

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

**ELYAF SARMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KARBON ELYAF
KOMPOZİTLERDE ÖN GERİLME PARAMETRELERİNİN
ELYAF VE KOMPOZİT MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

Garip GENÇ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
MAKİNE EĞİTİMİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihat AKKUŞ**

İSTANBUL 2008

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

**ELYAF SARMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KARBON ELYAF
KOMPOZİTLERDE ÖN GERİLME PARAMETRELERİNİN
ELYAF VE KOMPOZİT MUKAVEMETİNE ETKİSİ**

Garip GENÇ
(141201720040177)

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
MAKİNE EĞİTİMİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihat AKKUŞ**

İSTANBUL 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, Elyaf Sarma Teknolojisi (Filament Winding) ile üretimde kullanılan sürekli karbon elyafların (CF) mekanik özelliklerinin üretim parametrelerinden nasıl etkilendiği üzerine deneysel ve teorik sonuçlar sunulmuştur.

Bu çalışmanın yürütülmesinde finansal desteği olan Marmara Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi'ne (BAPKO) ve deneylerde kullanılan sarf malzemelerden reçinenin tamamını karşılayan BOYTEK Reçine Boya ve Kimya Sanayi Ticaret A.Ş. yetkililerine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın jürisinde yer alan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa KURT ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Halil DEMİRER'e bütün yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her ayrıntısında sonsuz bir ilgi ve destek ile yanımda olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nihat AKKUŞ'a teşekkür ederim.

Hayatımın bütün önemli aşamalarında yanımda olan, bana olan güvenini her zaman ifade eden, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatih YALÇIN'a teşekkür ederim.

Temmuz, 2008

Garip GENÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>SAYFA NO</u>
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
YENİLİK BEYANI	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ VE AMAÇ	1
I.1. GİRİŞ	1
I.2. ÇALIŞMANIN AMACI	4
I.3. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ	5
I.4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI	6
BÖLÜM II ELYAF SARMA TEKNOLOJİSİ VE SÜREKLİ	
KARBON ELYAFLAR	8
II.1. ELYAF SARMA TEKNOLOJİSİNİN TANIMI	8
II.1.1. Islak Elyaf Sarma Yöntemi	9
II.1.2. Kuru Elyaf Sarma Yöntemi.....	9
II.1.3. Elyaf Sarma Teknolojisinin Kullanım Alanları	9
II.1.3.1. Genel Kullanım Alanları	9
II.1.3.2. Endüstriyel Özel Uygulamaları	10
II.1.3.3. Sportif Uygulamaları	10
II.1.3.4. Uzay Sanayi Uygulamaları.....	10
II.2. SÜREKLİ KARBON ELYAFLAR	11
II.2.1. Sürekli Karbon Elyaf ve Üretimi	11
II.2.2. Sürekli Karbon Elyafın Mekanik Özellikleri	15

II.2.3. Karbon Elyafların Kullanım Alanları.....	17
II.2.3.1. Uçak Sanayindeki Uygulamalar	17
II.2.3.2. Uzay Sanayindeki Uygulamalar	17
II.2.3.3. İnşaat Mühendisliğindeki Uygulamalar.....	18
II.2.3.4. Otomotiv Sanayi ve Raylı Sistem Taşımacılığındaki Uygulamalar	19
II.2.3.5. Sportif Malzemelerdeki Uygulamalar	19
II.2.3.6. Diğer Uygulamalar	20
II.3. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ	20
II.3.1. E_x 'in Belirlenmesi	21
II.3.2. E_y 'nin Belirlenmesi	24
II.3.3. ν_{xy} 'nin Belirlenmesi	28
II.3.4. G_{xy} 'nin Belirlenmesi	29
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	32
III.1. DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI VE İMALATI	32
III.1.1. Elyaf Sarım Düzeneği ve Bölümleri	33
III.1.2. Elyaf Sarım Düzeneğinin Kalibrasyonu	38
III.2. SARIM İŞLEMİNİN VE KARBON ELYAFLARIN MEKANİK TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	40
III.2.1. Kuru Elyaf Sarma Yöntemi ile Sarılmış Sürekli Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Hazırlanması	43
III.2.2. Kuru Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	44
III.2.3. Islak Elyaf Sarma Yöntemi ile Sarılmış Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyaf Kompozit Çekme Numunelerinin Hazırlanması.....	45
III.2.4. Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyaf Kompozit Çekme Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	48
III.3. ÇEKME DENEYLERİNİN YAPILMASI.....	50
III.3.1. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Deneyleri	52
III.3.2. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Kompozit Numunelerin Çekme Deneyleri.....	55
III.3.3. Alüminyum Makara ile Karbon Elyaf Arasındaki Dinamik Sürtünme	

Katsayısının Teorik ve Deneysel Hesaplanması.....	58
BÖLÜM IV ELYAF SARMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ	67
IV.1. VERİLERİN TOPLANMASI VE DÜZENLENMESİ.....	67
IV.1.1. Verilerin İncelenmesi.....	68
BÖLÜM V SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	74
V.1. DENEYLERİN SAYISAL SONUÇLARI.....	74
V.1.1. Kuru Elyaf Sarma Yönteminde Kullanılan Sürekli Karbon Elyafta Hasar Tespiti	75
V.1.2. Islak Elyaf Sarma Yönteminde Kullanılan Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyafta Hasar Tespiti.....	76
V.2. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR.....	79
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ	

ABSTRACT

THE EFFECT OF PRETENSION PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE OBTAINED BY FILAMENT WINDING TECHNOLOGY

The change of mechanical properties of continuous carbon fiber during manufacturing process of carbon fiber reinforced composites in filament winding machines are investigated theoretically and experimentally in the present study.

The prediction of the mechanical properties of the carbon is very important especially to make the right Carbon Fiber Reinforced Composite (CFRP) part designs. Pretensioners which are an important part of manufacturing process to produce composite mechanical parts in filament winding should be well adjusted during the manufacturing process. Pretension systems in winding systems consist of several moveable aluminum rollers and a torque controlled motor, so that the tension in the continuous fiber can be adjusted easily. Carbon fibers are very sensitive to the bending forces since they are very brittle. The angle between the roller and the amount of the torque applied to the fiber defines the magnitude of the bending stresses on the fiber. As the angle between the rollers decrease, the fiber undergoes more bending stresses which causes an increase in fiber breakage on the fiber bundle. A PI controlled experimental system has been designed and manufactured to simulate the pretensioning in the filament winding machine.

Experimental results indicate that the tensile strength of continuous carbon fiber is reduced by 10 – 43 %. Also, a formulation based on the statistics of the experiments has been proposed to predict the strength reduction of the carbon fibers during pretensioning in the filament winding manufacturing process.

July, 2008

Garip GENÇ

YENİLİK BEYANI

ELYAF SARMA YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN KARBON ELYAF KOMPOZİTLERDE ÖN GERİLME PARAMETRELERİNİN ELYAF VE KOMPOZİT MUKAVEMETİNE ETKİSİ

Bu çalışmada Elyaf Sarma Teknolojisi (Filament Winding) ile üretilen endüstriyel FRP kompozitlerde üretimden sonra ortaya çıkan ürünün mekanik özelliklerindeki değişimin nedenleri teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınç tüpleri ve basınçlı gazların taşınmasında kullanılan boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu tüplerde aranan en önemli özellikler yüksek basınca karşı dayanım ve hafifliktir. Bundan dolayı bu tüplerin tasarımı ve üretimi çok hassas yapılmaktadır. Bu tür elyaf sarma yöntemi ile yapılan ürünler, kimyasal çevre koşullarından mukavemet testlerine kadar genel olarak devletler tarafından belirlenen testlerden geçmektedir. Bu testlerden olumlu sonuç almanın tek yolu ise çok detaylı bir tasarım ve modellemedir.

Özellikle sürekli karbon elyafın (CF) kullanıldığı elyaf sarma teknolojisi ile imalatta dayanım kaybına uğrayan elyafın kayıp miktarının öngörülebilmesi hem imalat açısından hem de endüstriyel tasarım açısından büyük kolaylık getirecektir.

Bugüne kadar elyaf ve reçine katılaştırıldıktan sonra ortaya çıkan kompozitin mukavemeti üzerine yoğun çalışmalar vardır.

Ancak elyaf sarma işleminin en önemli üretim parametresi olan ön gerilme parametresinin, kullanılan sürekli karbon elyafın mukavemetine etkisinin araştırıldığı bir çalışma yoktur.

Bu çalışmada;

1. Elyaf sarma işleminde kullanılan sürekli karbon elyafların üretim parametrelerinden kaynaklanan çekme mukavemeti değerlerindeki kayıp miktarı

deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, sürekli karbon elyafın çekme mukavemetinin % 10 – 43 arasında azaldığı tespit edilmiştir.

2. Elyaf sarma makinelerinde kullanılan ön gerilme ünitesinde bulunan makaralar ile kullanılan sürekli karbon elyaf arasında ortaya çıkan sürtünme modellenmiş ve buna bağlı olarak dinamik sürtünme katsayısı $\mu_d=0,417$ (S.S. $\pm 0,003$) olarak llmřtir.

3. Üretim parametrelerinin üretilen ürünün mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi ve tasarım aşamasında, elyaf sarma işleminde üretim parametrelerine bağlı olarak karbon elyafların çekme mukavemetindeki azalmanın tahmini için istatistiksel bir model önerilmiştir.

Temmuz, 2008

Doç. Dr. Nihat AKKUŞ

Garip GENÇ

SEMBOLLER

E_x	:	x Yönündeki Elastiklik Modülü
E_y	:	y Yönündeki Elastiklik Modülü
E_f	:	Elyaf Elastiklik Modülü
E_m	:	Matris Elastiklik Modülü
ν_{xy}	:	x ve y Yönündeki Poisson oranı
G_{xy}	:	x ve y Kesme Modülü
ϵ_x	:	x Yönündeki Yüzde Uzama
ϵ_y	:	y Yönündeki Yüzde Uzama
σ_x	:	x Yönündeki Gerilmeler
σ_y	:	y Yönündeki Gerilmeler
σ_f	:	Elyaf Gerilmeleri
σ_m	:	Matris Gerilmeleri
ΔL	:	Numune Uzunluğundaki Değişim
L	:	Numune Uzunluğu
A	:	Numunenin Kesit Alanı
A_f	:	Elyaf Numunenin Kesit Alanı
A_m	:	Matris Numunenin Kesit Alanı
V_f	:	Elyaf Hacim Oranı
V_m	:	Matris Hacim Oranı
k_f	:	Elyaf Yay Katsayısı
k_m	:	Matris Yay Katsayısı
μ	:	Sürtünme Katsayısı
ρ_c	:	Kompozit Yoğunluğu
ρ_m	:	Matris Yoğunluğu
ρ_f	:	Elyaf Yoğunluğu

KISALTMALAR

- FRP** : Fiber Reinforced Polimer
CFRP : Carbon Fiber Reinforced Polimer
FW : Filament Winding (Elyaf Sarma Teknolojisi)
PID : Proportional Integral Derivative

ŞEKİLLER

SAYFA NO

Şekil II.1. Elyaf Sarma Makinesi	9
Şekil II.2. Sürekli Karbon Elyaf	11
Şekil II.3. Karbon Elyafın Mikroskopik Fotoğrafi	12
Şekil II.4. PAN ve PITCH Tabanlı Karbon Elyaf Üretiminin İşlem Basamakları....	12
Şekil II.5. Poliakrilik Oluşumu.....	13
Şekil II.6. Oksidasyon İşlemi	13
Şekil II.7. Karbonizasyon İşlemi	14
Şekil II.8. Karbon Elyafın Yapısı	14
Şekil II.9. Boeing 787 Uçağının Üretiminde Kullanılan Malzeme Oranları.....	17
Şekil II.10. Basınç Tüpü.....	18
Şekil II.11. Karbon Elyafların İnşaat Uygulamaları.....	18
Şekil II.12. Karbon Elyafların Otomotiv ve Raylı Sistem Uygulamaları.....	19
Şekil II.13. Karbon Elyafların Spor Amaçlı Kullanılan Ürünlerdeki Uygulamaları.	20
Şekil II.14. x Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi	20
Şekil II.15. Elyaf Hacim Oranına Bağlı E_x 'in Değişimi	22
Şekil II.16. Bir Elyaf Takviyeli Levhada Yük Paylaşımı.....	23
Şekil II.17. E_x 'in Tahmini Değerlerine Karşılık Ölçülmüş Değerler	23
Şekil II.18. y Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi	24
Şekil II.19. Elyaf Hacim Oranı ile E_y 'nin Değişimi	26
Şekil II.20. Elyaf Takviyeli Plakada Deformasyon Paylaşımı	26
Şekil II.21. E_y 'nin Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerleri.....	27
Şekil II.22. x Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi	28
Şekil II.23. v_{xy} 'nin Elyaf Hacim Oranına Bağlı Değişimi	29
Şekil II.24. Yüklenmiş Hacim Elemanı.....	30
Şekil II.25. Elyaf Hacim Oranı ile G_{xy} 'nin Değişimi	31
Şekil III.1. Elyaf Sarım Düzeneği	34
Şekil III.1.a. Manyetik Fren Ünitesi	34

