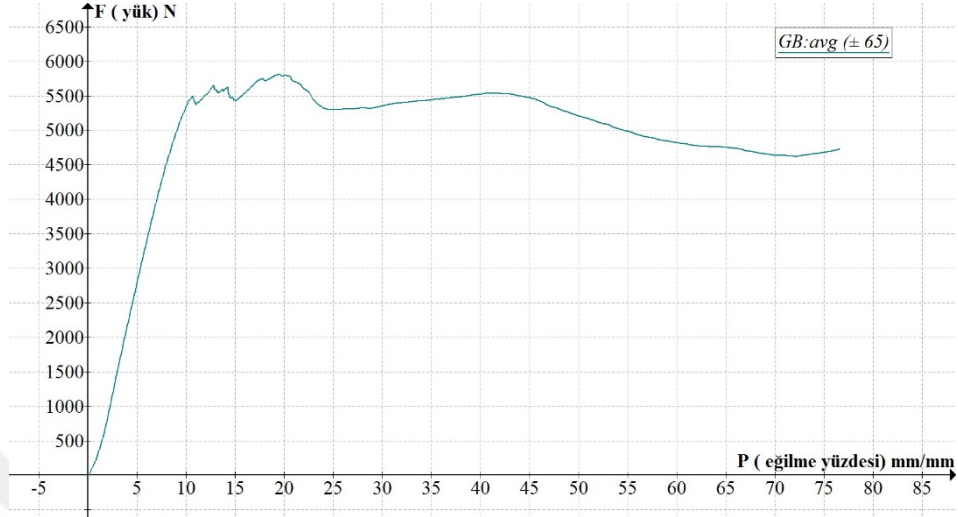
3.1.4.2.4. $\pm 65^\circ$ cam-bazalt elyaf destekli numunelerinin sonuçları

Aşağıda Şekil 3.29' da iç kısımda cam, dış kısımda bazalt fiberler ile desteklenmiş melez yapıdaki kompozit silindir numunelerin test sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.15. GB kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

Bu numunelerden elde edilen verilerin ortalama değerleri ile oluşturulmuş yanal basma y¼k¼-eğilme y¼zdesi grafiği Şekil 3.30' da g¼r¼lmektedir.

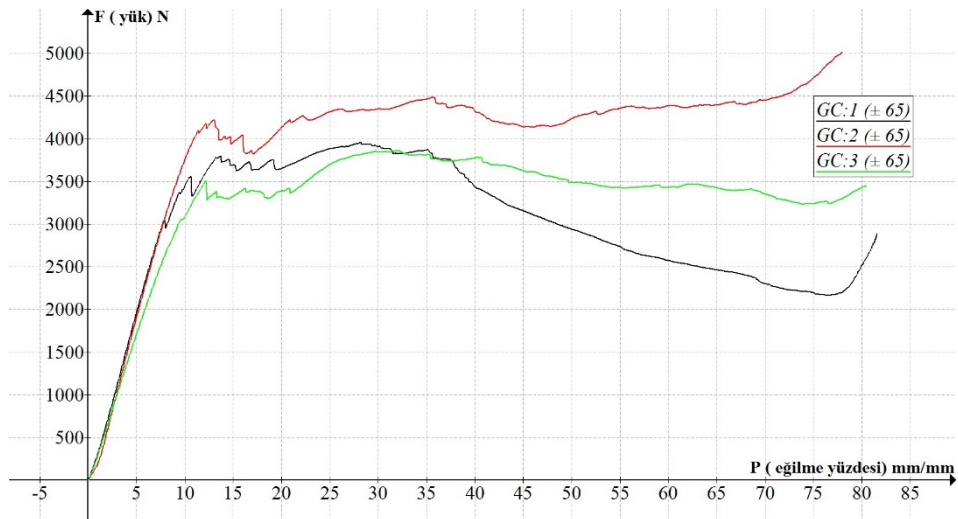


Şekil 3.16. GB kodlu numunelerin ortalama y¼k-eğilme y¼zdesi grafiği

Cam ve bazalt elyaflarından ¼retilen numuneler 5587.2 N y¼k altında iç çaplarının % 14'¼ kadar esnemektedirler.

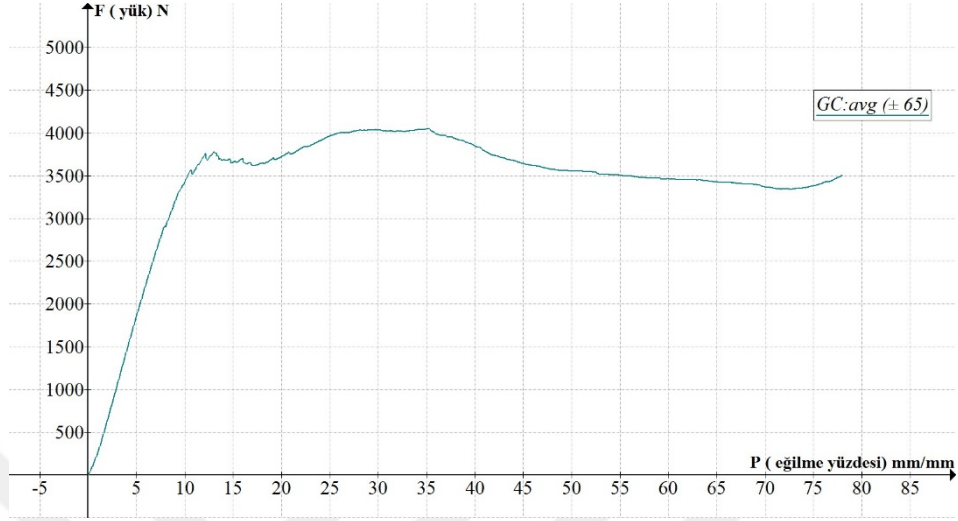
3.1.4.2.5. $\pm 65^\circ$ cam-karbon elyafl destekli numunelerinin sonuçları

Aşağıda Şekil 3.31' de iç kısımda cam, dış kısımda karbon fiberler ile desteklenmiş melez yapıdaki kompozit silindir numunelerin test sonuçları g¼r¼lmektedir.



Şekil 3.17. GC kodlu numunelerin y¼k-eğilme y¼zdesi grafiğleri

Bu numunelerden elde edilen verilerin ortalama değerleri ile oluşturulmuş yanal basma yükü-eğilme yüzdesi grafiği Şekil 3.32' de görülmektedir.

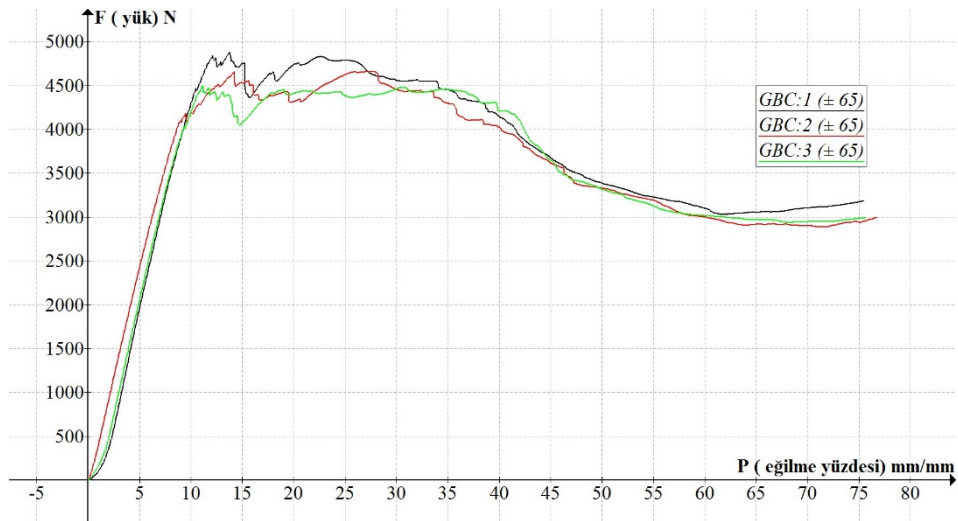


Şekil 3.18. GC kodlu numunelerin ortalama yük-eğilme yüzdesi grafiği

Cam ve karbon elyaflarından üretilen numuneler 3768.5 N yük altında i çaplarının % 13' kadar esnemektedirler.

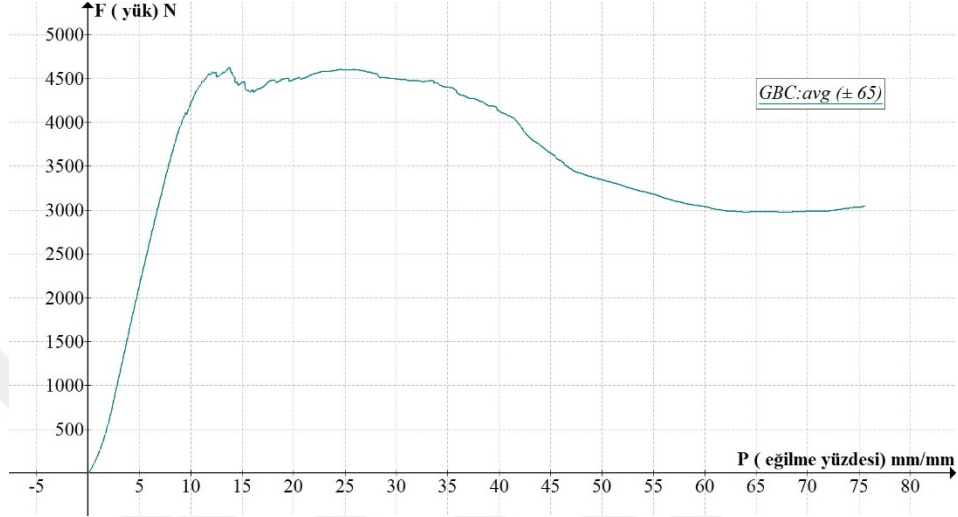
3.1.4.2.6. $\pm 65^\circ$ cam-bazalt-karbon elyaf destekli numunelerinin sonuçları

Aşağıda Şekil 3.33' de iç kısımda cam, dış kısımda karbon fiberler ile desteklenmiş melez yapıdaki kompozit silindir numunelerin test sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.19. GBC kodlu numunelerin yük-eğilme yüzdesi grafikleri

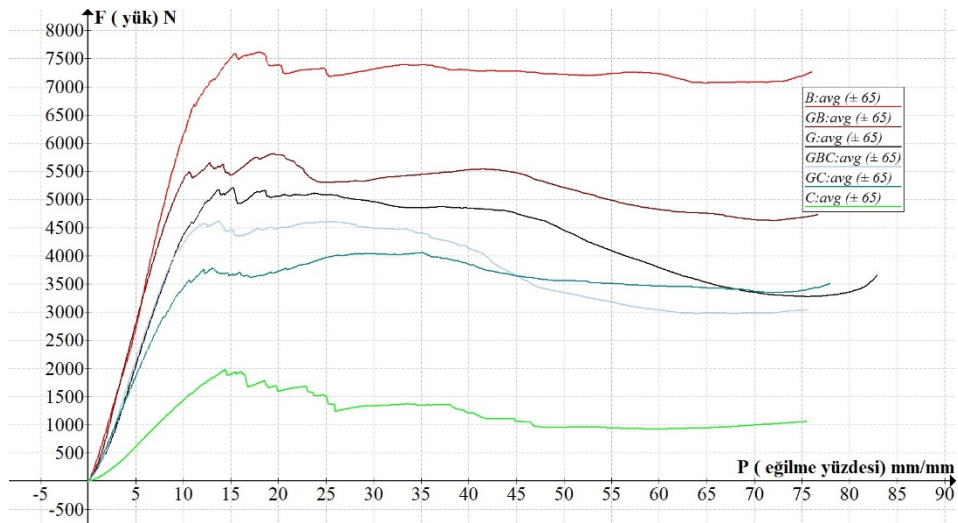
Bu numunelerden elde edilen verilerin ortalama değerleri ile oluşturulmuş yanal basma y¼k¼-eğilme y¼zdesi grafiği Şekil 3.34' de g¼r¼lmektedir. En alt katta cam, orta katta bazalt ve en ¼st katta karbon elyaflar ile desteklenen numunelerin 4624.4 N y¼k altında i¼ ¼aplarının %14'¼ kadar esnediği g¼r¼lm¼řt¼r.



Şekil 3.20. GBC kodlu numunelerin ortalama y¼k-eğilme y¼zdesi grafiği

3.1.4.2.7. Cam, bazalt ve karbon takviyeli numunelerin karşılaştırılması

Şekil 3.35' de G, B, C, GB, GC ve GBC kodlu numunelerin bir arda g¼r¼ld¼ę¼ karşılaştırma grafiği verilmiştir.



Şekil 3.21. T¼m numuneler i¼in ortalama y¼k-eğilme y¼zdesi grafikleri

Tablo 3.4' de numunelerin, yanal basma dayanımı, esneme miktarı, esneme yüzdesi ve esnemezlik değerleri görülmektedir.