Şekil III.2. PI Kontrollü Manyetik Fren Sistemi Kapalı Çevrim Blok Diyagramı ...	35
Şekil III.3. PI Kontrollü Ön Gerilme Sistemi Çalışma Genel Akış Şeması.....	35
Şekil III.4. Manyetik Fren Ünitesinde Kullanılan Elemanlar	36
Şekil III.1.b. Ön Gerilme Ünitesi.....	37
Şekil III.1.c. Servo Motor Ünitesi	38
Şekil III.5. Elyaf Sarım Düzeneginin Kalibrasyonu	39
Şekil III.6. Sarım Esnasında Ön Gerilme Yükünün Sapma Aralığı.....	40
Şekil III.7. Farklı Şartların Elde Edilmesi İçin Değiştirilen Sarım Parametreleri.....	41
Şekil III.8. Ön Gerilme Ünitesinin Şematik Gösterimi	42
Şekil III.9. Kuru Elyaf Çekme Numuneleri	43
Şekil III.10. Reçine Emdirme İşlemi.....	45
Şekil III.11. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Kompozit.....	46
Şekil III.12. Ecocell Laboratuvar Kurutma Fırını Kullanılarak Karbon Elyafların Kurutma İşlemi.....	47
Şekil III.13. Kurutma İşlemi Sonucu Elde Edilen Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numuneleri.....	47
Şekil III.14. Çekme Deneyi İçin Hazırlanmış Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numuneleri.....	48
Şekil III.15. Instron 4411 Test Makinesi	51
Şekil III.16. Çekme Deneyleri Sonucunda Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Kopma Şekilleri	53
Şekil III.17. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Hatalı Kopma Şekilleri	53
Şekil III.18. Çekme Deneyleri Sonucunda Kompozit Elyaf Numunelerin Kopma Şekilleri	56
Şekil III.19. Ön Gerilme Sisteminde Bulunan Makara ile Karbon Elyaf Arasındaki Sürtünmenin Modellenmesi	59
Şekil III.20. Serbest Çizim Diyagramı	60
Şekil III.21. Elyaf Sarma Sisteminin Şematik Gösterimi.....	62
Şekil III.22. KYOWA-UCAM 21 Ölçüm Sistemi Kullanılarak Çekme Kuvvetinin Ölçümü.....	63
Şekil III.23. Elyaf İle Makara Arasındaki Sürtünmenin Belirlenmesinde Ölçülen Parametreler	63
Şekil III.24. Karbon Elyaf ile Alüminyum Makara Arasındaki Dinamik Sürtünmenin PI Kontrollü Sistem ile Ölçümü.....	65

Şekil IV.1. Sarım Parametreleri.....	67
Şekil IV.2. $F=24,52$ N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvvetine (P) Bağlı Serpilme Diyagramı.....	69
Şekil IV.3. $F=19,62$ N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı.....	69
Şekil IV.4. $F=2.5$ $F=19,62$ N ve $F=24.52$ N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı.....	70
Şekil IV.5. Şekil IV.5. Sarım Açısı (θ) ve Ön Gerilme Kuvvetine (F) Bağlı Çekme Kuvveti (P) Yüzey Denklemi.....	73
Şekil V.1. Elektron Mikroskop ile Çekilmiş (x 700) Hasarsız Karbon Elyafların Bir Demetinde Bulunan Lifler.....	77
Şekil V.2. Elektron Mikroskop ile Çekilmiş (x 350) Sarım İşlemlerine Tabi Tutulmuş Karbon Elyafların Bir Demetinde Bulunan Lifler.....	78
Şekil V.3. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Gerilmeleri.....	79
Şekil V.4. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Gerilmeleri.....	80

TABLolar

SAYFA NO

Tablo II.1. Sıcaklık Değişimine Bağlı Karbon Elyaf Sınıfları.....	15
Tablo II.2. Karbon Elyaf ve Çeliğin Mekanik Değerlerinin Karşılaştırılması.....	16
Tablo II.3. Standart Modüllü Karbon Elyafın Mekanik Özellikleri.....	16
Tablo II.4. E_y/E_m Değerleri için Değişken E_f/E_m ve V_f Değerleri.....	25
Tablo III.1. Manyetik Fren Ünitesinde Kullanılan Elemanların Teknik Özellikleri	36
Tablo III.2. Sarım İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Koşullar	43
Tablo III.3. Kuru Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Mekanik Özellikleri	44
Tablo III.4. Kullanılan Reçinenin Özellikleri.....	45
Tablo III.5. Ecocell Laboratuvar Kurutma Fırını Teknik Özellikleri.....	46
Tablo III.6. Pattex Süper Japon Yapıştırıcı Teknik Özellikleri	48
Tablo III.7. Kompozit Malzemenin Yapımında Kullanılan Reçine ve Karbon Elyafın Mekanik Özellikleri	49
Tablo III.8. Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	50
Tablo III.9. İnstron 4411 Test Makinesi Teknik Özellikleri	51
Tablo III.10. Sarım İşlemine Tabi Tutulmayan Kuru Karbon Elyafın (T700SC– 12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları.....	52
Tablo III.11. Sarım İşlemden Sonra Elde Edilen Kuru Karbon Elyafın (T700SC– 12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları.....	54
Tablo III.12. Sarım İşlemine Tabi Tutulmayan Reçine Emdirilmiş Karbon Elyafın (T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları.....	55
Tablo III.13. Sarım İşlemden Sonra Elde Edilen Reçine Emdirilmiş Karbon Elyafın (T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları	57
Tablo III.14. Ölçümü Yapılan Parametre Değerlerine Bağlı Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	65
Tablo IV.1. Kestirim Değerleri	68
Tablo IV.2. Parametrelerin Tahmin Değerleri	71
Tablo IV.3. Spearman Korelasyon Katsayısı Kullanılarak Ön Gerilme Kuvveti (F) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	72

Tablo IV.4. Spearman Korelasyon Katsayısına Göre Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	73
Tablo V.1. Kuru Karbon Elyaf Malzemelerin Sarım Koşullarına Bağlı Olarak Çekme Gerilmeleri	75
Tablo V.2. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Malzemelerin Sarım Koşullarına Bağlı Olarak Çekme Gerilmeleri	76

BÖLÜM I

GİRİŞ VE AMAÇ

I.1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde tasarımdan beklenen özellikler artık yeni boyutlar kazanmıştır. Bunlar estetiklik, ekonomiklik, dayanıklılık gibi kriterlerdir. Fakat bazı durumlarda bunlar da yetmemekte, bazı tasarımlarda hafiflik, kolay montaj ve korozyona karşı dayanım daha öncelikli olmaktadır. Metallerle kıyaslandığında FRP kompozitlerin hafiflik, yüksek çekme mukavemeti, korozyona karşı dayanımı gibi üstün özellikleri bulunmaktadır. Bu nedenle FRP (Elyaf Takviyeli Polimer-Fiber Reinforced Polimer) kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamaları uzay ve havacılık endüstrisi başta olmak üzere her geçen gün artmaktadır. Özel uygulamalardan bahsedilirse; spor araç – gereçleri (yelkenli gövdesi, yarış arabaları gövdesi gibi.), yüksek basınçlı kompozit tüpler, büyük çaplı endüstriyel borular, uzay araçlarının yakıt tankları gibi örnekler verilebilir. Yukarıdaki örnekler dikkatle incelendiğinde görülmektedir ki; tüm bu uygulamalar için kullanılan malzemelerde dayanımın ağırlığa oranının yüksek olması arzu edilir. Malzemelerin performansı olarak da bilinen bu oran (dayanım / ağırlık) elyaf malzeme için çelik malzemeye göre 18 kat daha fazladır. Bu da elyaf takviyeli malzemelerin endüstriyel önemini arttırmaktadır. Kompozit sanayinde, elyaf sarma uygulamaları geliştirilmek istenen, çok tercih edilen ve etkili bir metottur. Çünkü FRP Kompozitlerden başlıca dayanıklı ürünler üretmek bu metotla mümkündür. Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınçlı tüpler ve boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle yeni nesil araçlarda kullanılan hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu metot uzun sayılabilecek bir süredir kullanılmasına rağmen, uygulama parametrelerinin etkinliği kısa bir süredir araştırılmaktadır. Buradan hareketle çalışmamızda üzerinde duracağımız nokta; endüstriyel öneme sahip olan

bu ürünlerin üretiminde karşılaşılan mukavemet değerlerindeki değişimin nedenlerini ortaya koymak ve çözüm önerileri sunmaktır.

Bu çalışmayla ilgili olarak geçmiş çalışmalara bakıldığında özellikle elyaf sarma yöntemi ile yapılan üretim parametrelerinin bilgisayar destekli kontrolü veya robot destekli kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca elyaf sarma işlemi ile üretilen ürünlerin (bunların başında basınç tüpleri gelmektedir) üretimden sonra kazandıkları özelliklerin belirlenmesi üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Bu noktadan hareketle literatür incelemesi yapıldığında konuyla ilgili olabilecek bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Breen ve arkadaşları [1], 24 mm kalınlığında karbon elyaf takviyeli polimer tabakalar tasarlamışlardır. Sivil uçak kanatları için tasarlanmış olan bu tabakaların darbe testlerini de gerçekleştirmişlerdir.

Changliang ve arkadaşları [2], elyaf sarma teknolojisi ile üretilmiş silindirik elemanların iç basınçlı ve iç basınçsız malzemelerde darbeden kaynaklanan hasarın incelenmesi için sonlu elemanlar metodu çalışmışlardır.

Krishnamurthy ve arkadaşları [3], kompozit malzemelerden üretilmiş silindirik kabukların darbeye karşı gösterdiği dayanımı hem klasik Fourier serileri ile hem de sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir.

Akkuş ve Genç [4], Ankastre kompozit (FRP) kirişte, farklı bir sarım tekniği uygulayarak kiriş boyunca ortaya çıkan gerilmelerin ve birim şekil değişikliğinin kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada reçine katkılı elyaf kompozit kullanılarak, farklı sarım sayılarına sahip bir kiriş dizaynı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bir ucundan ankastre edilmiş kirişin diğer ucuna uygulanan yük karşısında kiriş boyunca gerilmelerin sabit kaldığını gözlemlemişlerdir.

Akkuş ve arkadaşları [5], reçine katkılı elyaf malzemelerin örülmesi üzerine çalışmış ve bu örgü yöntemi ile elde ettikleri kirişin düğümleri üzerinde gerçekleşen şekil değiştirmeler üzerinde çalışmışlardır.

Akkuş ve Kawahara [6], ince kompozit boruların boğumlarını elyaf malzemelerle güçlendirip düğüm davranışlarını ve mukavemetlerini incelemişlerdir.

Mertiny ve Ellyin [7], cam elyaf katkılı kompozitlerde sarım esnasında oluşan gerilmelerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde çalışmışlardır.

Banerjee ve arkadaşları [8], elyaf sarma işlemi esnasında elyaf davranışının modellenmesi üzerinde deneysel olarak çalışmışlardır. Bu modelde sıcaklık, elyaf üzerinde oluşan gerilmeler ve şekil değiştirmeler, sarım hızı gibi faktörlerin etkisi

incelenmiştir. Ayrıca kompozitteki elyaf reçine oranının da parametreler üzerinde oluşturduğu etki de açıklanmaya çalışılmıştır.

Kaynak ve arkadaşları [9], farklı sarım açıları altında, farklı elyaflar ve farklı reçineler kullanılarak gerçekleştirilen sarım işlemlerinin test edilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu testler sonucunda elde ettikleri ürünlerin mukavemet değerlerinin ve elastiklik modüllerinin değişimini incelemişlerdir.

Zhao ve arkadaşları [10], farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemlerinde elyaf reçine oranının hesaplanması için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir model oluşturmaya çalışmışlardır. Bu model ile kompozitin mekanik özelliklerini viskozite ve reçineye bağlı olarak açıklamaya çalışmışlardır.

Cohen [11], elyaf sarma esnasında kullanılan gerilmeyi açıklamak için deney metodu olarak (DOE) yi kullanmıştır ve elyaf sarma işlemi sırasında kullanılan gerilmenin, mekanik parça özelliklerinin sonuçlarını etkileyen en önemli parametre olduğunu bulmuştur.

Cohen ve arkadaşlarının [12], daha sonraki yayınlarında deneysel olarak ele alınan konu ise, sarım işlemi esnasındaki çekme gerilmesinin operatör tarafından kontrolü yerine elyaf hacim oranının elyafın içerisine reçine katılmasıyla çeşitlendirilebilir olmasıdır.

Ayrıca Hurez ve arkadaşları [13], elyaf katkılı polimer kırıların, birleşme noktalarını ve eğimli örülmüş kırıların gerilme-şekil değiştirme ve katılık formülasyonu üzerine çalışmışlardır.

Migliaresi ve arkadaşları [14], karbon elyaf kompozit kullanarak sabitleyici üretimi üzerine çalışmışlardır. Farklı sarım açılarına sahip sabitleyicilerin çeşitli koşullar altında gösterdikleri performansı incelemiş ve ürettikleri bu sabitleyicinin diğer metalik sabitleyiciler arasındaki farkları da ortaya koymuşlardır.

Koussios ve arkadaşları [15], elyaf sarma işleminde karşılaşılan giriş parametrelerinin problemlerinin kinematik çözümü için bir metot önermişlerdir. Bu metodu sarım açısı ile ilgili parametrelere bağlı bir formül olarak önermişlerdir. Ayrıca sarım esnasında bu formüle bağlı olarak çalışan bir algoritma ile karşılaşılan problemlerin çözümü için bir teknik önermişlerdir.

Rousseau ve arkadaşları [16], elyaf sarma yöntemi ile farklı açılarda sarım işlemi yapılarak üretilen silindirik tüplerin çeşitli yükler karşısında gösterdikleri mekanik performanslarının incelenmesi üzerine çalışmışlardır. Tüplerin hasara

uğratılması yoluyla performanslarının ölçümünü yapmış ve gerçekleşen hasarın sarım açısı ile arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Kim ve arkadaşları [17], iç basınca sahip elemanların elyaf sarma yöntemi ile üretilmesinde karşılaşılan problemlerin önüne geçmek için bir algoritma üzerinde çalışmışlardır. Bu algoritmayı elyafın sarım esnasındaki geodezik yörünge yolu ile mandren arasındaki ilişki üzerine kurmuşlardır. Ayrıca sarım esnasında iç basınca sahip elemanların davranışlarının tahmini için sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır.

Kabir [18], elyaf sarma yöntemi ile elyaf takviye edilmiş metalik kaplamalı basınç tüplerinin sayısal analizi üzerine çalışmıştır. Ayrıca elyaf sarım teknolojisi ile üretilmiş tüplerin kubbe bölümlerinde farklı kalınlıkların ortaya çıkmasını engellemek için iki (2D) ve (3D) boyutlu bir model önermiştir.

Park ve arkadaşları [19], elyaf sarım teknolojisi ile üretilen ürünlerde farklı kalınlıkların ortaya çıkmasının önüne geçebilmek için yeni bir algoritma üzerine çalışmışlardır. Bu algoritmaya göre sarım esnasında elyafın geodezik yörüngesi helisel olarak düzenlenmiştir. Ayrıca elyaf sarma işlemi boyunca ürün üzerindeki kalınlık dağılımının kontrolünü sağlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır.

Literatür incelemesi yapıldığında görülmüştür ki; çalışmaların büyük bir bölümü elyaf sarım teknolojisi ile üretilen ürünlerde, ürün üzerinde ortaya çıkan problemlerin önüne geçmek ve de bu ürünlerin performansını arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak emsal çalışmalar uygulama parametrelerinin etkilerini içermezler. Elyaf sarma teknolojisi ile üretilen ürünlerde, sarım işleminden kaynaklanan mukavemet kaybı olup olmadığı üzerine yapılmış herhangi bir çalışma yoktur.

Bu çalışmada, elyaf sarma işlemi esnasında kullanılan sürekli karbon elyafın çekme mukavemetinin % 10 – 43 arasında azaldığı belirlenmiştir.

I.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada sürekli elyaf sarma teknolojisi ile imal edilen endüstriyel FRP kompozitlerde sarım işleminden sonra ortaya çıkan mukavemet değerlerindeki azalmanın nedenleri araştırılmıştır. Özellikle sürekli elyafın kullanıldığı elyaf sarma yöntemi ile imalatta mukavemet kaybına uğrayan elyafın kayıp miktarının

öngörülebilmesi önemli bir imalat parametresidir. Bu mukavemet değerlerindeki azalmanın en önemli nedenleri ön gerilme sisteminden geçen kuru elyafın makara sistemi ile temas yüzeyleri arasında gerçekleşen sürtünme ve eğilme kuvvetleridir. Bu parametrelerin teorik ve deneysel olarak incelenerek mukavemet kaybının öngörülür hale getirilmesi endüstriyel tasarım açısından büyük kolaylık getirecektir. Bugüne kadar elyaf ve reçine katılaştırıldıktan sonra ortaya çıkan kompozitin mukavemeti üzerine yoğun çalışmalar vardır. Ancak bir düzenek arcılığıyla ön gerilmeye tabi tutulan kuru elyafın çekme mukavemeti değerlerindeki düşüş ile ilgili yapılmış bir çalışma yoktur.

I.3. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

Kompozit malzemeler, mukavemetlerinin yoğunluklarına bölünmesi sonucu bulunan performans katsayıları incelendiğinde standart çeliklere göre çok yüksek performansa erişebilmeleri nedeniyle endüstride önemli kullanım alanlarına sahiptirler. Kompozit malzemelerin yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalarının en önemli nedeni kullanılan elyaf ve birleştirici olarak kullanılan reçinedir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin en önemli kullanım alanları uzay sanayi, uçak sanayi ve basınç tüplerinin kullanıldığı endüstriler gibi insan hayatında çok büyük bir öneme sahip alanlardır. Kompozit malzemeler genellikle üretilecek ürünün mukavemetinin artırılması amacıyla takviye elemanı olarak kullanılır. Bu nedenle üretilen ürünün sahip olacağı mekanik özellikler elyafın sahip olduğu mekanik özelliklere bağlıdır. Bu aşamada, kullanılan elyafın mekanik özellikleri son derece önem kazanmaktadır. Kullanılan elyafın mekanik özelliklerinin üretim öncesi ve sonrası nasıl etkilendiğinin de bilinmesi üretilen ürünün hassasiyeti açısından hayati önem taşımaktadır.

Kompozit malzemelerin en önemli üretim yöntemlerinden bir tanesi elyaf sarma işlemidir. Elyaf sarma işleminde üretime etki eden birden çok parametre vardır. En önemli parametrelerden birisi sarım esnasında elyaf üzerinde bulunması gereken ön gerilme kuvvetidir. Bu ön gerilme kuvveti, ön gerilme ünitesinde oluşturulur. Böylece sarım esnasında kullanılan elyaf arasında oluşması muhtemel boşluklar önlenmiş olmaktadır. Ancak sarım işlemi boyunca ön gerilme yükünün kontrolü önemli bir parametredir. Ön gerilme yükünün kontrol edilememesi durumunda elyafların ürün üzerindeki gerginlikleri eşit olmayacak veya kırılğan bir

yapıya sahip olan karbon elyaf kopacaktır. Sarım esnasında bu gibi istenmeyen durumların engellenebilmesi için son yıllarda önemli adımlar atılmıştır. Bu adımların en önemli örneklerinden bir tanesi, elyaf sarma işlemi için bilgisayar kontrollü elyaf sarma makinelerinin kullanılmaya başlanmasıdır.

Üretim parametrelerinin karbon elyaf mukavemetini nasıl etkilediğinin tasarım aşamasında bilinmesi önemli bir tasarım ve üretim parametresi olarak kabul edilmekte ve bu nedenle büyük bir öneme sahip olmaktadır. Çünkü üretim parametrelerinden kaynaklanan mukavemet kaybı üretilen ürünün de mukavemet kaybına neden olmaktadır. Üretim parametrelerinden kaynaklanan mukavemet kaybının engellenmesi veya en aza indirgenmesi ürün dayanımı açısından büyük bir önem kazanacaktır.

Bu çalışmada, elyaf sarma teknolojisinde kullanılan sürekli karbon elyafın sarım esnasında ön gerilme yükünden kaynaklanan mukavemet kaybının ölçülebilmesi için bir ön gerilme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan sürekli karbon elyafın farklı sarım koşulları altında yaklaşık olarak % 10 ile % 43 arasında mukavemet kaybına uğradığı görülmüştür.

Bu çalışmayla, elyaf sarma teknolojisi ile üretilen ürünlerde üretim parametrelerinin neden olduğu mukavemet kaybı tespit edilmiş ve önemli bir imalat parametresi belirlenmiştir.

Ayrıca üretim parametrelerinin, kullanılan elyafın çekme mukavemetine etkisinin belirlenmesi ve tasarım aşamasında yardımcı olabilmesi için bir istatistiksel model önerilmiştir.

I.4. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Kompozit malzemelerin en önemli üretim yöntemlerinden bir tanesi elyaf sarma işlemidir. Elyaf sarma işleminde birden çok üretim parametresi vardır. En önemli parametrelerden birisi sarım esnasında elyaf üzerinde bulunması gereken ön gerilme kuvvetidir. Bu ön gerilme kuvveti, elyaf sarma makinelerinin ön gerilme ünitelerinde oluşturulur.

Bu çalışmada, elyaf sarma yöntemiyle üretilen FRP kompozitlerde ön gerilme parametrelerinin elyaf ve kompozit mukavemetine etkisi aşağıda verilen kapsama göre incelenmiştir.

Birinci bölümde; yapılan araştırmanın ilgili literatürdeki yeri belirtilerek çalışmanın amacı ve önemi üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde; elyaf sarma teknolojisi tanımlanmış ve elyaf sarma teknolojisinde kullanılan sürekli karbon elyaflar ile gerekli bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde Kompozit mekaniği ile ilgili bilgilerde verilmiştir. Üçüncü bölümde; deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Burada deneylerin yapılabilmesi için gerekli deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı anlatılmıştır. Bu deney düzeneği kullanılarak gerekli deneysel çalışmalar yapılmış ve bu deneysel çalışmaların sonuçları için çekme deneyleri yapılmıştır. Dördüncü bölümde; deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında istatistiksel modelleme yapılmıştır. Bu modelleme sonucunda elyaf sarım işlemi ile üretimi tasarlanan ürünlerin mekanik özellikleri ile ilgili tasarım aşamasında bir ön görüş sağlama amacı ile bir istatistiksel model önerilmiştir. Beşinci bölümde ise; bu çalışmada elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur.

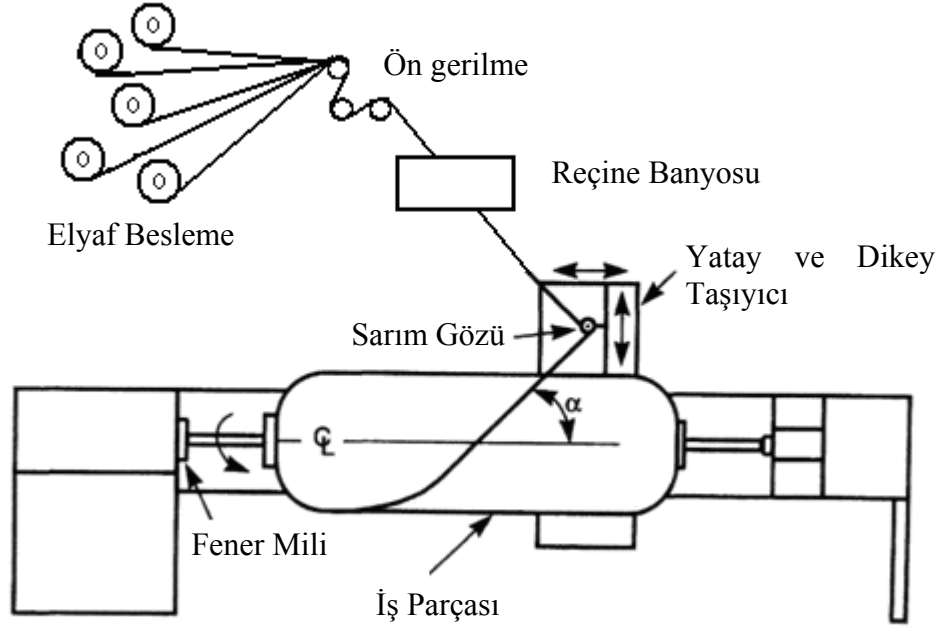
BÖLÜM II

ELYAF SARMA TEKNOLOJİSİ VE SÜREKLİ KARBON ELYAFLAR

II.1. ELYAF SARMA TEKNOLOJİSİNİN TANIMI

Elyaf sarma teknolojisi (FW), elyaf takviyeli ürünlerin üretiminde kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu imalat mühendislik yöntemi, yüksek mukavemete sahip ve hafif kompozit ürünler üretmek için kullanılmaktadır. Elyaf sarma teknolojisinde sürekli elyaf (cam elyaf ve karbon elyaf gibi) malzemeler ve reçine kullanılmaktadır [20].

Elyaf sarma teknolojisi başlıca simetrik ve dairesel ürünlerin üretimi için kullanılır. Bu simetrik ve dairesel ürünlerin üzerine reçine takviyeli elyaf sarma işlemi uygulanması ile mekanik özellikleri çok yüksek ürünler üretmek mümkün olmaktadır. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak elyaf sarma makineleri de büyük bir değişime uğramıştır. Daha önce konvansiyonel tezgâhlarla yapılan elyaf sarma işlemi günümüzde bilgisayar kontrollü yapılmaktadır. Bilgisayar destekli üretimde geodezik sarma yöntemi kullanılmaktadır. Matematiksel olarak geodezik sarma yöntemi iki noktadan geçen en kısa yola eğri uydurma denkleminde dayanmaktadır. Geodezik sarma yöntemi özellikle yüksek basınç tüplerinin üretiminde, sarım işlemi esnasında elyaf sarım yönünün belirlenmesinde çok etkili ve yüksek hassasiyete sahip bir yöntem olmuştur. Ayrıca elyaf sarma işleminin diğer önemli avantajlarından biri ise farklı elyaf malzeme çeşitlerinde de kolaylıkla kullanılabilmesidir.



Şekil II.1. Elyaf Sarma Makinesi [35]

Şekil II.1.'de bir elyaf sarma makinesinin bölümleri görülmektedir.

Elyaf sarma işlemi iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir [21]. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

II.1.1. Islak Elyaf Sarma Yöntemi

Bu elyaf sarma yönteminde elyaf, sarımı gerçekleştirilen iş parçası üzerine sarılmadan hemen önce reçine banyosunda geçirilir ve böylece elyafın reçine emmesi sağlanır [21].

II.1.2. Kuru Elyaf Sarma Yöntemi

Bu elyaf sarma yönteminde, sarım işlemi kuru elyaf kullanılarak gerçekleştirilir. Kuru olarak gerçekleştirilen sarım işleminden sonra ürün reçine banyosuna atılarak reçine emdirme işlemine tabi tutulur [21].

II.1.3. Elyaf Sarma Teknolojisinin Kullanım Alanları

II.1.3.1. Genel Kullanım Alanları

- ◆ Silindirik ve simetrik parça üretiminde,
- ◆ Savunma sanayinde kullanılan topların gövdelerinin üretiminde,

- ◆ Yüksek basınç tüplerinin üretiminde, (Bu tüpler havacılık, uzay ve askeri sistemlerde kullanılmaktadır)
- ◆ Uzay sanayinde yakıt depolarının imalatında,
- ◆ Hidrojen yakıtlı yeni nesil araçlarda yakıt deposu üretiminde,
- ◆ Özellikle yüksek hız ve hareket kabiliyeti gerektiren araçların parçalarının tasarımında,
- ◆ Spor amaçlı kullanılan (yelkenlilerin gövdeleri, bisikletlerin çatıları gibi) araçların üretiminde

II.1.3.2. Endüstriyel Özel Uygulamaları

- ◆ Düşük ve yüksek basınç boruları
- ◆ Su tankları
- ◆ Kimyasal depolama tankları
- ◆ Basınç tüpleri
- ◆ Otomobil şaftları
- ◆ Yapısal kolonlar
- ◆ Protezler

II.1.3.3. Sportif Uygulamaları

- ◆ Golf aletleri,
- ◆ Raketler
- ◆ Okçuluk
- ◆ Ateşli Silah
- ◆ Bisiklet

II.1.3.4. Uzay Sanayi Uygulamaları

- ◆ Roket motor kutuları
- ◆ Füzeler ve fırlatma rampaları
- ◆ Özel yüksek basınçlı CFRP esaslı kompozit tüp ve pervaneler
- ◆ Uçak gövdesi ve kanat bölgeleri
- ◆ Helikopter rotor şaftları ve pervanelerin yassı kısımlarında kullanılmaktadır.