Tablo 3.4. İkinci grup numunelerin özelliklerinin karşılaştırılması

Veri ortalaması	Fmax (N)	Δy_{max} (mm)	Pmax (mm/mm)	PSmax (N/mm)
G.avg	5179.0	4.396	13.736	1178.199
B.avg	7582.8	4.933	15.416	1537.148
C.avg	1985.5	4.604	14.388	431.239
GB.avg	5587.2	4.447	13.897	1256.350
GC.avg	3768.5	4.243	13.260	888.102
GBC.avg	4624.4	4.417	13.803	1046.988

3.1.4.3. Ön test değerlendirmeleri

Elyafların sarım eksenine göre açılarının artması ile yanal basmaya karşı dayanımın arttığı görülmektedir. Sarım açıları $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 65^\circ$ olarak ayarlanan cam elyaf destekli numunelerden en yüksek yanal basma dayanımını $\pm 65^\circ$ sarımlı numuneler göstermiştir. Bu sonuçlara göre, sarım açısı $\pm 65^\circ$ olarak sabit tutulan bazalt, karbon, cam-bazalt, cam-karbon ve cam-bazalt-karbon numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerin ASTM D 2412 standardına göre yapılan testleri sonucu en yüksek yanal basma dayanımı ve boru rijitliği değerini bazalt elyaf destekli numunelerin verdiği görülmüştür. En düşük yanal basma dayanımı ve boru rijitliği değerlerini karbon elyafı numuneler sergilemiştir.

Kullanılan standart (ASTM D 2412) test edilen silindirik numuneler arasında oldukça hızlı karşılaştırma imkânı sunan bir standarttır. Hızlı karşılaştırma özelliği, test edilen numuneler üzerinde asgari numune hazırlığı gerektirmesinden ve numunelerin geometrik özelliklerinin birbirinin aynı olduğunu varsaymasından ileri gelmektedir.

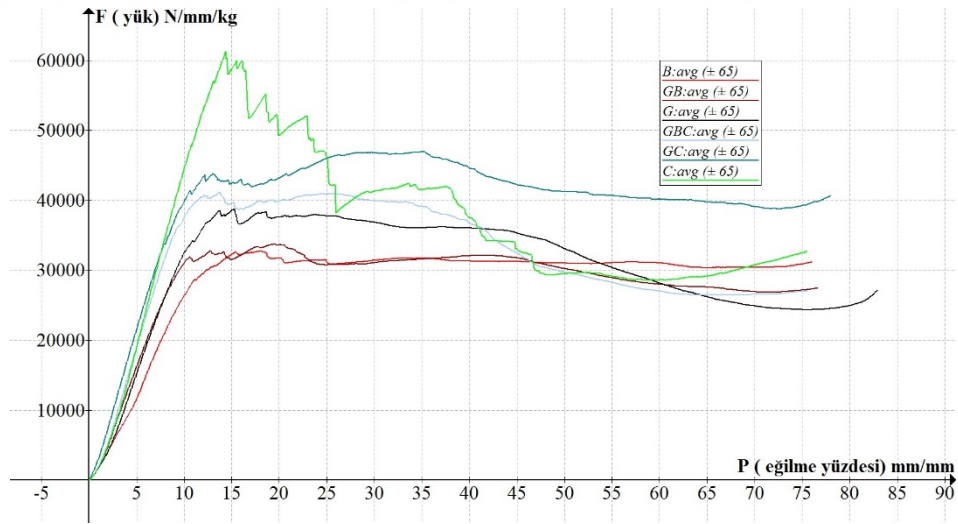
Ancak, üretim sürecinde kullanılan elyafların, her kat için mandrel yüzeyinde oluşturduğu kalınlıklar ve bu elyafların özgül esneklik özellikleri farklılık arz etmektedir. Örneğin verilerden en yüksek yanal basma dayanımına sahip olduğu anlaşılan $\pm 65^\circ$ bazalt numunelerin et kalınlıkları ve ağırlıkları diğer numunelere göre daha fazladır. Elde edilen sonuçlara bu açıdan bakıldığında, yanal dayanım değerlerinin kalınlık ve numune ağırlıklarına göre değerlendirme gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.5) farklı takviye malzemelerinin kullanıldığı $\pm 65^\circ$ sarımlı test numunelerinin et kalınlığı ve ağırlık cinsinden ortalama değerlerini göstermektedir

Tablo 3.5. G, B, C, GB, GC ve GBC numunelerinin kalınlık ve ağırlık değerleri

Veri ortalaması	Silindirin kalınlığı (mm)	Ağırlık (g)
G.avg	3.81	35.30
B.avg	5.08	45.79
C.avg	2.23	14.50
GB.avg	4.40	39.14
GC.avg	3.32	25.97
GBC.avg	3.63	30.97

Tablo 3.5' de verilen bu numuneler için basma dayanımı, birim kalınlık ve birim ağırlık başına düşen yanal basma yükü değerlerinin fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.36) eğilme yüzdelerine karşılık numunelerin birim kalınlık ve ağırlıkları başına düşen yük miktarlarının grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.22. Tüm numuneler için kalınlık ve ağırlık oranlı yük-eğilme yüzdesi grafikleri

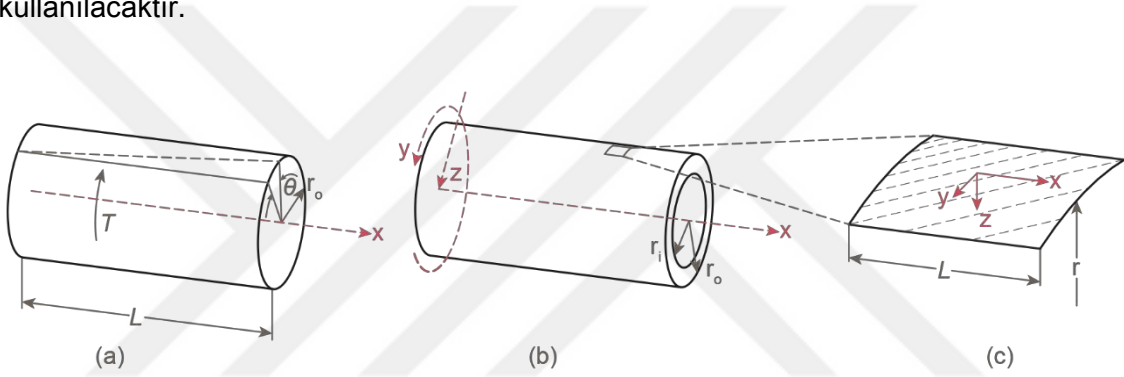
Bu durumda en yüksek yanıl basma dayanımına sahip numuneler yalnız karbon elyaf destekli numuneler ve en düşük yanıl basma dayanımına sahip numuneler de bazalt elyaf destekli numunelerdir. Grafikten cam elyaf takviyeli numunelerin yanıl basma dayanımlarının bu iki değer arasında olduğu görölmektedir. Ayrıca, melez yapılar beklenildiği gibi tek tip elyaf destekli numunelerin dayanım değerlerinin arasında kalmıştır.

Elde edilen bu veriler yardımı ile belirli bir yanıl basma dayanımı isteri için ağırlığın minimize edilmesi ele alınırsa C kodlu numunelerin en uygun çözüml olduğu düşünölebilir. Fakat eniyileme probleminin içine farklı işlevsel isterler dâhil edildiğinde ve ağırlığın yanında maliyet gibi farklı kısıtlar da amaç fonksiyonu içinde kullanıldığında problem karmaşıklaşmaktadır. Kullanılan elyaf sarma cihazının 20° ile 89° arasında teorik olarak sınırsız sayıda istif düzeni üretebileceği de göz önüne alındığında, ASTM D 2412 gibi hızlı sonuç alınabilen test standartları kullanılsa bile, eniyileme için deneme-yanılma yönteminin kullanımının yetersiz kalacağı açıkça görölmektedir. Bu nedenle problem, öncelikle matematiksel olarak ortaya konulabilir olmalıdır. Sonrasında bu model üzerinden eniyileme algoritmalarının üreteceği çözümler değerlendirilebilir.

3.2. Matematiksel Model

Kardan milinin, içten yanmalı motorun üretebildiği en yüksek momenti aktarabilecek yapıda olması gerekmektedir. Ayrıca milin dakikada belirli bir sayıdaki çevrimden daha yüksek devirlerde çalışabilmesi hedeflenmektedir. Bu işlevsel isterleri karşılayacak bir kardan mili tasarımı için temel alınacak matematiksel modelin, yön bağımlı özellik gösteren fiber takviyeli tabaklı kompozit malzemelere sistematik bir şekilde uygulanabilmesi sabit bir konaç dizgesi seçimi ile daha kolaydır.

Bu nedenle aşağıda Şekil 3.37' de (b ve c) görülen konaç dizgesi, elyaf sarma sürecini, milin silindirik formunu ve tabakaların ortotropik özelliğini ifade etmedeki uygunluğu nedeni ile seçilmiştir. Bundan sonraki ifadelerde bu konaç dizgesi kullanılacaktır.



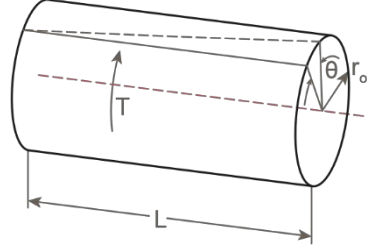
Şekil 3.23. Kardan milinin analizi için kullanılan genel konaç dizgesinin gösterimi

Şekil 3.37 'deki dizgede, x, silindir eksen yönünde (a); y, silindirin çevresine teğet yönde (b); z, referans alınan silindirik yüzeye dik ve bu yüzey başlangıç sayılarak silindirin içine doğru artacak yönde (c) seçilmiştir. z-ekseni için referans yüzey, silindir iç ve dış yüzeylerinin ortasından geçen silindirik yüzey, yani matematiksel anlamda kompozit plakanın orta-düzlemine (mid-plane) denk olan yüzeydir. Şekilde de görüldüğü gibi bundan sonraki ifadelerde r_o , silindirin dış yarıçapı; r_i , silindirin iç yarıçapı; L , silindirin boyu olarak kullanılacaktır.

3.2.1. Burulma dayanımı

Kardan mili, içten yanmalı motorun ürettiği gücü dairesel hareket yapan krank milinden alarak aracın tekerleklerine ileten bir aktarma organıdır. Dolayısı ile güç aktarımı sırasında oluşan moment, mil üzerinde burulma (torsion) gerçekleştirir. Kardan milinin tasarımı mil üzerinde oluşacağı öngörülen momentleri aktarabilecek burulma dayanımına sahip olacak şekilde yapılmalıdır.

Literatür taramalarında hedeflenen burulma dayanımının 680-3500 Nm değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Bu değerlerin birçok binek araçta rastlanabilecek dönme momenti değerini karşılayacağı düşünülmüştür [31 ve 34].



Şekil 3.24. Eşyönlü bir malzemelerde uygulanan momentin yarattığı burulma

Şekil 3.38’ de görüldüğü gibi, silindire ekseninden geçen bir T momentini uygulandığında, silindir θ açısı kadar burulmaktadır. Malzemenin kayma dayanımı biliniyorsa, kayma gerilmesi τ , silindirin yarıçapı üzerinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\tau = \frac{T r_o}{J}. \quad (3.4)$$

Burada J , kutupsal atalet momentidir.

Eğer silindirin içi boş ve et kalınlığı ince olursa, et kalınlığı boyunca oluşan kayma gerilmelerinin ortalama değerinin, $(\tau_{xy})_{average}$, silindirin et kalınlığının ortasında rastladığı varsayılabilir. Bu durumda oluşacak moment aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

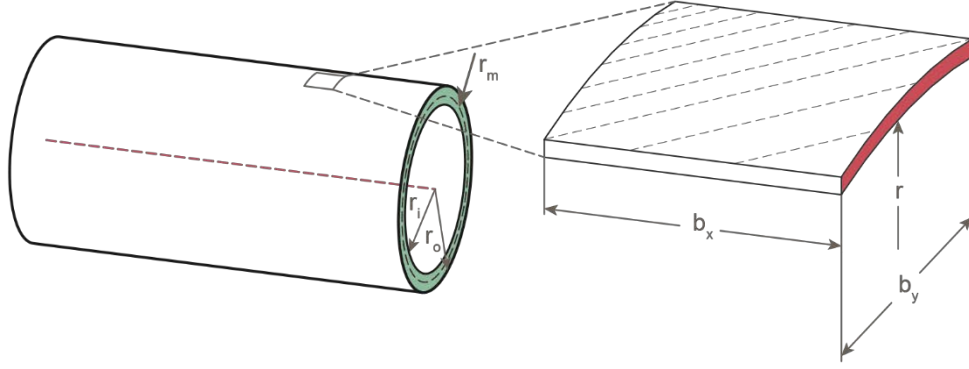
$$T = (\text{kayma gerilmesi})(\text{alan})(\text{moment kolu}) \quad (3.5)$$

r_m , ortalama yarıçapın değeri, silindirin iç ve dış çap değerlerine bağlıdır.

$$r_m = \frac{r_o + r_i}{2}. \quad (3.6)$$

Bu durumda Şekil 11’de görülen silindir için burulmaya neden olan momentin ifadesi:

$$T = (\tau_{xy})_{average} \pi (r_o^2 - r_i^2) r_m. \quad (3.7)$$



Şekil 3.25. Burulmaya maruz kalan içi boş silindir

Bu silindir tabakalı kompozit yapıda ise Şekil 3.38' görüldüğü gibi silindirden alınan küçük bir elaman, düzlemsel tabaka olarak kabul edilebilir. Bu durumda bu elemana etkiyen tek kuvvet N_{xy} kayma kuvveti olacaktır.