II.2. SÜREKLİ KARBON ELYAFLAR

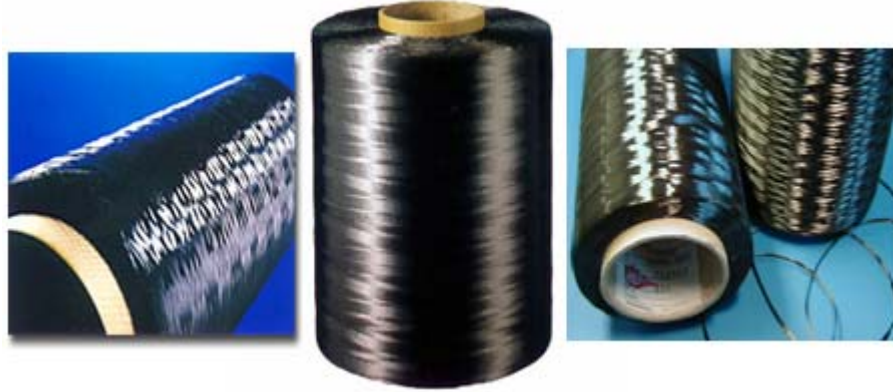
II.2.1. Sürekli Karbon Elyafı ve Üretimi

Karbon elyafı akrilik ve reçineden oluşturulmuş mikro grafit kristal yapıya sahip lifli malzemelerdir.

Karbon elyafı üretim yöntemlerine göre;

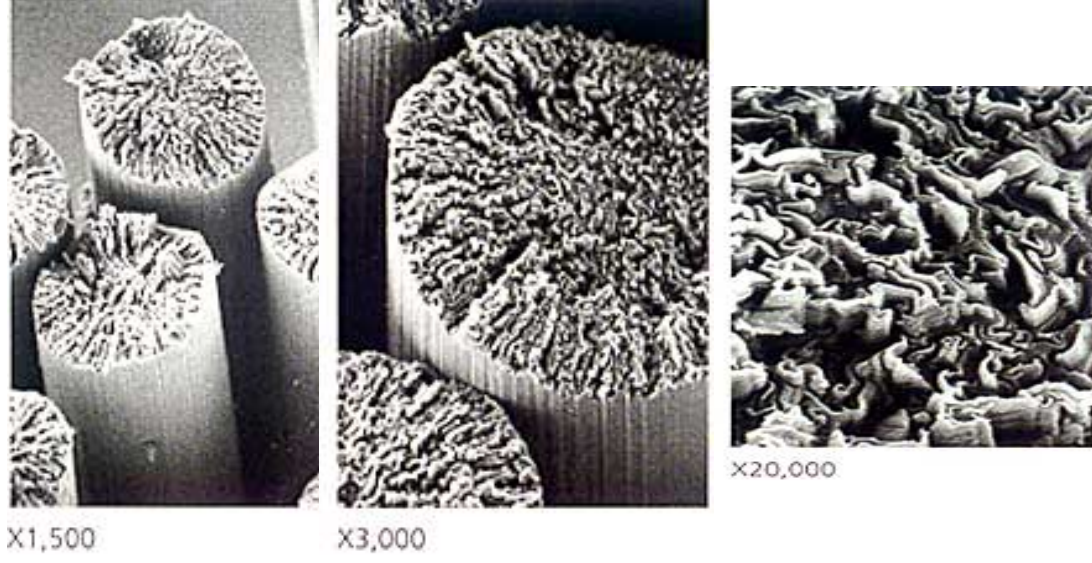
- PAN tabanlı
- PITCH tabanlı
- RAYON tabanlı, olarak üçe ayrılır.

Karbon elyafı üretiminde en yaygın kullanılan başlıca iki ana yöntem PITCH ve PAN tabanlı üretim yöntemleridir. PITCH yöntemi ile üretilen karbon elyafının mukavemet özellikleri PAN tabanlı üretim yöntemi ile elde edilen elyafın mukavemet özelliklerine oranla daha düşüktür. Bu nedenle dayanım istenen uygulamalarda pek tercih edilmezler. PAN tabanlı üretim yöntemi en yaygın kullanılan ve en iyi üretim yöntemidir [22].



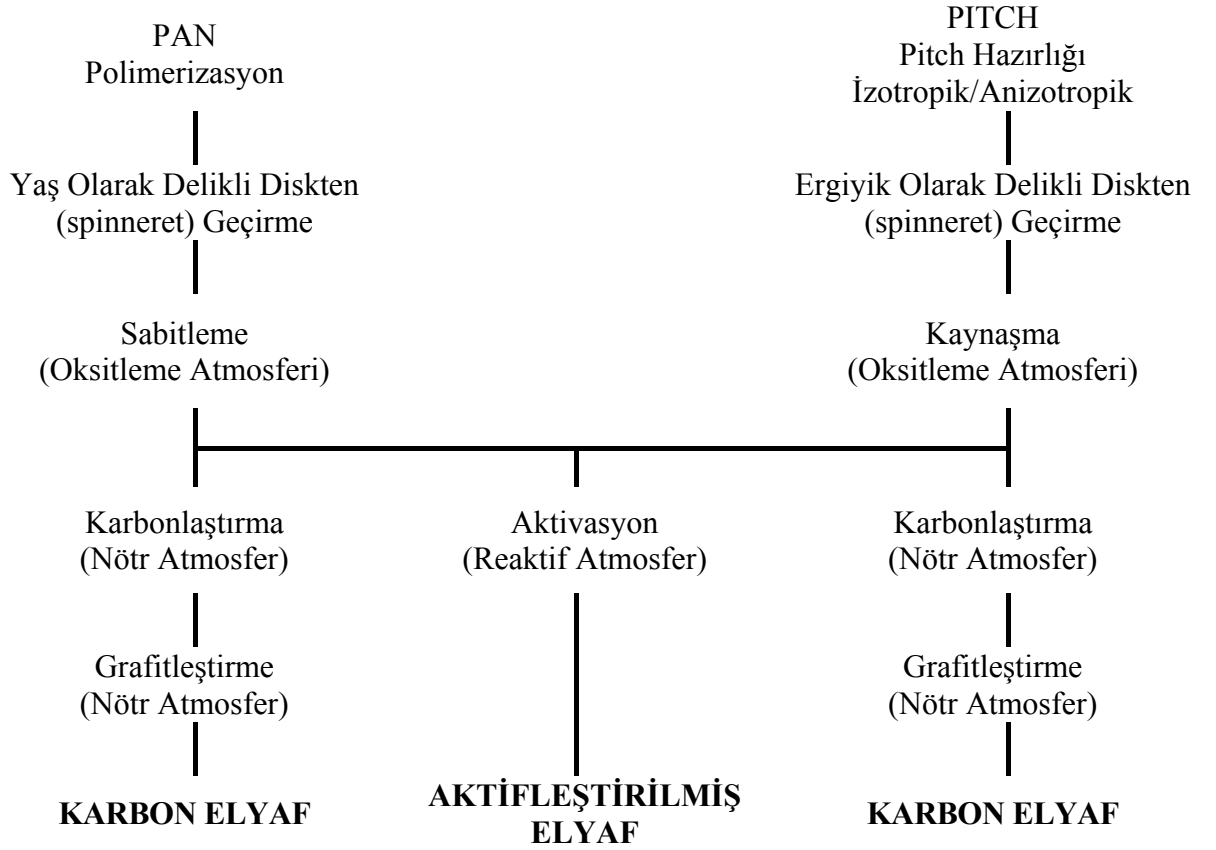
Şekil II.2. Sürekli Karbon Elyafı [23]

Karbon elyafı yaygın olarak çok farklı uygulamalarda üstün mekanik karakteristik (çekme mukavemeti, elastiklik modülü) özelliklerinden ve diğer karakteristik (düşük yoğunluk, düşük ısıl genişleme katsayısı, ısıl direnci, kimyasal kararlılık gibi) özelliklerinden dolayı kullanılmaktadırlar [24].



Şekil II.3. Karbon Elyafın Mikroskopik Fotoğrafi [22]

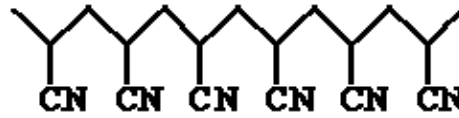
Şekil II.3.'te karbon elyafının mikroskopik fotoğrafı 1.500, 3.000 ve 20.000 kez büyütülmüş olarak görünmektedir.



Şekil II.4. PAN ve PITCH Tabanlı Karbon Elyaf Üretiminin İşlem Basamakları [24]

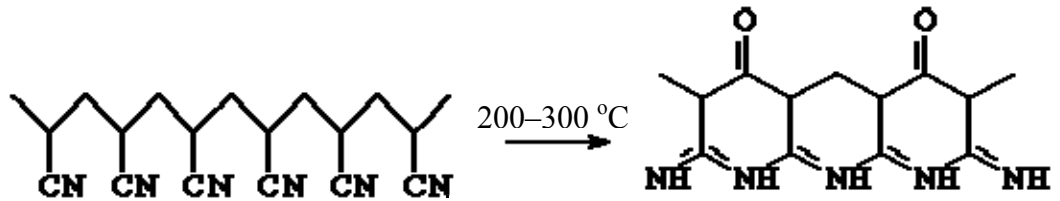
Şekil II.4.'te PAN ve PITCH tabanlı karbon elyaf üretim yöntemlerinin işlem basamakları gösterilmiştir. PAN tabanlı elyaf üretim yöntemi için hammadde “Poliakrilik”dir. Bu madde genel olarak “Sohio” yöntemiyle üretilir. Sohio yönteminde propilen, oksijen, amonyak ve su, karışık metal oksit katalizörü içeren sulandırılmış katman ile beslenir. Küçük miktarlarda su eklenerek akrilik’in seçiciliği artırılır ve reaktörle birlikte sıcaklık düşürülür. Reaktörün sıcaklığı 400°C ila 500°C arasına ayarlanır. Bekleme süresi birkaç saniyedir. Reaktörün basıncı 0.3–2 bar arasında değişir [24].

Sohio üretim yöntemi ile daha az gaz ve daha az su kullanılarak, daha ekonomik bir üretim gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra ürünün özellikleri geliştirilerek hem çevreye daha az zarar veren hem de daha güçlü bir yapıya sahip bir ürün ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bu üretim yöntemi daha ekonomiktir. Ürünün polimerizasyonu sonrasında şekil II.5.’te gösterildiği gibi uzun zincirli bir polimer olan poliakrilik ortaya çıkarılır [25].



Şekil II.5. Poliakrilik Oluşumu [24]

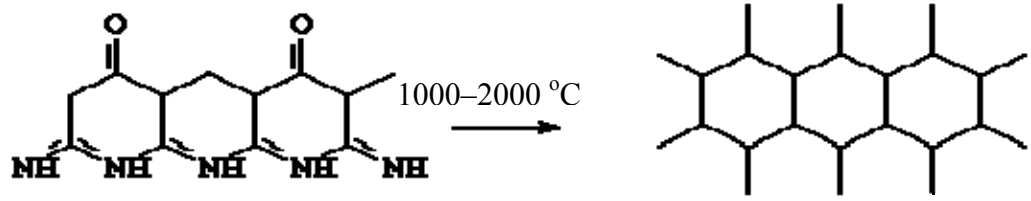
Üretimin birinci aşaması polimeri sıra sıra paralel biçimde dizerek elyafın eksenini oluşturmaktır. Bu aşamadan sonra polimer hava ile temasta olacak şekilde 200-300°C’ de oksidasyona uğrattılır. Bu yöntemle hidrojenler bileşikten uzaklaştırılarak moleküle oksijen emdirilir. Şekil II.6.’da görüldüğü gibi ana altıgen (hexagonal) yapı elde edilir [24].



Şekil II.6. Oksidasyon İşlemi [24]

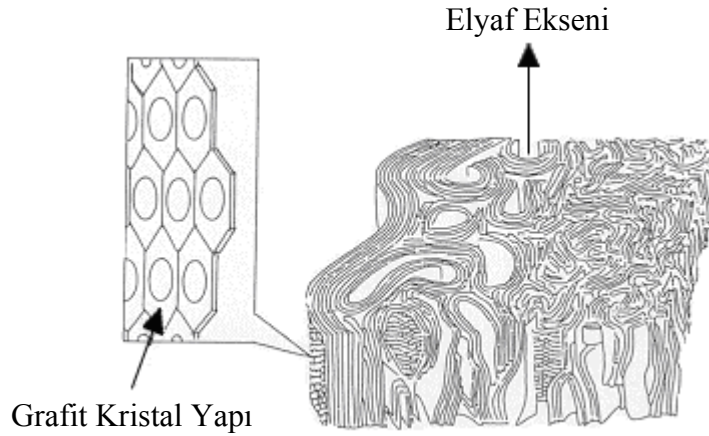
Altıgen yapıya dönüşüm işlemi sırasında bir renk değişikliği gerçekleşir. Beyaz zincirli polimer, siyah zincirli polimere dönüşür. Polimer erime noktasına kadar

kaynatılarak saflaştırılmalıdır. Bunu yapmak için ‘Karbonizasyon’ adı verilen bir işlem kullanılır (Şekil II.7.) [24].



Şekil II.7. Karbonizasyon İşlemi [24]

Bu işlem polimerin nitrojen bakımından zengin bir ortam olan 1000°C - 2500°C aralığında kaynatılarak uçucu (gaza dönüşebilen) ve polimer için zararlı olan maddeleri polimer içinde %92 - %100 karbon kalana kadar uzaklaştırma işlemidir. %92 - %100 aralığı elyaf kalitesi için gerekli olan karbon miktarını gösterir [25].