Böylece düzlemsel tabaka üzerinde alınan birim uzunluğa (Şekilde 3.38' de b_y olarak gösterilmiştir.) düşen kayma kuvveti:

$$N_{xy} = (\tau_{xy})_{average} t. \quad (3.8)$$

Et kalınlığı, t , iç ve dış çaplar üzerinden ifade edilirse:

$$t = r_o - r_i. \quad (3.9)$$

Böylece kayma kuvvetini ifade eden eşitlik (3.8), uygulanan moment üzerinden:

$$N_{xy} = \frac{T}{2\pi r_m^2}. \quad (3.10)$$

Ayrıca, eğer milin yüksek devirlerde döndüğü de göz önüne alınır ve bu yüksek açısal hızların mil üzerinde yaratacağı merkezkaç kuvveti de hesaba katılacak olursa; içi boş ince duvar kalınlığına sahip bir silindirin dönme yönünde oluşan stres değeri, σ_H :

$$\sigma_H = \rho r_m^2 w^2. \quad (3.11)$$

Olarak ifade edilir. Burada ρ , silindiri oluşturan malzemenin yoğunluğu ve w açısal hızdır. Böylece tabaka üzerinde alınan birim uzunluğa (Şekil 3.38' de b_x olarak gösterilmiştir.) düşen kuvvet:

$$N_y = \rho t r_m^2 w^2. \quad (3.12)$$

Tabakaya x-yönünde bir kuvvet veya herhangi yönde bir moment etki etmediğinden. Eşitlik (2.24) bilinen kuvvetler üzerinden tekrar ifade edilecek olursa:

$$\begin{Bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\kappa\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ \rho t r_m^2 w^2 \\ T \\ \frac{T}{2\pi r_m^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (3.12)$$

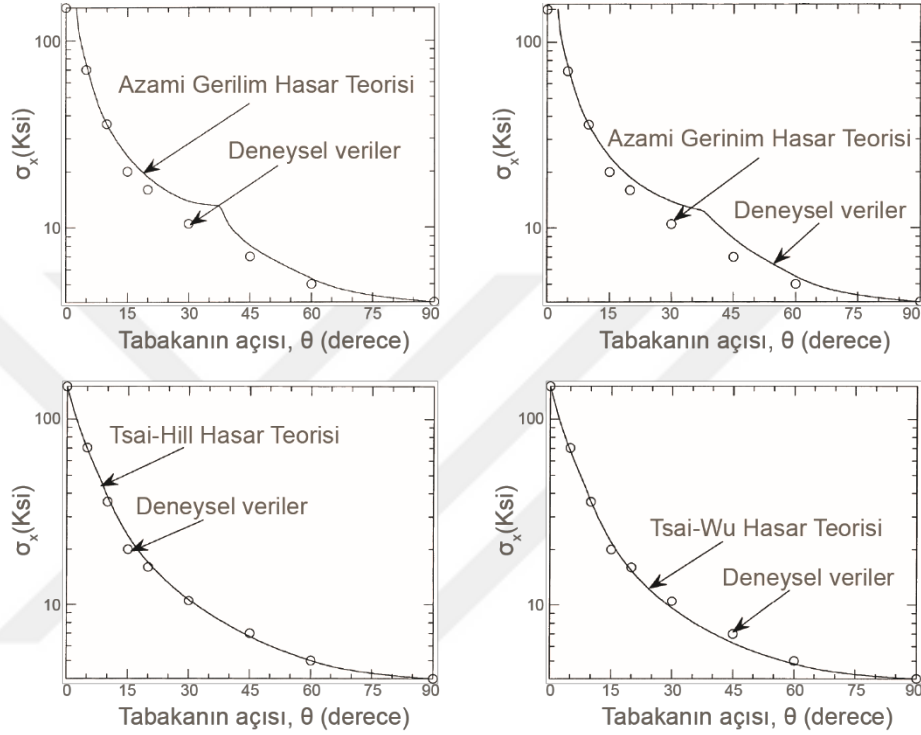
Daha önce de bahsedildiği gibi kompozit plakayı oluşturan tabakalar, orta-düzleme göre simetrik dizilirler ise, bağlaşım matrisi B 'nin değeri sıfır olur. Kardan milini oluşturan tabakaların simetrik olması durumunda eşitlikte (3.12) gösterildiği gibi tabakanın orta-düzlemine ait eğrilik vektörü, $\{\kappa\}$, sıfır değerini alacak ve eşitlik (2.21)' verilen gerinim ifadesi aşağıdaki ifadeye dönüşecektir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

Yani kompoziti plakayı oluşturan her tabakanın gerinimleri kompozitin orta-düzlemindeki gerinimlere eşit olacaktır. Kompozit malzemelerin mukavemet kaybı, hem tek tek bileşenlerinin hem de bu bileşenler arası arayüzün hasarından kaynaklanabilir ve bu olgunun modellenmesini mikromekanik seviyede yapmak gerekmektedir.

Karmaşık yükleme altındaki tek bir kompozit tabakada hasar, tabakadaki gerilimlerin bileşenlerin özgül mukavemet değerleri ile karşılaştırılması ile tahmin edilebilir. Ancak kompozit laminenin hasarının tek bir tabakadan hasarından kaynaklandığı az miktarda vaka bulunmaktadır. Laminedeki gerilimler tabakadan tabakaya farklılık göstermekte, plakanın hasarı farklı tabakalardaki mukavemet kaybı olaylarının karmaşık bir sıralamada meydana gelmesini içermektedir. Bu nedenle bileşenlerinin özgül dayanımları temelinde tabakalı kompozitlerin dayanımlarını tayin eden genel geçer bir analitik ifade bulunmamaktadır. Dahası, kompozit tabakaların ayrışması (delamination) gibi sadece tabakalı kompozitlere özgü hasar modları bulunmaktadır. Bu gibi hasarlar makroskopik seviyede gözlemlense de, hasarın başlaması genellikle mikroskobik olaylar nedeni ile olmaktadır. Örneğin, ayrışma olayında, uygulanan yükün katmandan katmana aktarılması tabakalar arası ara yüze yakın fiberler ve etraflarındaki anafazda karmaşık bir gerilim durumu yaratır ve fiber-matris ara yüzünde mukavemet kaybına yol açar [40].

Birçok mühendislik tasarımı uygulamasında, analiz için fiber-matris arayüz gerilimini irdeleyecek seviyede detay kullanmak gerçekçi veya uygulanabilir olmayacaktır. Tasarımcıların genel yaklaşımı hasarın mikromekanik doğasını görmezden gelerek, analizi, genellikle gözlenen belirli sınıflardaki lamine hasarlarına özgü özellikleri işaret eden görüngüsel hasar modellerine kısıtlamaktır [40].



Şekil 3.26. Teorilerinin deneysel veriler ile tutarlılığının karşılaştırılması [6]

Modellemede Tsai-Wu Hasar Teorisi kullanılacaktır. Tsai-Wu Hasar Teorisi, Tsai-Hill Hasar Teorisinden farklı olarak ölçütleri içerisine basma kuvvetlerini de dâhil eder. Azami Gerilim ve Azami Gerinim Teorilerine göre deneysel veriler ile daha uyumlu sonuçlar verir [43]. Şekil 3.39' da genel eksenlerde x-yönünde çekilen tabakaların farklı yerel eksen açılarına göre hasara uğradığı gerilim değerleri teorik ve deneysel temelde karşılaştırılmıştır. Şekil 3.39' da görülen Tsai-Hill teorik grafiği (sol-alt), ölçütleri içine tabakanın basma dayanımlarının da ilave edildiği, değiştirilmiş (modifiye) eşitliklerin ürettiği grafiklerdir.

Tsai-Wu Hasar Teorisinde,

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_6\tau_{12} + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_{12}^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (3.14)$$

eşitsizliği ihlal edilirse tabakanın hasara uğrayacağı öngörülür.

Burada, $(\sigma_1^T)_{ult}$, tabakanın fiber yönü azami çekme dayanımı; $(\sigma_1^C)_{ult}$, tabakanın fiber yönü azami basma dayanımı; $(\sigma_2^T)_{ult}$, tabakanın fiber doğrultusuna dik azami çekme dayanımı; $(\sigma_2^C)_{ult}$, tabakanın fiber doğrultusuna dik azami basma dayanımı; $(\tau_{12})_{ult}$, tabakanın azami kayama gerilimi dayanımı olmak üzere:

$$H_1 = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}}, \quad (3.15)$$

$$H_2 = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}}, \quad (3.16)$$

$$H_6 = 0, \quad (3.17)$$

$$H_{11} = \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}, \quad (3.18)$$

$$H_{22} = \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}, \quad (3.19)$$

$$H_{66} = \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}. \quad (3.20)$$

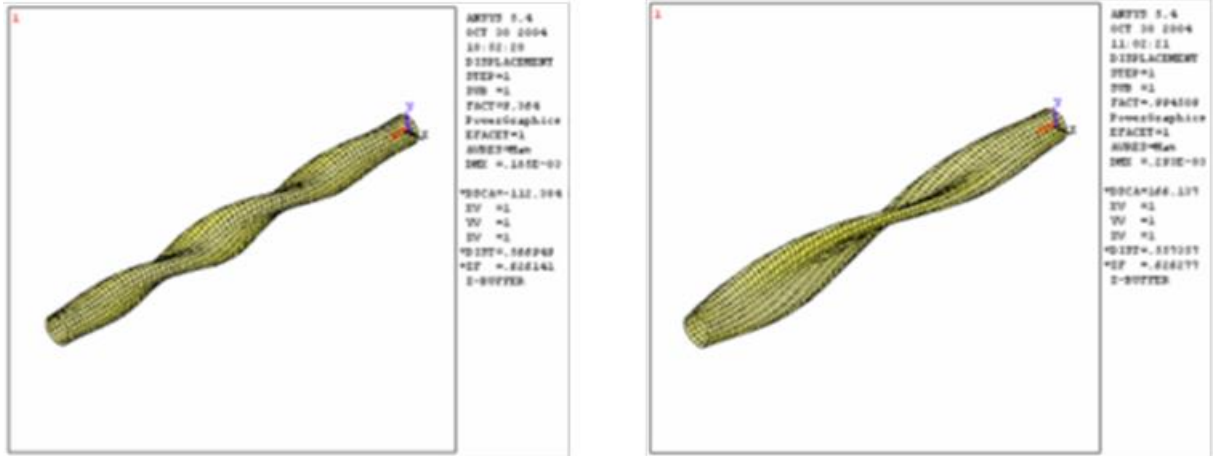
H_{12} değeri hariç, Tsai-Wu Hasar Teorisindeki bütün katsayılar tabakaya genel eksenleri yönünde yapılan aksenal çekme ve basma değerleri ile elde edilebilmektedir. H_{12} , katsayısının deneysel olarak elde edilebilmesi için tabakaya ya iki-yönlü çekme testi yapmak ya da tabakayı yerel eksenleri çekme yönüne 45° olacak şekilde yerleştirerek hasara uğratana kadar çekmek gerekmektedir. Deneysel olarak ikinci yol (tabakanın cihazın çekme eksenine 45° açı ile yerleştirilmesi) daha ulaşılabilir görünmektedir. Bu iki imkânın bulunmadığı olmadığı durularda H_{12} değeri, Tsai-Wu, Hoffman ve Mises-Hencky ölçütlerine göre ampirik olarak bulunabilir.

45° açılı tabakanın hasara uğradığı gerilim değeri (σ olsun) tabakanın yerel eksenlerinde çözümlenir. Yerel eksenlerde bu değerin karşılığının, $\sigma_1 = \sigma/2$, $\sigma_2 = \sigma/2$ ve $\tau_{12} = \sigma/2$ olduğu kolayca görülebilir. Bu değerler eşitlik (3.14) içindeki yerlerinde kullanıldığında:

$$H_{12} = \frac{2}{\sigma^2} - \frac{(H_1 + H_2)}{\sigma} - \frac{1}{2}(H_{11} + H_{22} + H_{66}) \quad (3.21)$$

3.2.2. Burulma burkulması

Matematiksel modelde kardan milini oluşturan herhangi bir tabakada, Tsai-Wu Hasar Teorisinin ölçütlerine göre, bir hasar oluştuğunda mil tasarımının başarısız olduğu kabul edilecektir. Eşyönlü malzemelerde, içi dolu silindir yapıdaki bir elamana eksenine paralel bir moment uygulandığında yapı burulacaktır. Eğer uygulanan moment değeri malzemenin mukavemet değerlerini aşıyorsa kesme gerilimi sonucu yapısal elaman bütünlüğünü kaybedecektir. Fakat uzun ve ince duvar kalınlığına sahip içi boş, tüp formundaki, silindirler burulma burkulmasına (torsional buckling) yatkındırlar. Şekil 3.40' da cam fiber destekli (sol) ve karbon fiber destekli (sağ) silindirik millerin burulmalarının sonlu elamanlar analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.27. Cam (sol) ve karbon (sağ) destekli millerin burulma burkulmaları [34]

Burulma burkulması ihtimali silindire uygulanan moment üzerinden ifade edilir. Eşyönlü malzemeler için, burulma burkulmasını oluşturacak kritik moment değeri:

$$T_b = (2\pi r_m^2 t)(0.272)(E) \left(\frac{t}{r_m} \right)^{3/2}. \quad (3.22)$$

Önceki eşitliklerde belirtildiği gibi, burada r_m , silindirin ortalama yarıçapı ve t , silindirin et kalınlığıdır. E ise eşyönlü malzemenin esneklik sabitidir. Eşitlik (3.22) ortotropik özellik sergileyen fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemedен oluşan bir silindir için aşağıdaki forma dönüşür:

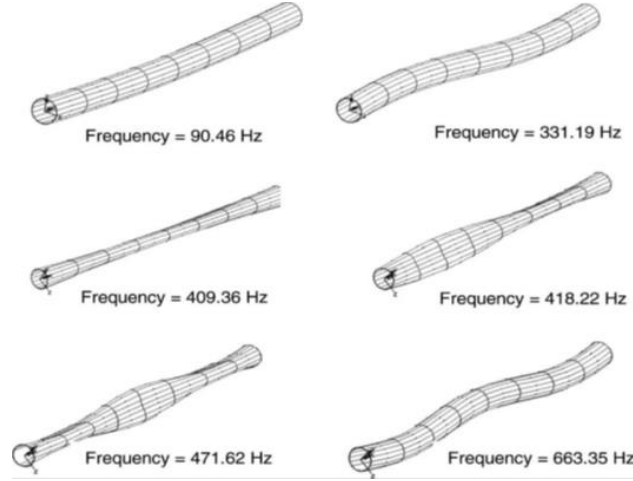
$$T_b = (2\pi r_m^2 t)(0.272)(E_x E_y^3)^{1/4} \left(\frac{t}{r_m}\right)^{3/2}. \quad (3.23)$$

Eşitlik (3.23) kompozit plakanın bileşke esneklik modül değerleri E_x ve E_y üzerinden burulma burkulmasına sebep olabilecek moment değerini (T_b) ifade eder. Bu nedenle, tasarımı yapılan kardan milinin moment aktarma kapasitesi hedeflenen moment değerini geçse dahi, burulma burkulması için kritik değer olan T_b , hedeflenen moment aktarma kapasitesinin altında ise kardan mili burkularak hasara uğrayacaktır.