Şekil II.8. Karbon Elyafın Yapısı [26]

Şekil II.8.’de üretilmiş karbon elyafın yapısı gösterilmiştir. Karbon üretimi, elde edilmek istenilen mekanik özelliklere bağlı olarak planlanmalıdır. Mekanik özellikler üretim detaylarına bağlı olarak değişmektedir. Tablo II.1.’de karbonlaştırma aşamasındaki sıcaklık değişimine bağlı olarak, elde edilen karbon kalitesinin nasıl değiştiğini gösterilmektedir [25].

Tablo II.1. Sıcaklık Değişimine Bağlı Karbon Elyaf Sınıfları [25]

Karbonlaştırma Sıcaklığı (°C)	~ 1000	1000–1500	1500–2000	2000~(Grafitleştirme)
Karbon Elyaf Sınıfı	Düşük Modüllü	Standart Modüllü	Orta Modüllü	Yüksek Modüllü
Elastiklik Modülü (GPa)	~ 200	200–250	250–325	325 ~

Tablo II.1.'de gösterildiği gibi sıcaklık arttıkça %100 karbon saflığına yaklaşıldığı için üretilmiş olan karbon elyafın kalitesi de artmaktadır.

II.2.2. Sürekli Karbon Elyafların Mekanik Özellikleri

Karbon elyaf kompozitlerin sahip oldukları mekanik özelliklerin asıl kaynağı kompozitte kullanılan elyaftır. Karbon elyaf kompozitlerin başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Düşük Yoğunluk
- Hafiflik
- Yüksek Elastiklik Modülü
- Yüksek Çekme Mukavemet
- Korozyona Karşı Direnç
- Düşük Isıl Genleşme Katsayısı
- 3000 °C'nin Üstündeki Sıcaklıklarda Isıl Denge
- Mükemmel Sarım Direnci
- Kimyasal Denge (Özellikle Güçlü Asitlerde)
- Üstün Uyumluluk
- Yüksek Isıl İletkenlik-

Dezavantajları ise:

- İzotropik Olmayışı (Eksene Bağlı Yön)
- Düşük Şekil Değiştirme Özelliği
- Basma Kuvvetlerine Karşı Direncinin Olmaması
- Gaz Olma Eğilimi
- Karbonun Oksidasyonu Esnasında Çevreye Zarar Verir

Tablo II.2. Karbon Elyaf ve Çeliğin Mekanik Değerlerinin Karşılaştırılması [24]

Malzeme	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül Mukavemet (GPa)
Standart Modüllü Karbon Elyaf	3,50	230.0	1,75	2.00
Çelik	1,30	210.0	7,87	0.17

Tablo II.2.'de karbon elyaf ile çelik arasında bir kıyaslama yapılmıştır. Tablo II.2 incelendiği zaman açıkça görülecektir ki çeliğe oranla karbon elyaflar çok daha mukavimdir. Karbon elyafların çekme mukavemetleri çeliğin yaklaşık 3 katı, yoğunluğu yaklaşık 1/5 katı kadar ve özgül mukavemeti de yaklaşık 12 katı kadardır. Bu kıyaslama ile de, son yıllarda karbon elyafların neden araştırmaların ilgi odağı haline geldiği kolaylıkla anlaşılabilir.

Tablo II.3.'te iki tip karbon elyafın üretici firma tarafından verilen katalog değerleri verilmiştir.

Tablo II.3. Standart Modüllü Karbon Elyafın Mekanik Özellikleri [24]

Ürün Kodu	Demetteki Lif Sayısı (Adet)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Uzama (%)	Her Ünite Ağırlık (g/1000m)	Yoğunluk (g/cm ³)
T700SC-12000	12000	4900	230	2,10	800	1,80
T700SC-24000	24000	4900	230	2,10	1600	1,80

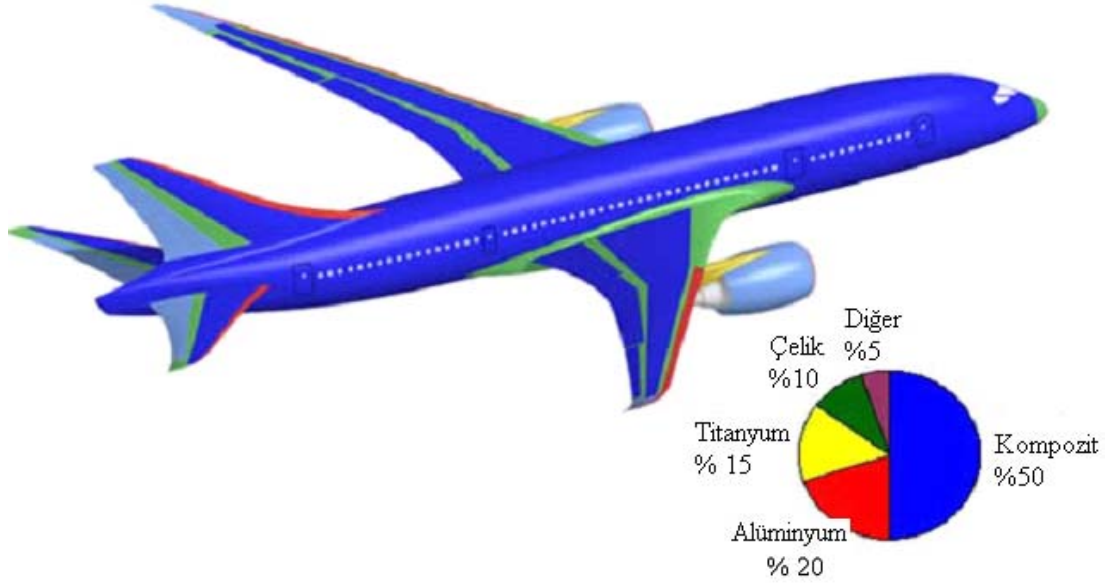
Bu araştırmada ürün kodu T700SC-12000 olan sürekli karbon elyaf kullanılmıştır. Kullanılan bu sürekli karbon elyafının üretici firma tarafından verilen özellikleri tablo II.3.'ten incelendiğinde demette bulunan lif sayısı 12000 adet ve çekme mukavemeti 4900 MPa'dır.

II.2.3. Karbon Elyafların Kullanım Alanları

Elyaflar daha çok tekstil sektöründe kullanılan bir malzeme olarak bilinmelerine rağmen günümüzde yaygın kullanım alanlarına sahiptirler. Karbon elyafların birim fiyatlarının azalmasıyla birlikte kullanım alanları her geçen gün artmaktadır.

II.2.3.1. Uçak Sanayindeki Uygulamalar

1980'li yılların başından itibaren uçak sanayinde elyaf takviyeli malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Karbon elyafların özellikle hafif ve yüksek mukavemete sahip olması uçak sanayinde zaman geçtikçe daha yaygın kullanılmasına neden olmuştur. Şekli II.9.'de Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler ve oranları verilmiştir. Şekil II.9.'den rahatlıkla anlaşılacağı gibi % 50 kullanım oranına sahip olan elyaf takviyeli (karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli malzemeler) kompozit malzemeler büyük bir öneme sahiptir.

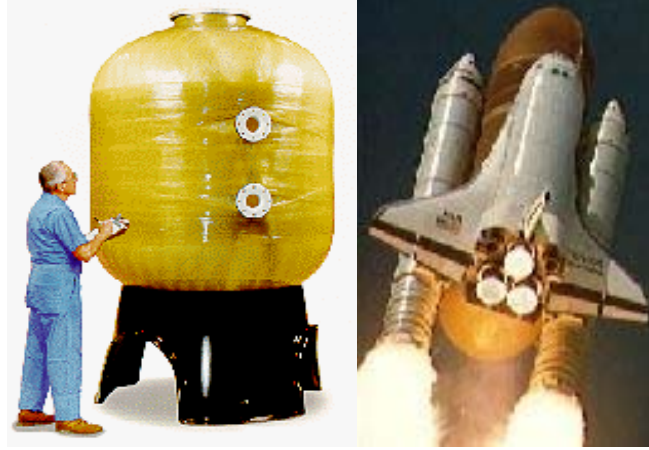


Şekil II.9. Boeing 787 Uçağının Üretiminde Kullanılan Malzeme Oranları [22]

II.2.3.2. Uzay Sanayindeki Uygulamalar

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler uzay sanayinde özellikle uzay araçlarının yakıt depolarının üretiminde kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni karbon elyafların yüksek mukavemet ve hafiflik özelliklerinin olmasıdır. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılarak üretilmiş bir yakıt deposu veya tüp

çok yüksek basınçlara karşı mukavemet gösterebilmektedir. Aynı basınca dayanabilen bir tüpün çelik veya çelik türevi malzemeler kullanılarak üretilmesi halinde üretilen bu tüpün ağırlığı nedeniyle karşılaşılabilecek problemler çok fazladır. Örneğin üretilen bu tip bir tüpün hareket ettirilebilmesi için harcanması gereken enerji çok daha fazla olacaktır.



Şekil II.10. Basınç Tüpü

II.2.3.3. İnşaat Mühendisliğindeki Uygulamalar

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin inşaat sektöründe özellikle güçlendirme ve yalıtım amaçlı iki çeşit kullanım alanı vardır. Bina ve köprü kolonlarında güçlendirme amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca inşaatların zemin ve duvarlarında da hem güçlendirme hem de yalıtım amaçlı kullanılmaktadır. Şekil II.11.'da inşaat mühendisliğindeki uygulamalara ait örnekler gösterilmiştir.



Şekil II.11. Karbon Elyafının İnşaat Uygulamaları [22]

II.2.3.4. Otomotiv Sanayi ve Raylı Sistem Taşımacılığındaki Uygulamalar

Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler otomotiv sanayinde ve raylı sistem taşımacılığında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Karbon elyafların hafif olması ve sahip olduğu yüksek mukavemet özelliği otomotiv sektöründe öneminin artmasına neden olmaktadır. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler özellikle otomobillerin ve trenlerin kaportalarında (şekil II.12.a,b), şaftlarında (şekil II.12.c) ve yeni nesil hidrojen enerjili otomobillerin yakıt depolarının (şekil II.12.d) yapımında kullanılmaktadır.



Şekil II.12. Karbon Elyafların Otomotiv ve Raylı Sistem Uygulamaları [22]

II.2.3.5. Sportif Malzemelerdeki Uygulamalar

Karbon elyaf malzemelerin fiyatlarının düşmesiyle birlikte her geçen gün kullanım alanları artmaktadır. Bunun en güzel örneği spor amaçlı kullanılan malzemelerin yapımında kullanılmalarıdır. Aşağıda karbon elyafların kullanıldığı uygulamalar ile ilgili birkaç örnek verilmiştir.

- Bisikletler
- Kanolar
- Tenis Masaları ve Raketleri
- Golf Sopaları
- Beysbol Sopaları
- Balıkçı Oltaları
- Yatlar ve Yelkenliler
- Bilardo Masaları ve Sopaları
- Kayak Sporunda Kullanılan Kızaklar
- Sörf Tahtaları
- Atıcılıkta Kullanılan Oklar



Şekil II.13. Karbon Elyafın Spor Amaçlı Kullanılan Ürünlerdeki Uygulamaları [22]

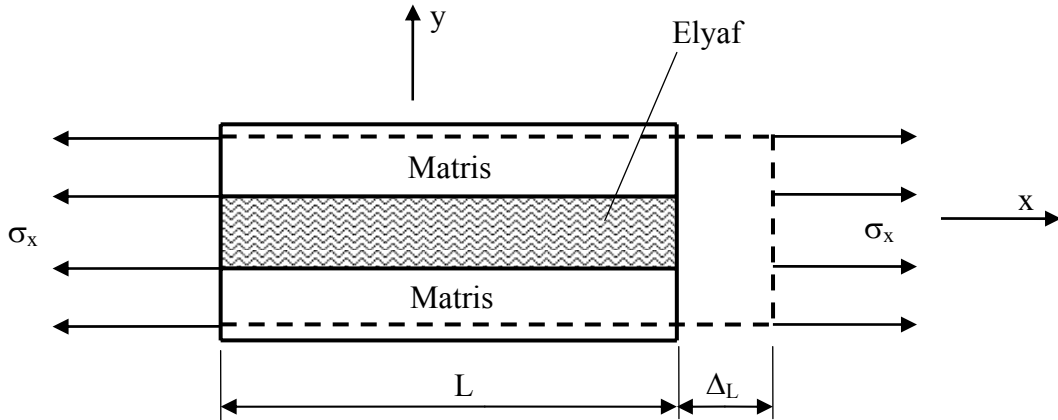
II.2.3.6. Diğer Uygulamalar

Karbon elyaf malzemeler son zamanlarda elektronik, medikal ve enerji alanlarında da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

- Enerji Alanındaki Uygulamalar (Rüzgar Enerjisi İçin Rüzgar Güllü gibi)
- Medikal Alandaki Uygulamalar (Tekerlekli Sandalye, Yapay kol (bacak) Yapay kemik, Kalp sübapları gibi)
- Elektronik Alandaki Uygulamalar

II.3. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİĞİ

Kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını etkili çözebilmek için önemli yaklaşımlardan birisi “Basitleştirme” yaklaşımıdır. En önemli yaklaşım, aksenal elyaftaki birim şekil değiştirme aksenal olmayan kompozitte de aynıdır [27].



Şekil II.14. x Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi [27]

Elyaf ve matris şekil II.14.’te gösterilmektedir. Eğer birim şekil değiştirme aynı olmasaydı, elyaf ile matris arasındaki bir çatlaktan anlaşılırdı. Bu da bu yaklaşımın mantıklı bir açıklamasıdır. Çünkü birim şekil değiştirme matris ve elyafta

aynıdır. Öyleyse açıktır ki x eksenine normal olan (dik olan) bölümler gerilmeye maruz kalmadan önce oldukları gibi düzlem olarak kalırlar.