3.2.3. Eğilme doğal frekansı

Dönme hızı belirli değerlere geldiğinde, millerin dinamik olarak kararsız hale geldiği ve büyük şiddette titreşimler ürettiği iyi bilinen bir olgudur. Bu olaya tınlama (rezonans) etkileri neden olur ve milin kendi etrafında dönme frekansı milin doğal titreşim frekansına ulaştığında gözlenir. Farklı geometrik form ve malzeme özelliklerine sahip yapısal elemanların, farklı titreşim modları ve doğal titreşim frekansları bulunmaktadır.

Dönme frekansının yapısal elemanın doğal yanal frekanslarına (natural lateral frequency) eşit olduğu durumlarda, yapının dönmesi nedeni ile oluşan küçük etkiler tınlama nedeni ile sönmelenemez ve girişime uğrayan titreşimler şiddetini artırmaya devam eder. Milin dönüş hızı (bir dakikadaki devir sayısı), milin frekansından 60 kat daha yüksektir. Yukarıda da belirtildiği gibi, devir sayısı ile eğilme doğal frekansı (natural bend in frequency) eşitlenirse büyük şiddete titreşimler oluşacak ve kardan mili hasara uğrayacaktır [43].



Şekil 3.28. Milin doğal frekansının ilk altı modu [44]

Şekil 3.41'de içi boş silindirik yapıdaki bir milin kendine özgü ilk altı eğilme doğal frekansı ve bunlara karşılık gelen titreşim modları gösterilmiştir. Kardan mili basit mesnetli kiriş (simply supported beam) olarak varsayılırsa, doğal eğilme frekansı, f_n , Bernoulli-Euler Kiriş Teorisi'ne göre aşağıdaki gibi hesaplanır [44].

$$I_x = \frac{\pi}{4} (r_o^4 - r_i^4), \quad (3.24)$$

$$f_n = \frac{\pi p^2}{2} \sqrt{\frac{E_x I_x}{m L^4}}. \quad (3.25)$$

Eşitlikte (3.25) I_x , mil kesitinin alan atalet momenti; m , birim mil uzunluğunun kütlesi ve L , milin uzunluğudur. Eşitlikte görülen p değeri hesaplanmak istenen doğal titreşim modunun tamsayı değerini alır. Mil tasarımının, milin birinci doğal eğilme frekansı hedeflenen azami devir sayısından yüksek olacak şekilde yapılması hedeflenmektedir. Bu nedenle eşitlikte (3.25) $p = 1$ olarak alınabilir. Eşitlikte (3.25) ifade edildiği gibi, doğal eğilme frekansı milin uzunluğunun karesi ile ters orantılı değişmektedir. I_x , geometri tarafından belirlendiğinden kardan mili için sabittir. Bu durumda kardan milinin eğilme doğal frekansını artırmanın tek yolu E_x/m oranını artırmaktır. Geleneksel çelik kullanımı ile esnemezlik değeri artırılabilir fakat milin kütlesi de artacaktır.

3.3. Optimizasyon

Çalışmada optimizasyon için parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization) tekniği tercih edilmiştir. Literatürde kompozit malzemelerin optimizasyonunda sıklıkla genetik algoritmaların (genetic algorithms) kullanıldığı örnekler ile karşılaşmaktadır.

Genetik algoritmaların (GA) tercih nedenlerinden biri, ileri kompozitlerin üretiminde halen yüksek oranda el işçiliğinin kullanılıyor olmasıdır. Öyle ki, ileri kompozit bir parçanın açılma istif düzeni tasarlanırken, el işçiliği kullanımının getirdiği kısıtlamalar gözlemlenerek, her katta kullanılacak açılar genellikle 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 75^\circ$ ve 90° gibi değerler ile sınırlandırılır. Kompozit parçanın her bir tabakasının açıları, bu kısıtlı değerler arasından seçilir ve tasarım problemi bir kombinasyon problemine dönüşür [45].

Genetik algoritmalar, doğaları gereği, kesikli karar değişkenlerinin kullanılması gereken optimizasyon problemlerinde oldukça makul sonuçlar verirler. Ancak, çalışmanın konu edildiği kardan mili problemde, üretimin CNC kontrollü bir elyaf sarma cihazı ile yapılacağı varsayıldığından, karar değişkenlerinden biri olan sarım açısının sürekli olduğu söylenebilir. Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmaları bu tip problemlerde daha etkili sonuçlar üretmektedirler [46].

Optimizasyon bağlamında kompozit malzemenin özelliklerinin tasarımı, performans ölçütlerinin azami veya asgari seviyelere çekilmesi ile alakalıdır. Performans ölçütü kompozit plakanın ağırlığı veya maliyeti olabilir. Burulma dayanımı, burulma burkulması ve doğal eğilme frekansı gibi arzulanan işlevsel özellikler ise tasarımın işlevsel kısıtlarıdır. Alternatif olarak, işlevsel özellikler azami veya asgari seviyelere çekilirken maliyet ve/veya ağırlık, tasarım kısıtları olarak alınabilir. İki durumda da optimizasyon sürecinde optimum sonucu elde etmek için kullanılacak karar değişkenleri, genellikle tabaka istif düzeni ve tabaka kalınlıkları olmaktadır.

Elyaf sarma tekniğinde kullanılan elyaf sabit kalınlıklarda tabakalar üretecektir. Bu nedenle problem, tabaka kalınlığından çok bu tabakaların sayılarının optimizasyonuna dönüşmektedir. Çalışmada üç farklı destek malzemesinin (karbon, cam ve bazalt elyaf) kullanımı öngörüldüğünden, farklı tabakalar için hangi takviyenin seçileceği de eniyileme parametresi haline gelmektedir.

Tabakalı kompozitlerin, her katman için kalınlık, sayı ve açı değerleri göz önüne alınarak tasarlanmaları için kullanılan PSO ve GA gibi optimizasyon algoritmalarının dahil olduğu grup, üstsezgisel veya metasezgisel algoritmalar olarak anılmaktadır [47].

Üst sezgisel yöntemleri kullanmanın başlıca üstünlükleri:

- Öncül olarak problem uzayının gradyan bilgisine sahip olmaları gerekmez. Bu nedenle, gradyan bilgisinin olmadığı veya elde etmenin zor olduğu problemlerde kullanılabilirler
- Uygun bir şekilde kullanıldıklarında yerel en iyi çözümlerde (local optimal) takılıp kalmazlar
- Düzgün olmayan (non-smooth) veya kesikli (discontinuous) fonksiyonlara uygulanabilirler
- Tek bir çözüm üretmek yerine birçok iyi çözümden oluşan sonuçlar verirler

Bunun yanında üstsezgisel yöntemlerin kullanımının, birtakım engelleri bulunmaktadır:

- Verimliliği artırmak için üstsezgisel yöntemin birçok parametresini deneme yanılma ile ayarlamak gerekebilir.
- Performanslarının öncül olarak bilinmesi matematiksel olarak muğlak bir sorudur.
- Optimum sonuçları elde etmek amacıyla çok fazla miktarlarda çözüm üretip bu çözümleri değerlendirdikleri için, hesaplama maliyeti üstsezgisel yöntemin kullanımına imkân vermeyebilir.

Çalışmada parçacık sürü optimizasyonuna yer verilmiştir. Bu üst sezgisel eniyileme algoritmaları verimli sonuçlar almak için ayarlanması gereken fazla sayıda parametrelerinin olmayışı ve aynı anda kesikli ve sürekli değişkenler uygulanabilmeleri ile ön plana çıkmaktadırlar.

3.3.1. Parçacık sürü optimizasyonu

PSO problem uzayında birçok çözümün üretilmesi ve her döngüde bu çözümlerin iyileştirilmesine dayanmaktadır. Bu algoritmaların çalışma prensibi, genellikle doğada besin arayışında olan sürü hayvanlarının davranışlarına benzetilmektedir. Sürüdeki her birey diğer bireyler ile iletişim halindedir. Bireyin, besin kaynağına yakınlığa göre veya besin kaynağının bolluğuna göre diğer bireyler tarafından takip edilmesi oranı artar. Sürü besince zengin bölgelere uzak olsa bile bu bölgeleri tek bir bireyin keşfetmesi sürüyü o tarafa çekmeye ve daha detaylı arama yapılmasına yetecektir. Ayrıca sürüdeki her bireyin kendi tecrübeleri de olası besin kaynaklarını bulmada bireylere yarar sağlamaktadır.

PSO' da her parçacık üç vektörden oluşmaktadır. Bunlar: anlık konum, c , anlık hız, v ve parçacık tarafından bulunmuş en iyi çözüm, p , vektörleridir. Ayrıca her parçacık için iki yeterlilik değeri bulunmaktadır. Bu değerler sırasıyla: anlık yeterlilik ($c - fitness$) ve en iyi yeterlilik ($p - fitness$) değerleridir.

Algoritmanın her döngüsünde parçacıkların problem uzayındaki anlık pozisyonları aşağıdaki eşitliklere göre belirlenmektedir.

$$v_{id} = K \left(v_{id} + \varphi_1 U(0,1)(p_{id} - c_{id}) + \varphi_2 U(0,1)(p_{gd} - c_{id}) \right) \quad (3.26)$$

$$c_{id} = c_{id} + v_{id} \quad (3.27)$$

Burada, c_{id} parçacık "i" için anlık konum, p_{id} parçacık "i" için bulunmuş en iyi çözüm, p_{gd} parçacığın içinde bulunduğu döngüye kadarki süreçte tüm parçacıklar arasında bulunmuş en iyi çözümdür. φ_1 ve φ_2 sürü içi kavrama ve sosyal etkileşimleri sağlayan öğrenme katsayılarıdır. "d" *indisi*, ilgili vektörün "d" inci boyutunu ifade eder. $U(0,1)$ [0,1] aralığında düzgün dağılmış rastlantısal bir sayıdır ve her döngüde yenilenir. K hız güncellemesinde sürünün gereğinden fazla dağılmasını önlemek ve kararlılık sağlamak için kullanılan büzülme veya toplanma katsayısıdır.

Parçacığın pozisyonu, c_{id} , güncellendiği anda parçacığın anlık yeterliliği ($c - fitness$) hesaplanır. Eğer anlık yeterlilik en iyi yeterlilikten ($p - fitness$) daha iyi bir değere sahipse en iyi çözüm (p) ve en iyi yeterlilik ($p - fitness$) değerleri güncellenir. Böylece sürü içindeki her parçacık, kendi deneyimlerinden ve bütün sürüden edindikleri bilgiler aracılığıyla, algoritmanın durma koşulu sağlanana kadar problem uzayını aramaya devam eder.

3.3.2. Kısıtlar

Yukarıda detaylıca tanımlanan kardan mili problemi için, milin geometrik ölçüleri, milin yerine getirmesi gereken işlevler, kullanımına izin verilen malzemeler ve üretim sürecinden kaynaklanan kısıtlardan bahsedilebilir. Bu kısıtların optimizasyon döngüsü içinde kullanımıyla, karar değişkenlerine karar verilmesinde taranacak olan problem uzayının hacmi daraltılmış olur.

3.3.2.1. Kardan milinin geometrik kısıtları

Yukarıda matematiksel tanımı yapılan, kardan milinin eniyileme probleminde kısıtlanması gereken iki geometrik parametre bulunmaktadır. Bunlardan biri milin uzunluğu diğeri ise kardan milin dış çapıdır. Kardan milinin uzunluğu doğal eğilme frekansını etkilemektedir. Kardan milin çapı ise bahsedilen üç işlevsel kısıt için de geometrik indis niteliğindedir.