Yukarıda bahsedilen yaklaşım genel malzeme mekaniğinde kirişte, düzlemde ve kabuk teorilerinde de önemli bir yaklaşımdır.

Bu temele dayanarak çıkarım yapılabilir ki; malzeme mekaniğindeki varsayımlar, ortotropik modüllü tek yönlü elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri başlıca E_x , E_y , ν_{xy} ve G_{xy} 'dir .

Buradan da önemli bir sonuç çıkarılabilir. Bu da; Basitleştirme yaklaşımının temeli olan her varsayım sabittir ve keyfi değildir [27].

II.3.1. E_x 'in Belirlenmesi

Kompozit malzemelerin x yönündeki (bu da elyaf yönüdür) ilk modülünü belirlemek için, şekil II.14.'ten;

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \quad (II.1.)$$

elde edilir.

Burada, ε_x basitleştirme teorisine göre hem elyaf hem de matris için uygulandığında, her iki malzemenin davranışı elastik ise, elyaf eksenindeki gerilme,

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_x \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_x \quad (II.2.)$$

ve matris eksenindeki gerilme şeklinde gerçekleşir. Sunulan elementin gerilmesinin (σ_x) kesit alanına (A) oranı, elyafın gerilmesi ile elyafın kesit alanına oranı ve matrisin gerilmesi ile matrisin kesit alanına oranının ortalamasıdır [27].

$$P = \sigma_x \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (II.3.)$$

Denklem II.2' denklem II.3. te yerine konur ve makro mekanikten hatırlanırsa,

$$\sigma_x = E_x \cdot \varepsilon_x \quad (II.4.)$$

açık olarak,

$$E_x = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (II.5.)$$

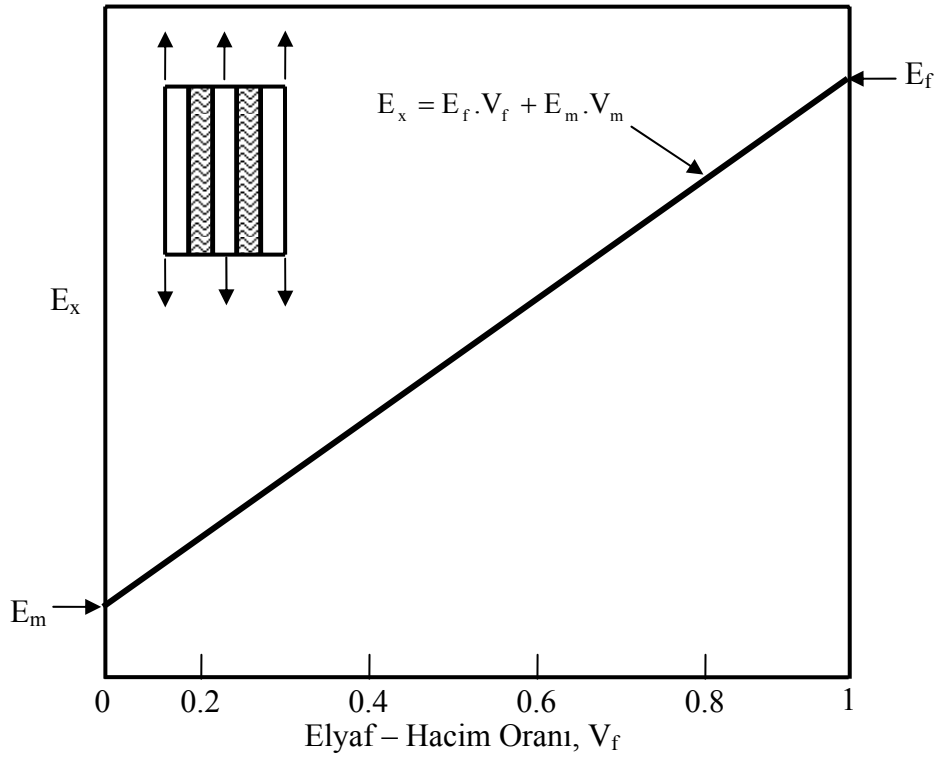
denklemini elde edilir [27].

Fakat elyaf ve matrisin hacim oranları denklem II.6.'daki gibi verilirse;

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad V_m = \frac{A_m}{A} \quad (\text{II.6.})$$

$$E_x = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (\text{II.7.})$$

elde edilir. Denklem II.7. karışımlar kuralı olarak bilinir. Kompozit malzemelerin elyaf yönlerindeki açık Young modülü şekil II.15.'te grafik olarak gösterilmiştir [27].



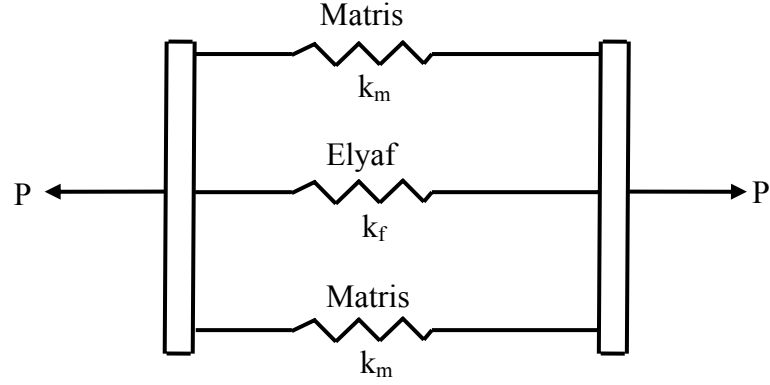
Şekil II.15. Elyaf Hacim Oranına Bağlı E_x 'in Değişimi [27]

Karışımlar kuralı, açık young modülünün E_x 'den E_m ve E_f 'e, V_f olarak 0 dan 1'e basit bir lineer olarak sunulur.

Elyaf modülü tipik olarak çoğu zaman matris modülüdür. Bu nedenle, elyaf baskın kompozit modülü E_x genelde pratik olarak elyaf hacim oranı yaklaşık 0,6 dır.

Elyaf hacim oranının sıfıra eşit olmadığı sürece E_m 'de meydana gelen değişiklikler, büyük olsa bile bunun E_x üzerindeki etkisi azdır. Bu nedenle elyaf baskın özellik açısından E_x 'i daha güvenilir buluyoruz.

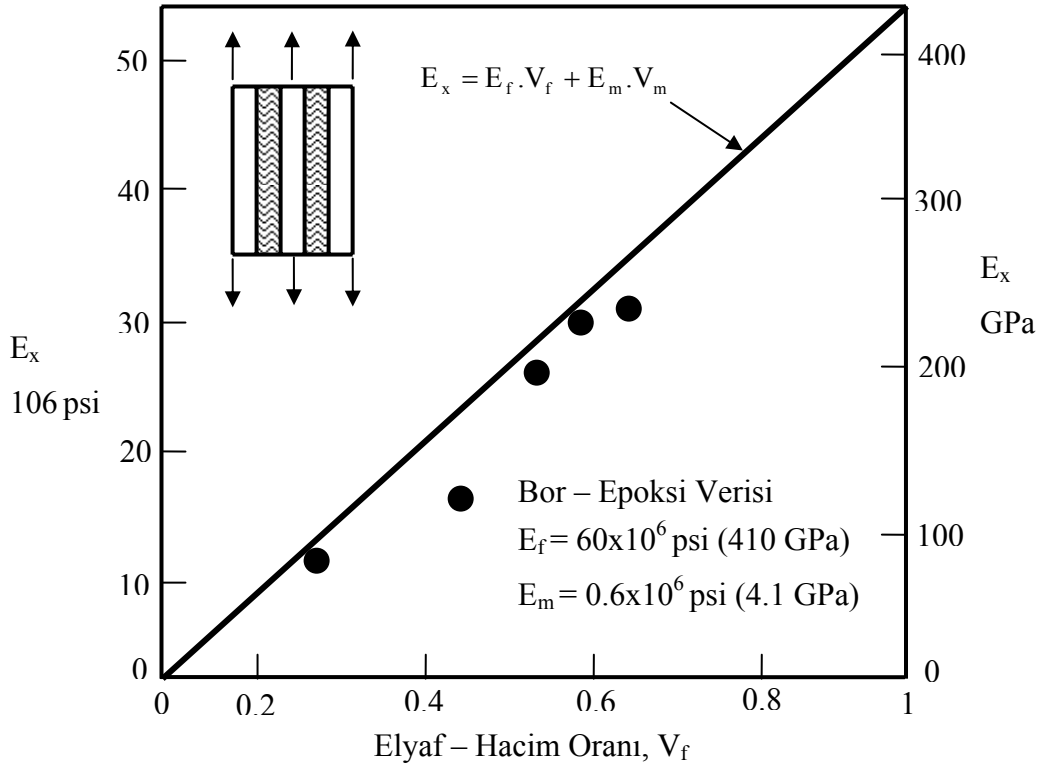
Elyaf ve matris arasındaki yükleme paylaşımı şekil II.16.'da görüldüğü üzere basit yay modeli ve olarak gözlemlenebilir [27].



Şekil II.16. Bir Elyaf Takviyeli Levhada Yük Paylaşımı [27]

Burada tüm yayların aynı miktarda deforme olduğunu ve $k_f \gg k_m$ ve böylece de elyaf yayların uygulamadan daha çok pay aldığını görüyoruz.

E_x için yapılan analizde elde edilen pratik değerleri açıklayabilmek için deney sonuçlarının tahmini değerler ile ilişkisi şekil II.17. de verilen doğru üzerinde karşılaştırılmıştır [27].

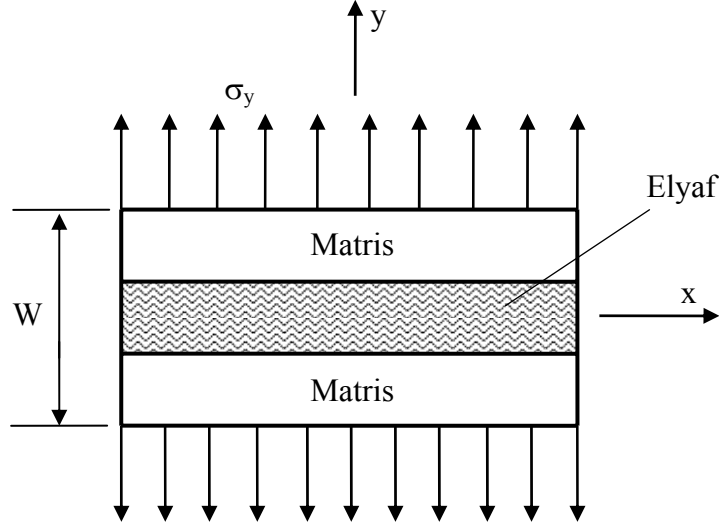


Şekil II.17. E_x 'in Tahmini Değerlerine Karşılık Ölçülmüş Değerler [27]

Şekil II.17.'de görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ise tahmini sonuçlar arasında mükemmel bir uyum vardır.

II.3.2. E_y 'nin Belirlenmesi

E_y , enine yöndeki kompozit malzemenin Young modülüdür. Malzeme yaklaşımının mekaniğinde, enine gerilme σ_y şekil II.18.'de gösterildiği gibi hem elyaf hem de matrise uygulandığı varsayılmıştır. Bu da kompozit malzemedeki (elyaflar ve matris) bitişik elementlerin denge oluşturmasıdır. Ancak kesinlikle y yönündeki elyaf ve matristeki şekil değiştirmelerle ilgili akla yatkın hiçbir yaklaşım veya tahmin yapılamamaktadır [27].



Şekil II.18. y Yönünde Yüklendiği Hacim Elementi [27]

Elyaf ve matristeki şekil değiştirme, bu yüzden gerilmeden bulunur;

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_y}{E_f} \quad \epsilon_m = \frac{\sigma_y}{E_m} \quad (\text{II.8.})$$

Kompozit yapının genişlik ölçüsü ortalamaya etki eder çünkü E_f , yaklaşık olarak $V_f W$ bağıntısına bağlı iken ϵ_f , $V_m W$ bağıntısına bağlıdır. Böylece toplam enine deformasyon;

$$\Delta W = \epsilon_y W = V_f W \epsilon_f + V_m W \epsilon_m \quad (\text{II.9.})$$

veya,

$$\varepsilon_y = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m \quad (\text{II.10.})$$

olur ki burada denklem II.8. şekil değiştirme denklemi de yerine konursa,

$$\varepsilon_y = V_f \frac{\sigma_y}{E_f} + V_m \frac{\sigma_y}{E_m} \quad (\text{II.11.})$$

Olur. Fakat makroskopik gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden,

$$\sigma_y = E_y \varepsilon_y = E_y \left[\frac{V_f \sigma_y}{E_f} + \frac{V_m \sigma_y}{E_m} \right] \quad (\text{II.12.})$$

buradan da,

$$E_y = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (\text{II.13.})$$

ki bu da malzemelerin mekaniğinin elyafların enine yöndeki Young modülünün açıklamasıdır.

Denklem II.13. boyutlandırılmış olarak;

$$\frac{E_y}{E_m} = \frac{1}{V_m + V_f \left(\frac{E_m}{E_f} \right)} \quad (\text{II.14.})$$

verilebilir.

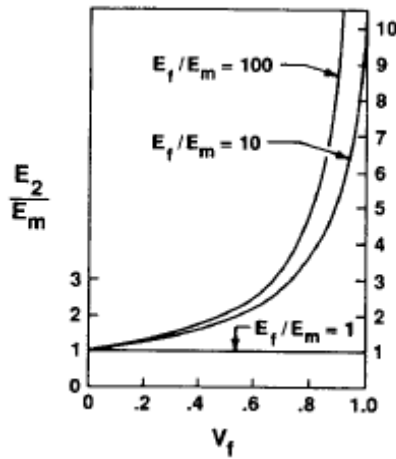
E_y/E_m in değerleri Elyaf –Matris modül oranının üç değeri için tablo II.4.'te verilmiştir [27].