Üreticilerin kardan milli tasarımlarında, milin çalışma alanını veya montaj çözümlerini dış çap belirleyecektir. Bu nedenle kardan milinin çapının, iç çap olarak değil, dış çap olarak kısıtlanmasının sebebi tamamen pratik nedenler ile alakalıdır.

Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.6) PSO döngülerinde geometrik kısıtlar olarak kullanılan dış çap ve mil uzunluğu değerleri verilmiştir.

Tablo 3.6. Kardan mili için kullanılan geometrik kısıtlar

Geometrik kısıt	Kullanılan değer
Dış çap	0.90 (m)
Mil uzunluğu	1.250 (m)

3.3.2.2. Kardan milinin işlevsel kısıtları

Kardan mili için üç farklı işlevsel kısıt bulunmaktadır. Bunlar burulma dayanımı, burulma burkulması ve doğal eğilme frekansıdır. Ayrıca bu kısıtlar için kullanılacak güvenlik katsayıları da önemlidir. Tablo 3.7' de optimizasyonda kullanılan işlevsel kısıt değerleri görülmektedir.

Tablo 3.7. Kardan mili için kullanılan işlevsel kısıtlar

İşlevsel kısıt	Kullanılan değer	Güvenlik katsayısı
Burulma dayanımı	500 (N-m)	2
Burulma burkulması kritik yük	500 (N-m)	2
Doğal eğilme frekansı	6000 (devir/dk.)	1

Kardan milinin burulma dayanımının, burulma burkulmasına yol açacak kritik yük değerinin ve doğal eğilme frekansının Tablo 3.7' de verilen değerlerden büyük olması gerekmektedir.

3.3.2.3. Üretim süreci kısıtları

Üretim yöntemi olarak elyaf sarma cihazının kullanımı beraberinde belirli kısıtlamalar getirmektedir. PSO algoritmasının ürettiği çözümleri etkilemeleri açısından bu kısıtlamalardan biri büyük önem arz eder.

Bu kısıt, kullanılan elyaf sarma cihazının belirli açılarda sarım yapamamasıdır. Örneğin kullandığımız cihaz 20° ve 89° değerleri arasında sarım yapabilmektedir. 20° altında sarım yapılamamasının nedeni, ıslak elyaflar ile mandrel yüzeyi arasındaki tutunmayı sağlayan sürtünmenin bu açı değerinden sonra yetersiz kalmasıdır. Çünkü açı değeri düştükçe, gerilim kuvvetlerinin (ön gerilme kuvveti) sürtünmeyi sağlayan z eksen bileşeni azalırken kaymaya neden olan x yönü bileşeni artmaktadır. 89° üzerindeki sarımların önündeki engel ise mandrel yüzeyinin tamamen kaplanması için gereken sürenin gerçekçi olabilmesinin dönel eksenin çok yüksek hızlarda çalışması gerekliliğidir. Bu nedenle PSO algoritmasının, açı değerlerini, $20-89^\circ$ aralığında olacak şekilde seçmesi sağlanmalıdır.

3.3.3. Kullanılan malzemelerin özellikleri

Algoritmanın kullanacağı, E-cam/epoksi, bazalt/epoksi ve karbon/epoksi malzemelerinin özellikleri Tablo 3.8 'de verilmiştir

Tablo 3.8. Algoritma geliştirme sürecinde kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme Özellikleri	E-cam/epoksi	bazalt/epoksi	karbon/epoksi
E_1 (GPa)	35.00	49.10	123.34
E_2 (GPa)	9.00	8.57	7.78
G_{12} (GPa)	4.70	4.85	5.00
ν_{12}	0.28	0.29	0.27
$(\sigma_1^T)_{ult}$ (MPa)	780	954	1632
$(\sigma_1^C)_{ult}$ (MPa)	480	540	704
$(\sigma_2^T)_{ult}$ (MPa)	31	32	34
$(\sigma_2^C)_{ult}$ (MPa)	100	88	68
$(\tau_{12})_{ult}$ (MPa)	60	72	80
ρ (Kg/m ³)	1850	2110	1518
t (mm)	0.150	0.200	0.125
Birim maliyet (USD/Kg)	1.1	2.5	30

3.3.4. PSO algoritmasının kardan mili problemine uyarlanması

Geliştirilen PSO algoritmasında ilk aşamada, elyaf sarma süreç parametrelerinin milin tasarım değişkenleri üzerinde etki göstermediği varsayılmıştır. Böylelikle bir eniyileme problemi olarak ele alındığında kardan mili optimizasyonu, milin kaç kat sarımdan oluşacağını, her katta kullanılması gereken kompozit malzeme sistemini ve her katın açısını belirlemek üzerinedir. Eniyileme önceden bahsedilen kısıtları yerine getirecek şekilde ağırlık, maliyet veya ağırlık ve maliyetin ikisini birden amaç edinebilir.

Elyaf sarma cihazında 20° ile 89° arasında istenilen değerlerde sarım yapılabildiği varsayıldığında. Karar değişkeni olarak açı değerlerinin sürekli olduğu söylenebilir. Ancak kompozit kardan milinin kaç kat tabakadan oluşacağı ve her katın için malzeme tipi kesikli değişkenlerdir.

Tablo 3.9. PSO algoritmasında kullanılan karar değişkenlerinin özellikleri

Karar değişkeni	Alt sınır	Üst sınır	Süreklilik
Kat sayısı	1	36	Kesikli
Kullanılacak malzeme tipi	0	2	Kesikli
Sarım açısı	$[-89^\circ, -20^\circ]$	$[20^\circ, 89^\circ]$	Sürekli

Tablo 3.9' da kullanılan karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları verilmiştir. 1 katlı bir kompozit silindirin istenilen işlevsel kısıtları sağlamanın imkânı bulunmamaktadır. 36 kat ise verilen işlevsel kısıtları yerine getirmek için gereğinden fazladır. Kat sayısının 1-36 aralığında tutulmasındaki amaç ilk denemelerde problem uzayının kabaca araştırılarak uygun çözüm bölgelerinin keşfedilmesidir.

İlk denemelerde, algoritmanın yalnızca tek tip takviye kullanmasına izin verilmiş ve Karbon/Epoksi ve E-Cam/Epoksi kompozit sistemleri için uygulanabilir çözümlerin 7-12 kat aralığında olduğu bulunmuştur.

Tablo 3.9' da sarım açısı için alt ve üst sınırların $[-89^\circ, -20^\circ]$ aralığında gösterilmesinin sebebi, elyaf sarma sırasında mandrellerin tamamen kaplanması için doğrusal eksenin ileri geri hareket etmesi zorunluluğudur. Bu zorunluluk, ileri gidişlerde elde edilen açının, geri dönüşte negatif değer alması sonucunu doğurmaktadır.

Her kat için malzeme tipi ya E-cam/epoksi, bazalt/epoksi veya karbon/epoksi olabilir. E-cam/epoksi sistemi algoritmada “0” olarak kodlanmıştır. Bazalt/epoksi sistemi “1” ve karbon/epoksi sistemi algoritmada “2” olarak kodlanmıştır. Her kat için seçilecek malzeme 0, 1 veya 2 olabilir.

Algoritmanın sözde kodu (pseudo code) aşağıdaki gibidir.

```

1. Süreç{
2.     t = 0;
3.     init Sürü(t); // t döngüsündeki sürü
4.     eval Sürü(t); // sürüdeki parçacıkları değerlendir
5.     While (not done) {
6.         for i ∈ Sürü(t) { // sürünün her bir
           parçacığı için
7.             Sürü(t), g; // sürünün en iyi
           parçacığını seç
8.             upd(i, g); // i parçacığını güncelle
9.             eval(i); // i parçacığını değerlendir
10.        } //for döngüsünü bitir
11.        t++;
12.    } // While döngüsünü bitir
13. } // Süreci bitir

```

3.3.4.1. PSO çözüm kodlama ve kod çözme mekanizmaları

Sözde kodu verilen genel PSO algoritması aynı döngü içinde hem kesikli karar değişkenlerini hem de sürekli karar değişkenlerini optimize edebilecek şekilde uyarlanmalıdır. Bu amaçla kesikli karar değişkenleri için ayrı, sürekli karar değişkenleri için ayrı c , v ve p vektörleri kullanılmıştır. Fakat kesikli ve sürekli değişkenler için farklı $c - fitness$ ve $p - fitness$ kullanılması gerekliliği yoktur. Bu değerler iki farklı değişken tipi için ortaktır.

Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.10) geliştirilen algoritma için kesikli ve sürekli değişken konum vektörleri bir arada gösterilmiştir.

Tablo 3.10. Karar değişkenlerinin kodlanma mekanizması

k	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉	m ₁₀	m ₁₁	m ₁₂	m ₁₃	m ₁₄	m ₁₅	m ₁₆	m ₁₇	m ₁₈
k	θ ₁	θ ₂	θ ₃	θ ₄	θ ₅	θ ₆	θ ₇	θ ₈	θ ₉	θ ₁₀	θ ₁₁	θ ₁₂	θ ₁₃	θ ₁₄	θ ₁₅	θ ₁₆	θ ₁₇	θ ₁₈

Tablo 3.10' da görülen k kardan milinin kaç kattan oluşacağını, m_i silindirin içinden dışına kompozit katların hangi malzemeden oluşacağını ve θ_i bu katmanların açı değerlerini belirtmektedir. Tablo 3.11'da bu değişkenlerin alt ve üst sınırları ile süreklilik karakterleri görülmektedir.

Tablo 3.11. Karar değişkenlerinin gösterimi ve özellikleri

Karar değişkeni	Gösterim	Alt sınır	Üst sınır	Süreklilik
Kat sayısı	k	1	36	Kesikli
Kullanılacak malzeme tipi	m_i	0	2	Kesikli
Sarım açısı	θ_i	$[-89^\circ, -20^\circ]$	$[20^\circ, 89^\circ]$	Sürekli

Tablo 3.12' de uygulanan kodlamaya teşkil edecek bir vektör örneği verilmiştir. Bu örneğe göre parçacık kardan milinin 13 kattan oluşacağını belirtmektedir.

Tablo 3.12. Karar değişkenlerinin kullanım örneği

13	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}
13	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}

Bağlaşım esnemezlik matrisi (coupling stiffness matrix), değerinin sıfır olması için kardan milini oluşturan tabakaların orta düzlemin iki tarafında simetrik olmaları gerektiğinden, k karar değişkeninin belirttiği 13 katın malzeme ve açı değişkenleri aşağıdaki gibi kod çözümüne uğrar.

Milin sarım açıları : $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_5, \theta_4, \theta_3, \theta_2, \theta_1]$

Katların malzeme tipi : $[m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_6, m_5, m_4, m_3, m_2, m_1]$

Bahsedilen kodlama ve kod çözme mekanizması sayesinde üç karar değişkeni de aynı anda kendi problem uzaylarında bağımsızca arama yapabilmektedir. Karar değişkenlerinin anlık konum, anlık hız ve en iyi konum vektörlerinin hepsi bu şekilde kodlanmakta ve parçacık güncellemesi mümkün olmaktadır (sözde kod üzerinde upd() olarak verilmiştir). Kod çözümü sadece parçacığın uygunluğu/yeterliliği ölçüleceğinde gerekmektedir. Kod çözümü sonrasında elde edilen açı ve malzeme tipi sıralamaları doğrudan yeterliliğin ölçümünde (sözde kod üzerinde eval() olarak gösterilmiştir.) kullanılırlar.

3.3.4.2. Yeterlilik fonksiyonu ve yeterliliğinin ölçülmesi

Parçacıkların güncellemeden önce ve güncellemeden sonra yeterliliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yeterlilik ölçümünden alınan bilgilere göre sürü içinde en uygun çözümü sunan parçacık ve her bir parçacığın en uygun çözümleri belirlenir. Böylece algoritma döngüleri arasında optimum sonuca doğru gidilir.

Öncelikle parçacıkların işlevsel kısıtları yerine getirip getirilmediğine bakılmalıdır. Parçacık kod çözümüne uğradığında elde edilen açısız istif düzeni, katlarda kullanılacak malzeme tipleri ve kat sayısı belirlendiğinde, buradan elde edilen bilgiler ile öncelikle A , B ve D matrisleri hesaplanır. Daha sonra işlevsel kısıtlarda verilen en yüksek açısız hız ve burulma değerleri ile düzlem-içi gerilim altında olduğu varsayılan kompozit lamine üzerine etki eden kuvvetler hesaplanır. Problem matematiksel olarak ifade edilirken vurgulandığı gibi mil üzerine etkiyen kuvvetler yalnızca N_{xy} ve N_y kuvvetleridir. Eşitlik (3.10) ile N_{xy} ve eşitlik (3.12) ile N_y değerleri hesaplanmıştır.

A , B ve D matrisleri ve mil üzerine etki eden kuvvetler üzerinden kardan milini oluşturan her tabaka için ayrı ayrı yerel gerilim değerleri hesaplanır. Hali hazırda her tabakanın hangi malzemeden oluştuğu bilindiğinden hesaplanan yerel gerilim değerleri ilgili malzeme özellikleri ile ilişkilendirilir. Eşitliklerde (3.14-3.21) verilen hesaplamalar yardımı ile Tsai-Wu hasar kriterine göre her tabaka için tabakanın hasara uğramadan dayanabileceği azami gerilim oranları belirlenir. Her tabaka için ayrı belirlenen oranların en değere sahip olanının, milin dayanabileceği yüklenmeyi verdiği kabul edilir.