Tablo II.4. E_y/E_m Değerleri için Değişken E_f/E_m ve V_f Değerleri [27]

$\frac{E_m}{E_f}$	V_f						
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1,22	1,56	1,82	2,17	3,56	10
100	1	1,25	1,66	1,98	2,46	4,80	100

Tahmin edilmiş sonuçlar, Elyaf Matris modül aracının üç değeri için şekil II.19.'da verilmiştir.

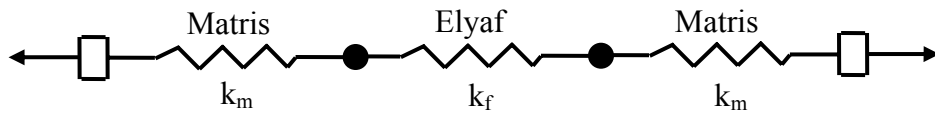
Eğer $V_f = 1$ olursa bu elyafın tahmin edilmiş modülü olur. Ancak, elyaflar arasında kabul edilen en iyi bağ, eğer σ_y gerilmesi uygulanırsa anlaşılabilir. Eğer bir basınç gerilmesi uygulanırsa hiçbir bağ anlaşılabilir. Ayrıca elyaf oranı % 50 den fazla olduğunda enine E_y modülünü matris modülünün iki katına ($E_f = 10 \times E_m$) yükseltmek gerektiği gözlemlenebilir [27].



Şekil II.19. Elyaf Hacim Oranı ile E_y 'nin Değişimi [27]

Kompozitte elyafın yüzdesi çok yüksek olmadığı sürece enine modül elyafı etkisi olmamaktadır. Bundan dolayı kompozit malzemelerin özelliklerinden E_y matris baskındır.

Şekil II.20.'de temsil edilen, hacim elementi seri bağlanmış basit bir yay modelinin y yönünde yüklenmiş olarak gösterilmektedir. Böylece matris için yay sertliği daha düşüktür. Bu temele göre, kompozitin deformasyonu matris deformasyonuna bağlıdır çıkarımı yapılabilir [27].

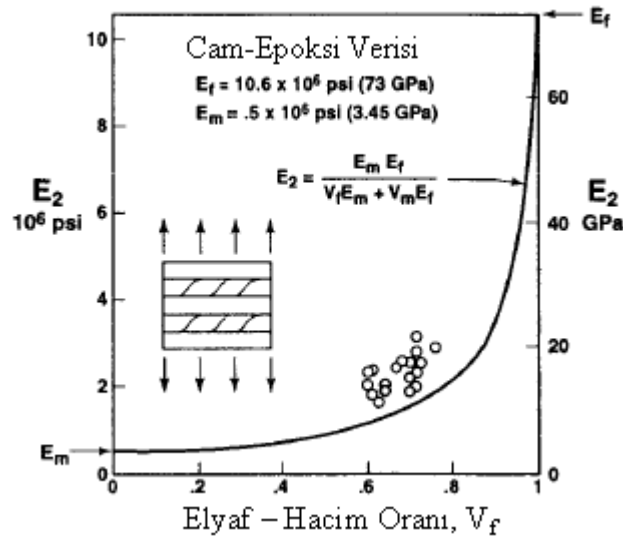


Şekil II.20. Elyaf Takviyeli Plakada Deformasyon Paylaşımı [27]

Yukarıdaki çıkarımın bütünüyle sabit olmadığı aşikârdır.

Denklem II.8. ile belirtilen elyaf ve matris arasındaki sınırlarda uyumsuz bir enine şekil değiştirme vardır. Ayrıca, elyaf ve matristeki enine gerilmeler aynı değildir. Çünkü (V_f) elyaf oranı V_m matris oranına eşit değildir. Bunun yerine, elyaf ve matris sınırı boyunca toplam şekil değiştirme, görünen enine Young modülü için iyi bir çözüm getirecektir. Bu çözüm sadece elastiklik teoremi ile elde edilebilen bir çözüm olacaktır. Bu tutarsızlık sadece deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla belirlenebilmektedir. Bu çözümdeki diğer bir gözlem de, elyaf ve matrisin Poisson oranları aynı değilse (muhtemelen farklıdır) elyaf ve matriste 0 noktasında ortaya çıkan aksel kuvvet ve aksel gerilmeler ile elyaf-matris sınırında kesme gerilmeleri meydana gelir. Bu kesme gerilmeleri bazı gerilme durumları altında doğal olarak ortaya çıkacaktır. Bundan dolayı, bu malzeme karakteristiğinde belirtilen çözümün istenmeyen tutarsızlığı dikkate alınmayacaktır.

Denklem II.13.'ten E_y için yapılan tahminler E_y için ölçülen değerler ile birlikte şekil II.21.'de gösterilmiştir [27].



Şekil II.21. E_y 'nin Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerleri [27]

Burada, E_y ye esnek matris malzemenin katkısı bu aşikâr yaklaşımın ortaya çıkan bir katkısıdır.

II.3.3. v_{xy} 'nin Belirlenmesi

Poisson oranı olarak bilinen v_{xy} , E_x için benzer bir analiz yaklaşımı ile belirlenir. İlk olarak Poisson oranı,

$\sigma_x = \sigma$ ve 0 noktasındaki diğer bütün gerilmeler için,

$$v_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (\text{II.15.})$$

dir.

Öyleyse deformasyonlar şekil II.22.'de gösterilen hacim elementinde belirtilmiştir. Burada, temel basitleştirme yaklaşımı, elyaf yönündeki (E_x olarak bilinir) elyaf birim şekil değiştirmeleri matris birim şekil değiştirmelerine hemen hemen eşittir [27].

Enine deformasyon Δ_w makroskobik olarak,

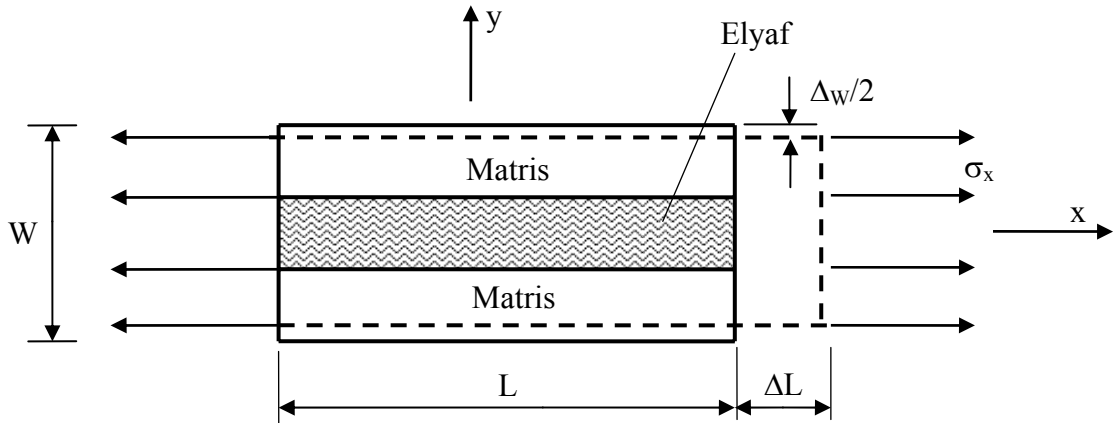
$$\Delta_w = -W\varepsilon_y = Wv_{xy}\varepsilon_x \quad (\text{II.16})$$

olur.

Fakat mikroskobik olarak da,

$$\Delta_w = \Delta_{mW} + \Delta_{fW} \quad (\text{II.17.})$$

olur.



Şekil II.22. x Yönünde Yüklenmiş Hacim Elementi [27]

Enine Young modülünün (E_y) analizinde Δ_{mW} ve Δ_{fW} yaklaşık olarak,

$$\Delta_{mW} = WV_m v_m \varepsilon_x \quad \Delta_{fW} = WV_f v_f \varepsilon_x \quad (\text{II.18.})$$

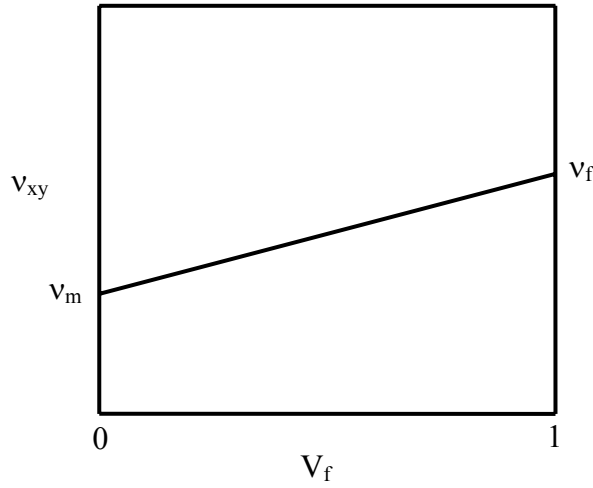
II.16. ve II.18. denklemlerinin birleştirilip ε_x 'e bölünmesi ile,

$$v_{xy} = v_m V_m + v_f V_f \quad (\text{II.19.})$$

elde edilir.

Bu da, ana Poisson oranı ve E_x için şekil II.23.'te benzer bir davranışta gösterilen karışımın bir kuralıdır.

Çünkü v_m ve v_f Poisson oranları birbirinden çok farklı değildir, kompozit malzemenin ana Poisson oranı v_{xy} doğaldır.(ne matris ne de elyaf baskın değildir.)



Şekil II.23. v_{xy} 'nin Elyaf Hacim Oranına Bağlı Değişimi [27]

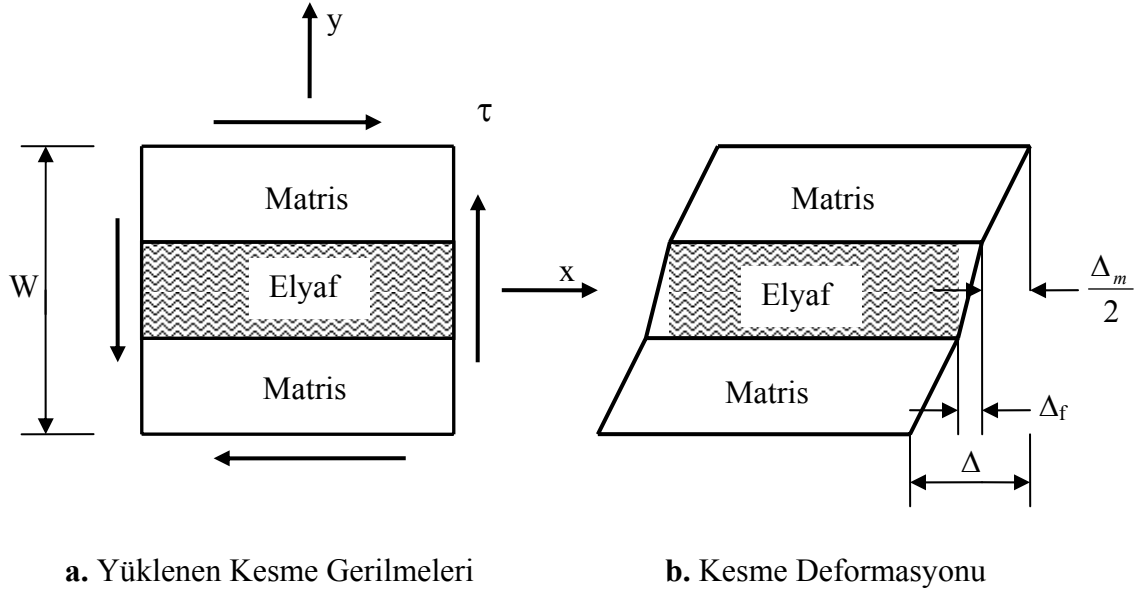
II.3.4. G_{xy} 'nin Belirlenmesi

Bir plakanın düzlemdeki kesme modülüne G_{xy} , malzemelerin mekanik yaklaşımında elyaf ve matristeki gerilmeler eşit varsayımı (kesme deformasyonları aynı olamaz) yapılarak belirlenmiştir. Şekil II.24.'te yüklenmiş bir hacim elemanı gösterilmiştir [27].

Bu basit varsayımın avantajı ile,

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad (\text{II.20.})$$

yazılabilir.



Şekil II.24. Yüklenmiş Hacim Elemanı [27]

Şekil II.24.'te deformasyonlar mikroskobik ölçekte gösterilmiştir. Dikkate alınmalıdır ki, kesme deformasyonunda matris deformasyonu elyaf deformasyonundan daha fazladır. Çünkü matris düşük bir kesme modülüne sahiptir.

Toplam kesme deformasyonu,

$$\Delta = \gamma W \quad (\text{II.21.})$$

dir.

Yaklaşık olarak mikroskobik deformasyonlar,

$$\Delta_m = V_m W \gamma_m \quad \Delta_f = V_f W \gamma_f \quad (\text{II.22.})$$

dir.

Buradan da, $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$ olduğu için W 'ya bölünür ise,

$$\gamma = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f \quad (\text{II.23.})$$

elde edilir.

Veya denklem II.20. düzenlenir ve mikroskobik olarak incelenir ise,

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{xy}} \quad (\text{II.24.})$$

elde edilir.

Sonuç olarak,

$$\frac{\tau}{G_{xy}} = V_m \frac{\tau}{G_m} + V_f \frac{\tau}{G_f} \quad (\text{II.25.})$$

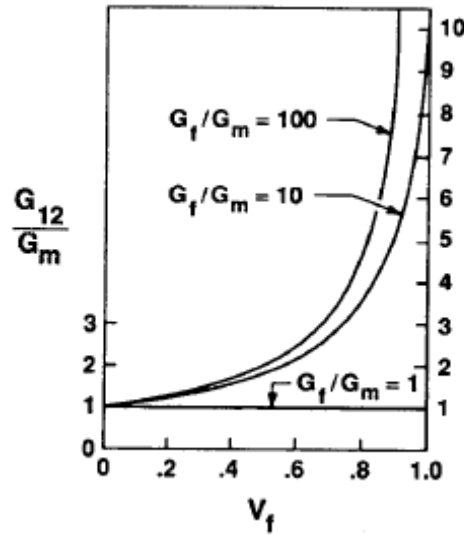
$$G_{xy} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (\text{II.26.})$$

Ki burada enine Young modülü için elde edilen benzer bir ifadedir. E_y 'de olduğu gibi, G_{xy} ifadesi için matrisle bağlı bir modül ile sadeleştirilir ise,

$$\frac{G_{xy}}{G_m} = \frac{1}{V_m + V_f \left(\frac{G_m}{G_f} \right)} \quad (\text{II.27.})$$

Bu da şekil II.25.'te G_f/G_m 'nin birkaç değeri için gösterilmiştir.