Ardından bu oran güvenlik katsayısına bölünür ve mile uygulanan moment değeri ile çarpılır. Elde edilen burulma değeri parçacık için limit burulma momentini verir. Tabakaların hasar kriterini veren, Tsai-Wu hasar teorisindeki H_{12} katsayısı Mises-Hencky kriterine uygun şekilde hesaplanmıştır.

Benzer şekilde, burulma burkulması için kritik moment değeri ve milin eğilme doğal frekansı eşitlikler (3.23) ve (3.25) verildiği gibi hesaplanmıştır. Bu sonuçlara ulaşırken yapılan ara hesaplamalar kardan milinin ağırlığı ve maliyetinin bulunması için yeterlidir.

İşlevsel kısıtların belirlediği burulma dayanımı, burulma burkulması kritik yük ve doğal eğilme frekansı ile parçacık için hesaplanan burulma dayanımı, burulma burkulması ve doğal eğilme değerleri Tablo 3.13’de gösterildiği gibi sembolize edilmiştir.

Tablo 3.13. İşlevsel kısıtlar için belirlenen ve hesaplanan değerlerin sembolleri

İşlevsel kısıt	İşlevsel kısıt sembolü	İşlevsel kısıt belirlenen değer	Parçacık için hesaplanan değer
Burulma dayanımı (Nm)	T_{cons}	500	$T_{current}$
Burulma burkulması (Nm)	Tb_{cons}	500	$Tb_{current}$
Eğilme doğal frekansı (dev/dk.)	Fn_{cons}	6000	$Fn_{current}$
Ağırlık (kg)	-	-	$W_{current}$
Minimum ağırlık (kg)	-	-	W_{min}
Maksimum ağırlık (kg)	-	-	W_{max}
Maliyet	-	-	$C_{current}$
Minimum Maliyet	-	-	C_{max}
Maksimum Maliyet	-	-	C_{min}

Ağırlık ve maliyet değerlerinin minimum ve maksimum indisleri kardan milinin tamamında tek tip malzeme kullanılması koşulunda karşılaşılan değerleri ifade etmektedir. Maliyetlerin karşılaştırılmasında, kullanılan malzemelerin birim fiyatlarının oranları kullanılmıştır.

Tablo 3.13’ de verilen sembollerin kullanımı ile uyarlanan yeterlilik (fitness) fonksiyonu aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilebilir.

$$C_1 = \left(1 - \frac{T_{current}}{T_{cons}}\right), \quad \text{if } T_{current} > T_{cons} \quad C_1 = 0, \quad (3.28)$$

$$C_2 = \left(1 - \frac{Tb_{current}}{Tb_{cons}}\right), \quad \text{if } Tb_{current} > Tb_{cons} \quad C_2 = 0, \quad (3.29)$$

$$C_3 = \left(\frac{Fn_{current}}{Fn_{cons}}\right), \quad \text{if } Fn_{current} > Fn_{cons} \quad C_3 = 0. \quad (3.30)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (3.31)$$

Eşitlikte (3.31) gösterildiği gibi hesaplanan C değeri: burulma dayanımı, burulma burkulması ve eğilme doğal frekansı işlevsel kısıtlarının yerine getirilmemesi durumunda parçacığı cezalandırma (death penalty) vazifesini görmektedir. Böylece parçacığın yeterliliği (*fitness*) eşitlik 3.32' de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

Eşitlik 3.32'de aim , optimize edilmek istenen ağırlık veya maliyeti temsil etmektedir. Eşitlikte k_1 cezalandırma ölçeğini tayin eden sabit katsayıdır.

$$fitness = aim * (1 + k_1 * C) \quad (3.32)$$

Kullanılan algoritmada, ağırlık ve maliyetin aynı anda optimize edilmesinin (multi-objective optimization) istendiği durumlarda parçacık yeterliliği aşağıdaki eşitlikteki (3.33) gibi tanımlanmıştır.

$$fitness = \sqrt{aim_1^2 + aim_2^2} * (1 + k_1 * C) \quad (3.33)$$

Kullanılan penaltı fonksiyonları ile işlevsel kısıtları yerine getiremeyen parçacıkların ağırlık veya maliyetleri çok düşük olsa dahi yeterlilikleri büyük değerler olacaktır. Bu bakımdan optimizasyon sürecinin, bir minimizasyon problemi olarak ele alındığı söylenebilir.

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

4.1. Sonuçlar

Her eniyileme denemesi için sabit sayıda bireylerden oluşan bir sürü kullanılmıştır. Başlangıç denemelerinde birey sayısı 300 olarak seçilmiştir. Ayrıca sürecin sonlanma şartı süreçte kullanılan döngü sayısına bağlanmıştır. Aşağıda sonuçları verilen eniyileme denemelerinde 1000 döngü kullanılmıştır. Bu denemelerin sonuçları kayıt altına alınmıştır.

Başlangıçta, önceden belirlenen kısıtlar için en iyi çözümlerin problem uzayının hangi bölgelerinde bulunabileceği kestirilemediğinden kat sayısı, malzeme tipi ve açısız istif düzeni karar değişkenlerinden malzeme tipi çıkarılmıştır.

Bu şekilde eniyileme algoritmasının görevi, yalnızca açısız istif düzeni ve kat sayısını eniyilemek olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla oluşturulan algoritmanın başlangıç denemelerinde yalnızca tek tip kompozit malzeme sistemi kullanılmıştır.

Denemelerde kullanılan karma malzeme sistemleri, özellikleri Tablo 3.8' de verilen E-cam/epoksi, bazalt/epoksi ve karbon/epoksi olmak üzere, E-cam/epoksi malzemesinin PSO algoritmasında tanımlanan değeri "0", bazalt/epoksi için tanımlanan değer "1" ve karbon/epoksi için tanımlanan değer "2"dir.

E-cam/epoksi sistemi karbon/epoksi sisteminden 30 kat daha az maliyetlidir fakat özgül esnemezlik ve özgül dayanım değerleri daha düşüktür. Dolayısı ile E-cam/epoksi sistemi ile yapılan optimizasyon minimum maliyet değerine sahipken aynı zamanda maksimum optimum ağırlığı verecektir. Karbon/epoksi sistemi ise minimum ağırlık değerini maksimum maliyet değerinde verecektir. Dolayısı ile kat kalınlıkları eşit olan her iki malzeme tipi için maksimum kat sayısı E-cam/epoksi sistemi ile ve minimum kat sayısı da karbon/epoksi sistemi ile belirlenerek, problem uzayında kardan milinin kat sayısının hangi aralıkta olması gerektiğine kanaat getirilebilir.

Tablo 4.1 ve 4.2' de E-cam/epoksi sistemi için yapılan eniyileme denemelerinde karşılaşılan maksimum yeterliliğe sahip parçacık ve bu parçacık için hesaplanan değerler görülmektedir.

Tablo 4.1. E-cam/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü

12	0	0	0	0	0	0	M_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}
12	21.3	20.5	88.8	20.0	20.0	70.5	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}

E-cam/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacığın açısal istif düzeni: [21.3, 20.5, 88.8, 20.0, 20.0, 70.5, 70.5, 20.0, 20.0, 88.8, 20.5, 21.3] şeklinde olacaktır.

Tablo 4.2. E-cam/epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler

k	12
T_{current}	755.5
Tb_{current}	540.8
Fn_{current}	6093.5
W_{current}	0.96
C_{current}	4.58
fitness (C_{current})	4.58

Tablo 4.3 ve 4.4' de karbon/epoksi sistemi için yapılan eniyileme denemelerinde karşılaşılan maksimum yeterliliğe sahip parçacığın en iyi çözüm vektörü ve bu parçacık için hesaplanan değerler görülmektedir.

Tablo 4.3. Karbon/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü

7	2	2	2	2	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}
7	89.0	89.0	82.1	20.0	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}

Karbon/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacığın açısal istif düzeni: [89.0, 89.0, 82.1, 20.0, 82.1, 89.0, 89.0] şeklinde olacaktır.

Tablo 4.4. Karbon/Epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler

k₁	7
T_{current}	501.4
Tb_{current}	534.2
Fn_{current}	6483.4
W_{current}	0.47
C_{current}	73.5
fitness (W_{current})	0.47

Tablo 4.5 ve 4.6' da bazalt/epoksi sistemi için yapılan eniyileme denemelerinde karşılaşılan maksimum yeterliliğe sahip parçacık ve bu parçacık için hesaplanan değerler görülmektedir.

Tablo 4.5. Bazalt/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacık vektörü

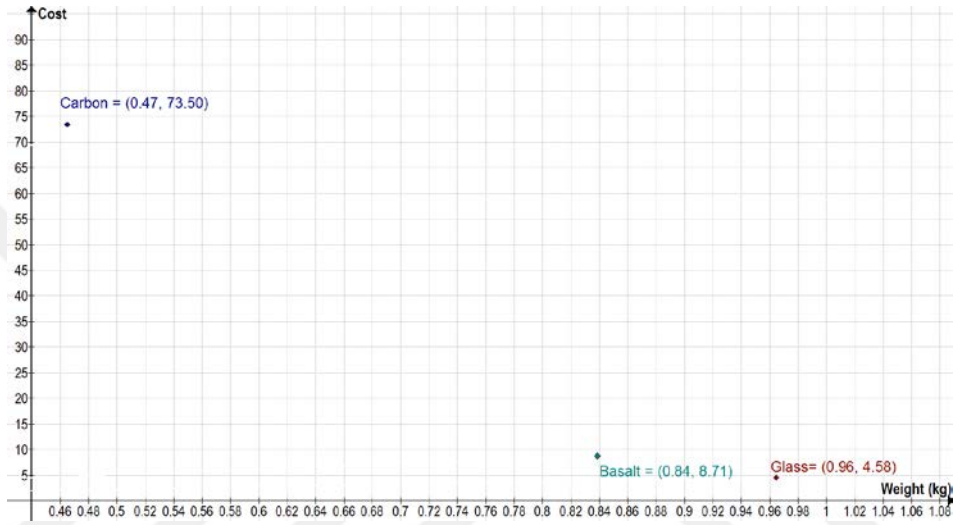
10	1	1	1	1	1	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉	m ₁₀	m ₁₁	m ₁₂	m ₁₃	m ₁₄	m ₁₅	m ₁₆	m ₁₇	m ₁₈
10	20.7	56.7	89.0	20.0	89.0	θ ₆	θ ₇	θ ₈	θ ₉	θ ₁₀	θ ₁₁	θ ₁₂	θ ₁₃	θ ₁₄	θ ₁₅	θ ₁₆	θ ₁₇	θ ₁₈

Karbon/epoksi sistemi için optimum sonucu veren parçacığın açısız istif düzeni: [20.7, 89.0, 56.7, 20.0, 89.0, 89.0, 20.0, 56.7, 89.0, 20.7] şeklinde olacaktır. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri ve birim maliyeti cam ve karbon fiberler arasındadır. Dolayısıyla, yalnızca bazalt fiberler ile takviye edilmiş kardan mili için bulunan optimum çözümlerin, yalnız cam ve yalnız karbon fiberler için bulunan çözümlerin arasına kalacağı tahmin edilebilir. Tablo 4.6'da verilen sonuçlar incelendiğinde, bu tahminin doğru olduğu görülmektedir.

Tablo 4.6. Bazalt/epoksi sistemi için elde edilen en iyi değerler

k₁	10
T_{current}	778.3
Tb_{current}	558.0
Fn_{current}	6084.8
W_{current}	0.84
C_{current}	8.7
fitness (W_{current})	0.47

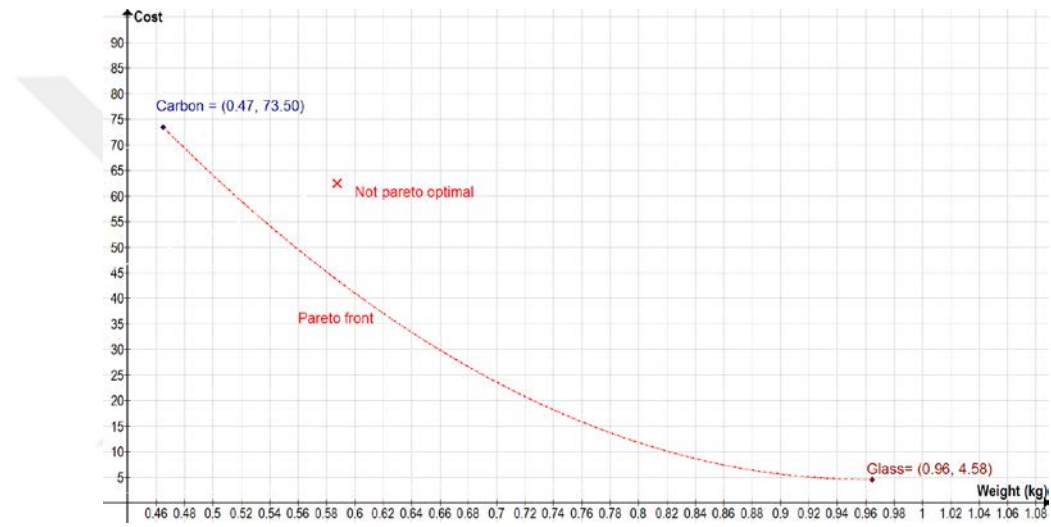
Şekil 4.1' de, yalnızca cam, bazalt ve karbon fiberler ile takviyelenmiş epoksi reçine ile elde edilen optimum ağırlık ve maliyet sonuçları görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi işlevsel kısıtları sağlayan en hafif yapı yalnızca karbon fiberler ile desteklenmiştir ancak bu yapı en yüksek maliyete sahiptir. En az maliyetli kardan milinin üretimi cam fiberler ile mümkündür fakat bu durumda kardan milinin ağırlığı en yüksek değerini alır. Bazalt fiberler ile takviyelenmiş epoksi kullanımı ile üretilen kardan mili hem ağırlık hem de maliyet açısından cam ve karbon fiberlerin arasında kalmaktadır.



Şekil 4.1. Tek tip takviye kullanımı için optimizasyon sonuçları

Yalnız cam ve yalnız karbon fiberler ile desteklenen kardan milleri için bulunan çözümlerin, uygulanabilir (feasible) çözüm uzayında ağırlık ve maliyet açısından en iyi çözümler olduğu varsayılabilir. Bu nedenle melez kompozit sistemler için elde edilecek optimum çözümleri, bu iki uç arasında aramak uygun olacaktır. Başka bir ifadeyle, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde arzulanan çözümlerin bulunduğu Pareto cephesinin (Pareto front), bu iki nokta arasında bulunacağı açıktır [47].

Şekil 4.2'de yalnız cam ve yalnız karbon fiberler kullanıldığı optimum çözümler arasında klan kurgusal bir Pareto cephesi (kırmızı renkteki eğri) görülmektedir. Şekilde, bu eğrinin orijine uzak tarafında kalan bir noktanın Pareto optimal olmama durumu (minimizasyon problemi) kurgulanmıştır. Çok amaçlı optimizasyonlar durumlarında, parçacık yeterliliğinin ölçümü için kullandığımız eşitlik (3.33) göz önüne alınır, azami parçacık yeterliliğinin, orijinden Pareto cephesine ulaşan en kısa doğrunun dokunduğu noktada sağlanacağı açıktır. Bu nedenle Pareto cephesindeki farklı optimal çözümlerin keşfi için algoritmanın arama yapacağı bölgeler ya maliyete yada ağırlığa alt ve üst sınırlar verilerek kısıtlanmalıdır.

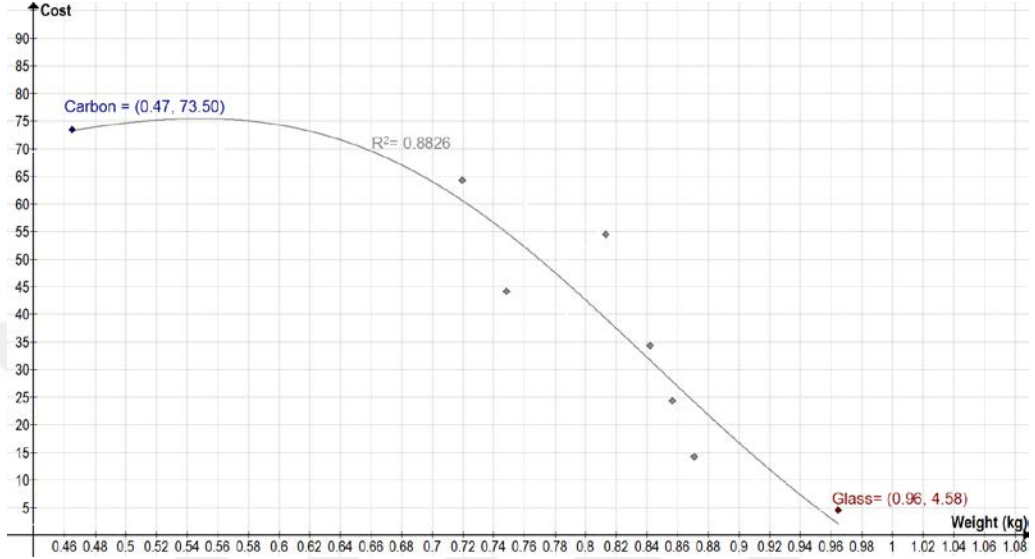


Şekil 4.2. Kardan mili problemi için olası bir Pareto cephesinin gösterimi

İlgilenilen kardan mili optimizasyonu probleminde, kat sayısı ve takviye cinsi değişkenlerinin kesikli olması, Pareto cephesini de kesikli kılar. Bu nedenle, melez kompozit sistemlerin kullanımı ile elde edilecek en iyi sonuçlar, yukarıdaki şekilde kurgulandığı gibi, düzgün (smooth) bir eğriyi takip etmeyecektir.

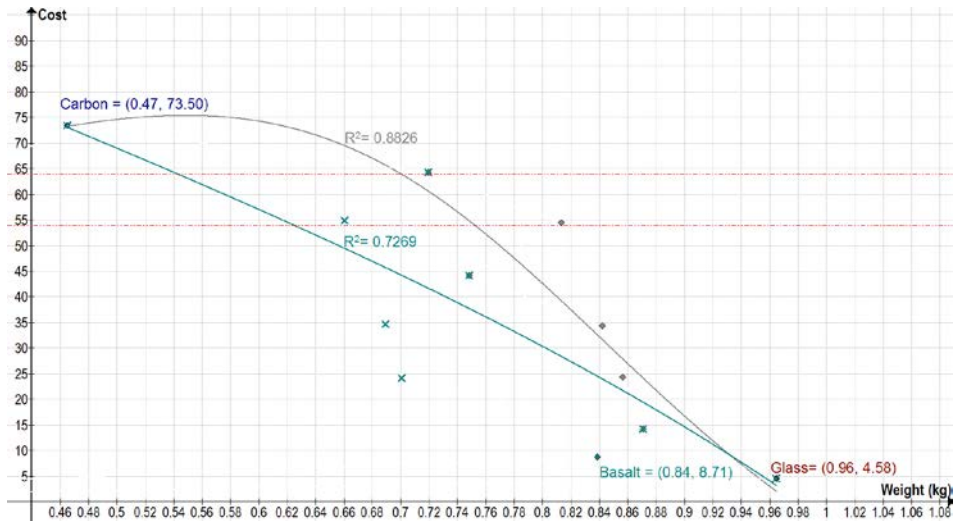
Aşağıda, Şekil 4.3'de cam ve karbon fiberler ile takviyelenmiş melez yapılar için, ağırlık ve maliyetin aynı anda gözetilmesi neticesinde elde edilmiş optimum sonuçlar görülmektedir. Bu sonuçlar, Pareto cephesinin bulunduğu maliyet aralığının ([4, 74]) yedi parçaya ([4, 14], [14, 24], [24, 34], [34, 44], [44, 54], [54, 64], [64,74]) bölünmesi ve eşitlik (3.33) ile tanımlanan yeterlilik ölçütün bu yedi maliyet aralığının her birinde ayrı minimizasyon eniyilemelerinin yapılması ile elde edilmiştir.

Şekil 4.3' de görülen gri tondaki eğri, Pareto cephesi kesikli olduğundan, Pareto optimal bölge sınırlarının tahayyülünü kolaylaştırması niyetiyle (görselleştirme amaçlı), rasyonel polinom eğri uydurma (rational polynomial curve fitting) yöntemi esasına göre çizdirilmiştir.



Şekil 4.3. Cam ve karbon fiber takviyeli hibrit milin optimum sonuçları

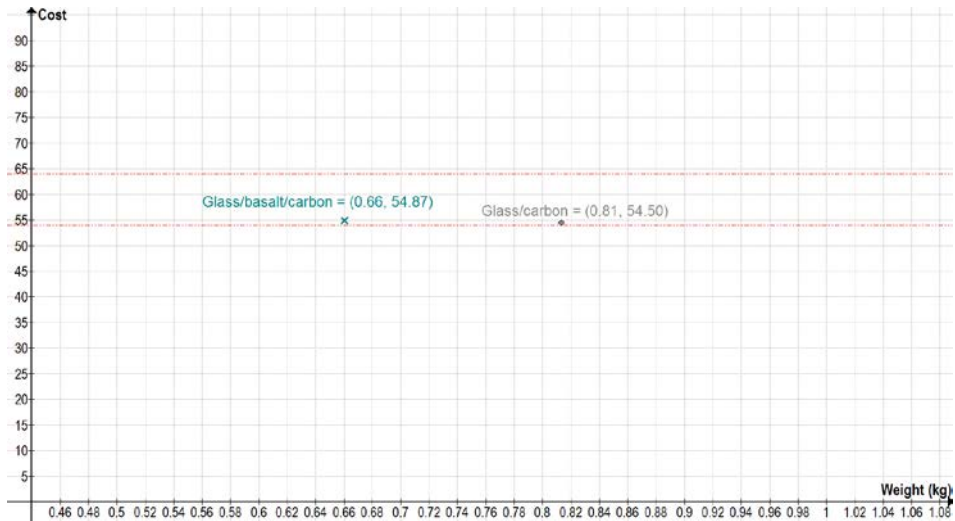
Şekil 4.4'de cam, bazalt ve karbon olacak şekilde üç tip fiberin PSO döngüsü içinde kullanımına izin verilmesi ile elde edilen çok amaçlı optimizasyon sonuçları (yeşil) görülmektedir.



Şekil 4.4. Cam, bazalt ve karbon fiber takviyeli hibrit milin optimum sonuçları

Şekil 4.4'de görülen yeşil renkli eğrinin elde edilmesinde de Şekil 4.3'ün çiziminde kullanılan adımlar eksiksiz takip edilmiştir. Görselleştirme amacı ile çizilen bu eğri veya eğrinin çizdirilmesinde kullanılan sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, optimizasyon döngüsü içine bazalt fiber takviyelerinin de dahil edilmesiyle birlikte Pareto cephesi büyük oranda orijine doğru kaymıştır. Başka bir ifadeyle, minimizasyonda kullanılan PSO algoritmasının bazalt fiberleri de kullanmasına izin vermek, algoritmaya seçim esnekliği sağlamış ve sonuç olarak, cam/bazalt/karbon melezi için elde edilen optimum sonuçlar, cam/karbon melezi için elde edilen sonuçları domine etmiştir.

Aşağıdaki tablolarda, karşılaştırma maksatlı, 54-64 birim maliyet aralığında cam/karbon ve cam/bazalt/karbon melezleri için elde edilen optimum parçacık vektörleri, bu vektörlerin çözümlenmesi ile elde edilen açısal istif düzenleri ve iki ayrı melez kardan mili için elde edilen optimum sonuçlar verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.5'te maliyetin asgari ve azami olarak 54-64 birim olarak kısıtlandığı çok amaçlı eniyileme çalışmasında, cam/karbon ve cam/bazalt/karbon melezlerinin sonuçları görülmektedir. Şekilde görülen kırmızı kesikli yatay doğrular, algoritmanın aramasına izin verilen çözüm uzayının alt ve üst maliyet sınırlarıdır. Algoritmanın en iyi çözümleri bu sınırlar içinde araması sağlanmıştır.



Şekil 4.5. İkili ve üçlü melezlerin 54-64 birim maliyet aralığında karşılaştırılması

Tablo 4.7' de, 54 ve 64 birim maliyet aralığında cam/karbon melez sistemi için yapılan eniyileme çalışmalarında elde edilen optimum parçacığa ait çözüm vektörü görülmektedir.

Tablo 4.7. Cam/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacık vektörü

11	2	0	2	0	0	2	m ₇	m ₈	m ₉	m ₁₀	m ₁₁	m ₁₂	m ₁₃	m ₁₄	m ₁₅	m ₁₆	m ₁₇	m ₁₈
11	20.0	85.8	85.4	20.0	87.5	63.6	θ ₇	θ ₈	θ ₉	θ ₁₀	θ ₁₁	θ ₁₂	θ ₁₃	θ ₁₄	θ ₁₅	θ ₁₆	θ ₁₇	θ ₁₈

Cam/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacığın açısal istif düzeni: [20.0, 85.8, 85.4, 20.0, 87.5, 63.6, 87.5, 20.0, 85.4, 85.8, 20.0] şeklinde olacaktır. Tablo 4.8' de bu parçacık için hesaplanan değerler görülmektedir.

Tablo 4.8. Cam/karbon melezi için elde edilen en iyi değerler

k₁	11
T_{current}	700.6
Tb_{current}	896.5
Fn_{current}	6843.0
W_{current}	0.81
C_{current}	54.501
fitness	54.508

Tablo 4.9' da, 54 ve 64 birim maliyet aralığında cam/bazalt/karbon melez sistemi için yapılan eniyileme çalışmalarında elde edilen optimum parçacığa ait çözüm vektörü görülmektedir.

Tablo 4.9. Cam/bazalt/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacık vektörü

9	0	1	2	2	2	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉	m ₁₀	m ₁₁	m ₁₂	m ₁₃	m ₁₄	m ₁₅	m ₁₆	m ₁₇	m ₁₈
9	89.0	63.9	68.5	21.5	89.0	θ ₆	θ ₇	θ ₈	θ ₉	θ ₁₀	θ ₁₁	θ ₁₂	θ ₁₃	θ ₁₄	θ ₁₅	θ ₁₆	θ ₁₇	θ ₁₈

Cam/bazalt/karbon melezi için optimum sonucu veren parçacığın açısal istif düzeni: [89.0, 63.9, 68.5, 21.5, 89.0, 21.5, 68.5, 63.9, 89.0] şeklinde olacaktır. Tablo 4.10' da bu parçacık için hesaplanan değerler görülmektedir.

Tablo 4.10. Cam/bazalt/karbon melezi için elde edilen en iyi değerler

k₁	11
T_{current}	640.3
Tb_{current}	539.2
Fn_{current}	6721.0
W_{current}	0.66
C_{current}	54.865
fitness	54.869

4.2. Değerlendirmeler

Sonuçlardan görülebileceği gibi kardan mili üretiminde melez yapıdaki karma sistemlerinin kullanımı maliyet ve ağırlığı aynı anda eniyileme imkânı sunması bakımından tasarımcıya fazladan esneklik sağlamaktadır. Ayrıca, melez sistem içine bazalt/epoksi gibi ağırlık ve maliyet açısından E-cam/epoksi ve karbon/epoksi arasında kalacak bir malzeme sisteminin dâhil edilmesi eniyileme sonuçlarını daha da geliştirmektedir.

Yukarıdaki verilerde (Tablo 4.7-4.10) de görüldüğü gibi cam/karbon melez yapısına bazalt takviyelerin ilavesinin çok amaçlı eniyileme sonuçlarını geliştirdiği, daha hafif ve az maliyetli çözümler olarak tanıdığı ortadadır. Yine de, Şekil 4.3 ve 4.4 karşılaştırılması ile bu durumun her zaman geçerli olmayabileceği göz ardı edilmemelidir. Çünkü bu şekillerde bazı çözüm noktaların çakıştığı dolayısıyla eniyilemede bir gelişimin olmadığı görülmektedir.

Çalışmada, kesikli ve sürekli karar değişkenlerinin bir arada bulunduğu ve geleneksel gradyan temelli optimizasyon yöntemleri ile çözülemeyecek bir problem olarak kompozit kardan mili tasarımı ele alınmıştır. Sürekli fiber destekli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri temel alınarak, kardan mili gereksinimleri matematiksel olarak ortaya konulmuş ve üstsezgisel bir eniyileme algoritması türü olan PSO kullanımıyla problemin optimal çözümlerine ulaşılmıştır. Kullanılan algoritmanın problemin çözümü için oldukça hızlı sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca yeni bir kardan mili tasarımı yapılacağı zaman, yalnızca kısıtların değiştirilmesi yeni problemin çözümü için yeterli olacaktır. Matematiksel eniyileme yöntemlerinin, geleneksel mühendislik malzemelerine kıyasla daha karmaşık olan kompozit yapı tasarımı problemleri için, deneme-yanılma yöntemine göre daha etkin ve verimli olduğu açıktır.

Ayrıca, problem, üretim yöntemi olarak seçilen elyaf sarma tekniğinin işleyiş ve kısıtlarına uygun olacak şekilde ifade edilmiştir. Böylece birçok avantajının bulunmasının yanında Türkiye için stratejik öneme sahip olan elyaf sarma tekniğiyle üretilebilecek yapısal elemanların eniyilemesinin etkin bir şekilde yapılabileceği görülmüştür. Dahası, kardan mili görece basit bir geometriye sahiptir ve işlevsel kısıtlar matematiksel olarak kolayca ifade edilebilmektedir. Buna karşın, elyaf sarma yöntemi ile üretilebilecek daha kompleks geometrilerin ve matematiksel olarak kolayca çözümüne ulaşılamayan (ör: parçalı diferansiyel eşitlikler) işlevlerin de bulunduğu aşıkardır.

Bu gibi daha karmaşık birçok problemde, eniyileme döngüsünde yalnızca parçacık yeterliliğini tayin eden kısmın uygun bir alternatif (ör: sonlu elemanlar metodu) ile değiştirilmesi karmaşık geometri ve işlev ile alakalı sorunları ortadan kaldıracak ve PSO optimizasyon sürecini, elyaf sarma ile üretilen birçok son ürün için mümkün hale getirecektir.

Ayrıca çalışmada, üretim sürecinin son ürün üzerindeki etkileri göz ardı edilmiştir. Yani üretim sürecinin ideal olduğu varsayılmıştır. Örneğin, elyaf sarma ile yapılan üretimlerde, ön gerilme kaynaklı fiber hasarları olabilmektedir. Dolayısıyla, hasarlanan fiberlerin mekanik özellikleri üstsezgisel algoritmaya ön tanımlanmış değerlerden daha kötü olacaktır. Bu bakımdan tez çalışması, bazı önemli üretim süreci parametrelerinin son ürün üzerindeki etkilerini de hesaba katacak, mümkün olduğunca gerçekçi bir şekilde üretim yöntemine özelleşmiş algoritmaların geliştirilmesi yönünde evrilmeye açıktır.

KAYNAKÇA

- [1] T. Austin, "Towards a digital infrastructure for engineering materials data," *Mater. Discov.*, pp. 1–12, 2016.
- [2] M. F. Ashby, *Material selection in mechanical design 4th edition*, vol. 4th editio. 2011.
- [3] W. D. Callister, *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Interactive E . Text*. 2001.
- [4] D. R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*. 1996.
- [5] A. Introduction, "Engineering Materials 2," *Engineering*, p. 352, 2006.
- [6] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd editio. Taylor and Francis Group, 2006.
- [7] C. T. Herakovich, *Mechanics of Fibrous Composites*. 1997.
- [8] M. Esmaily, N. Mortazavi, J. E. Svensson, M. Halvarsson, M. Wessén, L. G. Johansson, and A. E. W. Jarfors, "A new semi-solid casting technique for fabricating SiC-reinforced Mg alloys matrix composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 94, pp. 176–189, 2016.
- [9] S. N. Alam and L. Kumar, "Mechanical properties of aluminium based metal matrix composites reinforced with graphite nanoplatelets," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 667, pp. 16–32, 2016.
- [10] U. Santhosh, J. Ahmad, G. Ojard, R. Miller, and Y. Gowayed, "Deformation and damage modeling of ceramic matrix composites under multiaxial stresses," *Compos. Part B Eng.*, vol. 90, pp. 97–106, 2016.
- [11] Y. Deng, W. Li, R. Wang, J. Shao, P. Geng, and J. Ma, "The temperature-dependent fracture models for fiber-reinforced ceramic matrix composites," *Compos. Struct.*, vol. 140, pp. 534–539, 2016.
- [12] L. Longbiao, "Comparison of cyclic fatigue behavior between C/SiC and SiC/SiC ceramic-matrix composites at elevated temperatures using hysteresis dissipated energy," *Compos. Struct.*, vol. 150, pp. 41–52, 2016.
- [13] A. L. Leanos and P. Prabhakar, "Experimental investigation of thermal shock effects on carbon – carbon composites," *Compos. Struct.*, vol. 132, pp. 372–383, 2015.
- [14] J. Yin, X. Xiong, H. Zhang, and B. Huang, "Microstructure and ablation performances of dual-matrix carbon / carbon composites," vol. 44, pp. 1690–1694, 2006.

- [15] G. Yue, X. Hong-yu, J. Zeng-rong, and X. Zhi-xiang, "Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of Rhenium Coating in Iridium / Rhenium / Carbon-Carbon Composites," *Procedia Eng.*, vol. 99, pp. 1407–1414, 2015.
- [16] J. Bai, *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*, vol. 1. 2013.
- [17] B. Pukanszky, "Influence of interface interaction on the ultimate tensile properties of polymer composites," *Composites*, vol. 21, no. 3, pp. 255–262, 1990.
- [18] J. Moczo and B. Pukanszky, "Polymer micro and nanocomposites: Structure, interactions, properties," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 14, no. 5, pp. 535–563, 2008.
- [19] K. K. Chawla, *Fibrous Materials*, 1st editio. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1998.
- [20] K. K. Chawla, *Composite Materials*, 3rd editio. New York, NY: Springer New York, 2012.
- [21] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites : materials, manufacturing and design*, 3rd ed. Taylor and Francis Group, 2007.
- [22] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, and P. V Braun, *Nanocomposite Science and Technology*. 2003.
- [23] B. Wetzal, F. Hauptert, and M. Q. Zhang, "Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 14, pp. 2055–2067, 2003.
- [24] A. Petras, "Design of Sandwich Structures," Cambridge University, 1998.
- [25] P. Morgan, *Carbon fibers and their composites*. Taylor and Francis Group, 2005.
- [26] P. Morgan, *Carbon Fibers and Their Composites*, vol. 210. 2015.
- [27] S. Das, J. Warren, D. West, S. M. Schexnayder, S. Das, J. Warren, D. West, and S. M. Schexnayder, "Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis," no. May, 2016.
- [28] Z. E. L. Konu, "TÜRK KOMPOZİT SEKTÖRÜ 2015 YILI DEĞERLENDİRMESİ VE 2016 YILI BEKLENTİLERİ," *Compos. Turkey*, no. 12, pp. 38–40, 2016.
- [29] D. Gay, S. V Hoa, and S. W. Tsai, *Composite Materials Design and Applications*. 2003.
- [30] D. H. Cho and D. G. Lee, "Manufacture of one-piece Automotive Drive Shafts With Aluminum and Composite Materials," *Compos. Struct.*, vol. 38, no. 1-4, pp. 309–319, 1997.

- [31] M. A. K. Chowdhuri and R. A. Hossain, "Design analysis of an automotive composite drive shaft," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 45–48, 2010.
- [32] P. Technologies and L. Modeling, *COMPOSITE FILAMENT WINDING*. ASM International, 2011.
- [33] M. R. Khoshravan, A. Paykani, and A. Akbarzadeh, "Design and Modal Analysis of Composite Drive Shaft for," vol. 3, no. April, pp. 2543–2549, 2011.
- [34] T. K. V. and K. A. Rangaswamy, T, S. Vijayarangan, R.A. Chandrashekar, "Optimal design and analysis of automotive composite drive shaft," *Int. Symp. Res. Students Mater. Sci. Eng.*, no. December, 2002.
- [35] S. G. Advani and E. M. Sozer, *Process modeling in composites manufacturing*, 1st editio. Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [36] S. Pandita, M. Irfan, V. Machavaram, N. Shotton-Gale, R. Mahendran, C. Wait, M. Paget, D. Harris, C. Leek, and G. Fernando, "Clean wet-filament winding - Part 1: design concept and simulations," *J. Compos. Mater.*, vol. 47, no. 3, pp. 379–390, 2012.
- [37] R. Stewart, "Filament winding spins light, strong composite structures with precision," *Reinf. Plast.*, vol. 53, no. 5, pp. 34–39, Jun. 2009.
- [38] D. Cohen, "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 12, pp. 1035–1047, 1997.
- [39] Robert E. Newnham, *Properties of Materials Anisotropy, Symmetry, Structure*, 1st editio. Oxford university press, 2005.
- [40] Z. Gürdal, R. T. Haftka, and P. Hajela, *Design and optimization of laminates composite materials*, 1 st editi. John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [41] Z. Gürdal, R. T. Haftka, and P. Hajela, *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*, 1 st editi. John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [42] "Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading." ASTM International, 2011.
- [43] A. R. Abu Talib, A. Ali, M. A. Badie, N. Azida Che Lah, and A. F. Golestaneh, "Developing a hybrid, carbon/glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 514–521, 2010.
- [44] M. A. Badie, E. Mahdi, and A. M. S. Hamouda, "An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft," *Mater. Des.*, vol. 32, no. 3, pp. 1485–1500, 2011.

- [45] A. R. M. Rao and P. P. Shyju, "Development of a hybrid meta-heuristic algorithm for combinatorial optimisation and its application for optimal design of laminated composite cylindrical skirt," *Comput. Struct.*, vol. 86, no. 7–8, pp. 796–815, 2008.
- [46] İ. Kahraman, A. T. Seyhan, and H. Yapıcıoğlu, "Bilim v e Teknoloji," *Bilim ve Teknol. Derg. A-Uygulamalı Bilim. ve Mühendislik*, vol. 14, no. 2, pp. 183–190, 2013.
- [47] E. Talbi, *Metaheuristics: From design to implementation*, vol. 2009. John Wiley & Sons, 2009.



ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : İlhan KAHRAMAN
Yabancı Dil : İngilizce
Doğum Yeri ve Yılı : Razgrad / 18.06.1986
E-Posta : ilhankahraman@anadolu.edu.tr

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2013, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

Yayınları ve Bilimsel Faaliyetleri:

- Durukan, O., Kahraman, İ., Parlevliet, P., Geistbeck, M., Seyhan, A.T. (2016). Microfluidization, time-effective and solvent free processing of nanoparticle containing thermosetting matrix resin suspensions for producing composites with enhanced thermal properties. European Polymer Journal, 85, 575-587.
- Meier, R., Kahraman, İ., Seyhan, A.T., Zarembo, S., Drechsler, K. (2016). Evaluating vibration assisted vacuum infusion processing of hexagonal boron nitride sheet modified carbon fabric /epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and void content. Composites Science and Technology, 128, 94-103.
- Kahraman, İ., Seyhan, A.T., Yapıcıoğlu H. (2013). Tek eksenli basınç altında bükülme davranışı gösteren kompozit silindirlerin tasarımı ve optimizasyonu. Bilim ve Teknoloji Dergisi A - Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik, 14 (2), 183-190.