Ancak elyaf hacminin toplam hacmin % 50'sinden daha fazla olduğu durumda ($G_f/G_m = 10$ olduğu zaman) G_{xy} , G_m 'nin yaklaşık iki katı kadar artar [27].



Şekil II.25. Elyaf Hacim Oranı ile G_{xy} 'nin Değişimi [27]

E_y 'de olduğu gibi, kompozit malzemenin kesme modülü (G_{xy}) matris baskındır. G_{xy} 'in ölçülmüş değerleri, E_y 'nin şekil II.21.'de gösterilen tahmini değerleri ile benzer bir ilişki vardır [27].

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

III.1. DENEY DÜZENİĞİNİN TASARIMI VE İMALATI

Elyaf sarma teknolojisi ile üretilen ürünlerin imalatında kullanılan elyaf sarma makinesinin bir ünitesi de ön gerilme ünitesidir. Ön gerilme ünitesinin görevi, sarım esnasında ürün üzerine sarılan elyaflar arasında boşlukların ve gevşemelerin oluşumunu engellemektir.

Elyaf sarma teknolojisinde kullanılan kontrol sistemleri incelendiğinde son yıllarda bilgisayar destekli üretimin ve robot destekli üretimin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Elyaf sarma işleminde bilgisayar destekli üretime geçilmesinde özellikle sarım yörüngesinin üretilen ürünün mekanik özelliklerine etkisi büyük bir öneme sahiptir. Elyaf sarma işleminde kullanılan kontrol tipleri ve bunların amaçları ile ilgili bir literatür incelemesi yapıldığında;

Sharon ve Lin [28], farklı profillerde parçaların elyaf sarma yöntemi ile üretilebilmesi için tam otomatik bir optik elyaf sarma makinesi önermişlerdir. Bu makinede sarım boyunca gerilme kontrolünü denetleyen ve ortaya çıkan hataları görüntüleyen bir sistem geliştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmayla farklı büyüklüklerde parçaların sarım işlemlerinin daha kısa sarım zamanlarında gerçekleştirilebileceğini öne sürmüşlerdir.

Choi ve arkadaşları [29], aktuatör frenlerde kullanılan taşıma bandı ön gerilme sistemi için bir geri besleme kontrolünü yapmışlardır. Frenin uygun büyüklükte üretimi ve dinamik karakteristiği deneysel olarak çalışılmıştır. Arzulanan ön gerilme seviyesine ulaşabilmek amacıyla, geri besleme için formülasyondan sonra bir yönetici hareket denklemi ve bir kontrol algoritması oluşturmuşlardır.

Yeung ve arkadaşları [30], tekstil sektöründeki uygulamalarda yapılan sarım işlemleri ve elyaf sarma işlemleri gibi ön gerilmedeki değişimin en aza indirgenmesi gereken uygulamalarda modern bir kontrol uygulaması sunmuşlardır. Bu uygulamada bulanık mantık kullanılarak senkronize bir kontrol sistemi

geliştirilmiştir. Böylece düşük bir yer değiştirmede ve yüksek bant genişliğinde elyaf ön gerilme sensörü geliştirmişlerdir.

Sauter ve arkadaşları [31], dinamik sistemlerde hatalı toleransın kontrolü için bir metot önermişlerdir. Önerilen yaklaşımda iki aşama vardır. Birinci aşama yöne bağlı bir ayıraç kullanılarak hatalı bileşenlerin belirlenmesi ve izolasyonudur. İkinci aşama ise hata etkilerini azaltmayı mümkün kılan bir mekanizmadır. Bu yaklaşım ön gerilmenin kontrolü için elyaf sarma makinelerinde kullanıldığında uygun sonuçlar vermiştir.

Kudo ve arkadaşları [32], otomatik bir dikiş robotu tasarlamışlardır. Bu robot da tıpkı insanların çalıştığı gibi iki kollu robotun masa üstünde çalışması ve insana benzer bir dikiş işlemi yapması hedeflenmiştir. Ayrıca robotun daha farklı görevlerde de kullanılabilmesi için çok kollu bir robot sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu robotun özellikle ellerinin koordinasyon kontrolü ve ipliklerin ön gerilmesinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

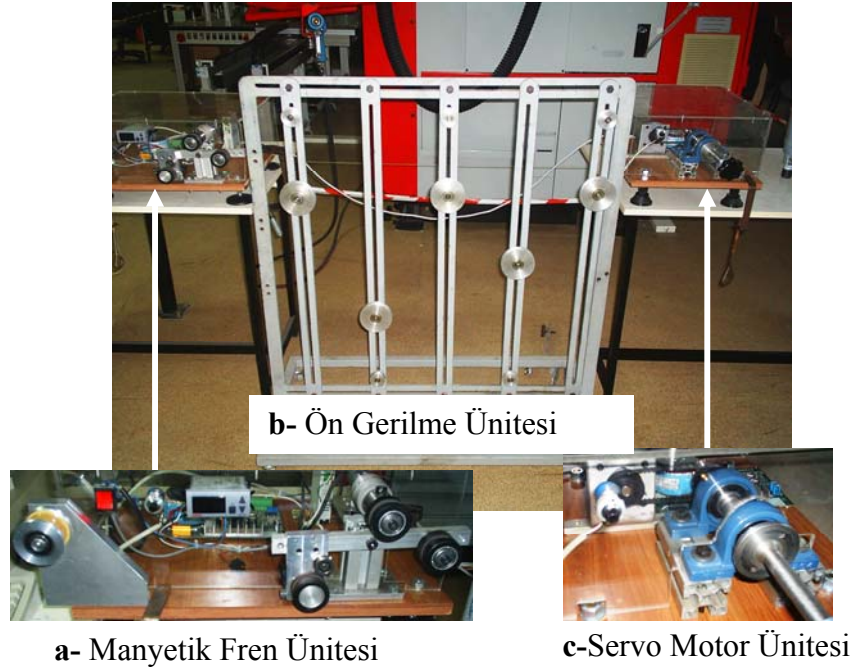
Polini ve Sorrentino [33], iyi bir kompozit parça üretimi için optimum bir ön gerilme değerinde bir kontrolün sağlanması ve optimum bir sarım hızı ve yörüngesi için geometrik parametrelerinin programlanabilmesi için bir çalışma sunmuşlardır. Kompozit parçaların üretimi robot destekli yapıldığında özellikle ön gerilme kontrol edilmesi gereken çok önemli bir parametre olmaktadır. Çünkü üretilen parçanın mekanik özelliklerine direkt etki etmektedir.

Bu çalışmada sarım esnasında kullanılan elyaf üzerinde bulunan ön gerilme yükü, kullanılan makaralar ile elyaf arasındaki sürtünme, kullanılan makara çapı ve eğilme gerilmelerinin elyafın mukavemetine etkilerini incelemek amacı ile PI kontrollü bir sarım düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

III.1.1. Elyaf Sarım Düzeneği ve Bölümleri

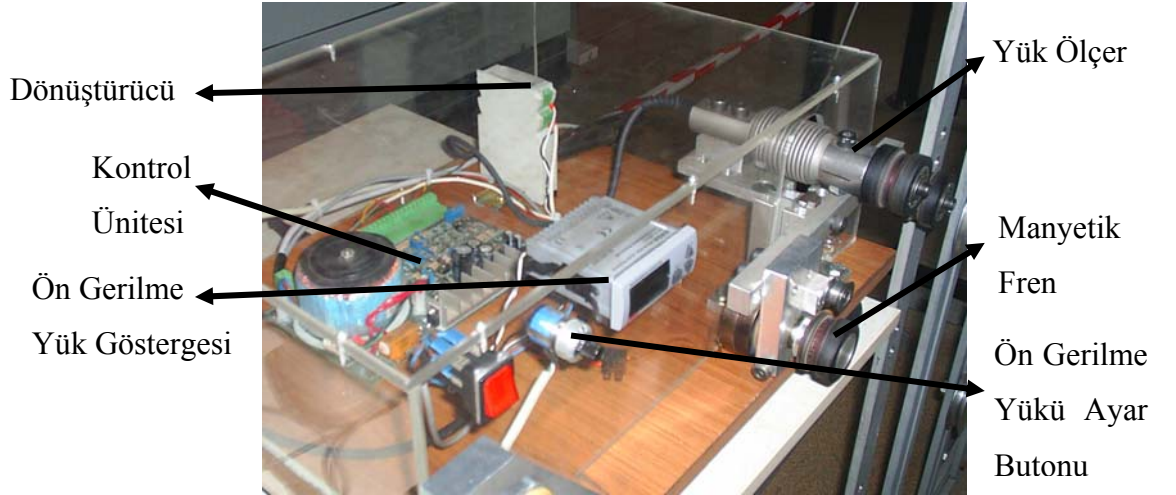
Elyaf sarma düzeneği şekil III.1.'de gösterildiği gibi 3 bölümden oluşmaktadır.

- a. Manyetik Fren Ünitesi**
- b. Ön Gerilme Ünitesi**
- c. Servo Motor Ünitesi**

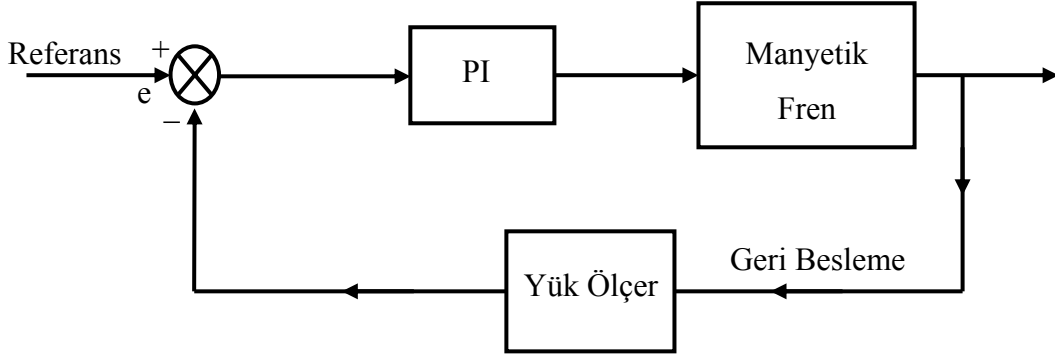


Şekil III.1. Elyaf Sarım Düzeneği

Şekil III.1.a.'da gösterilen birinci bölüm elyafın sarım esnasındaki gerginliğini PI kontrollü manyetik fren sistemi ile ayarlayan ve sarım esnasında elyaf üzerindeki gerginlik miktarını sayısal olarak gösteren bölümdür.

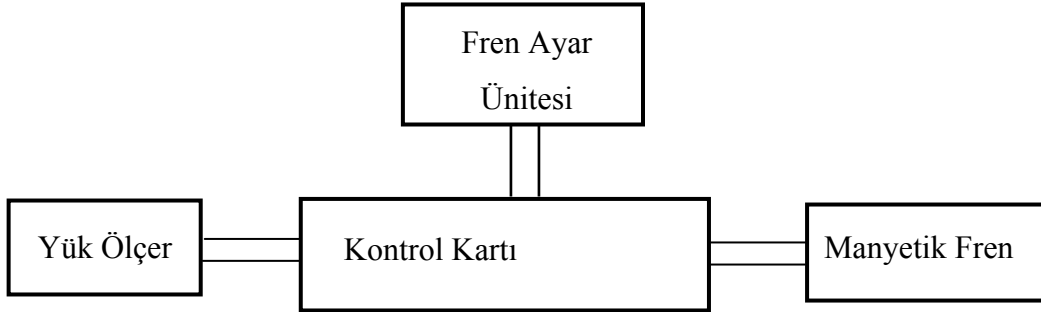


Şekil III.1.a. Manyetik Fren Ünitesi



Şekil III.2. PI Kontrollü Ön Gerilme Sistemi Kapalı Çevrim Blok Diyagramı

Şekil III.2.'de PI kontrollü ön gerilme sistemi kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil III.3.'te PI kontrollü ön gerilme sistemi genel akış şeması verilmiştir. Bu akış şemasına göre sarım işlemi başladığında yük ölçerden gelen 0 – 10 volt aralığındaki gerilme değeri fren ayar ünitesinden girilmiş olan değer ile karşılaştırılarak elde edilen sinyal PI kontrolöre iletilir. Daha sonra buradan çıkan kontrol sinyali ise manyetik frene iletilir. Sarım esnasında yük ölçerden 0-10 V aralığında ölçülen ön gerilme değeri referans değeri olarak PI kontrolöre hata sinyali olarak iletilir. İletilen hata sinyalinin değerine bağlı olarak sistemde geri besleme yapılır.



Şekil III.3. PI Kontrollü Ön Gerilme Sistemi Çalışma Genel Akış Şeması

Eğer gelen volt değeri ayarlanan volt değerinden küçük ise kontrol ünitesi manyetik frenin sıkmasını ve sarma esnasındaki ön gerilme yükünün artmasını sağlar. Gelen volt değeri ayarlanan volt değerinden büyük ise kontrol ünitesi manyetik frenin rahat dönmesini ve ön gerilme yükünün azalmasını sağlar. Bu döngü sarım boyunca hata sıfırlanana kadar devam eder. Böylece sarım esnasında ön gerilme yükünün, ayarlanan değerde sabit kalması sağlanır.



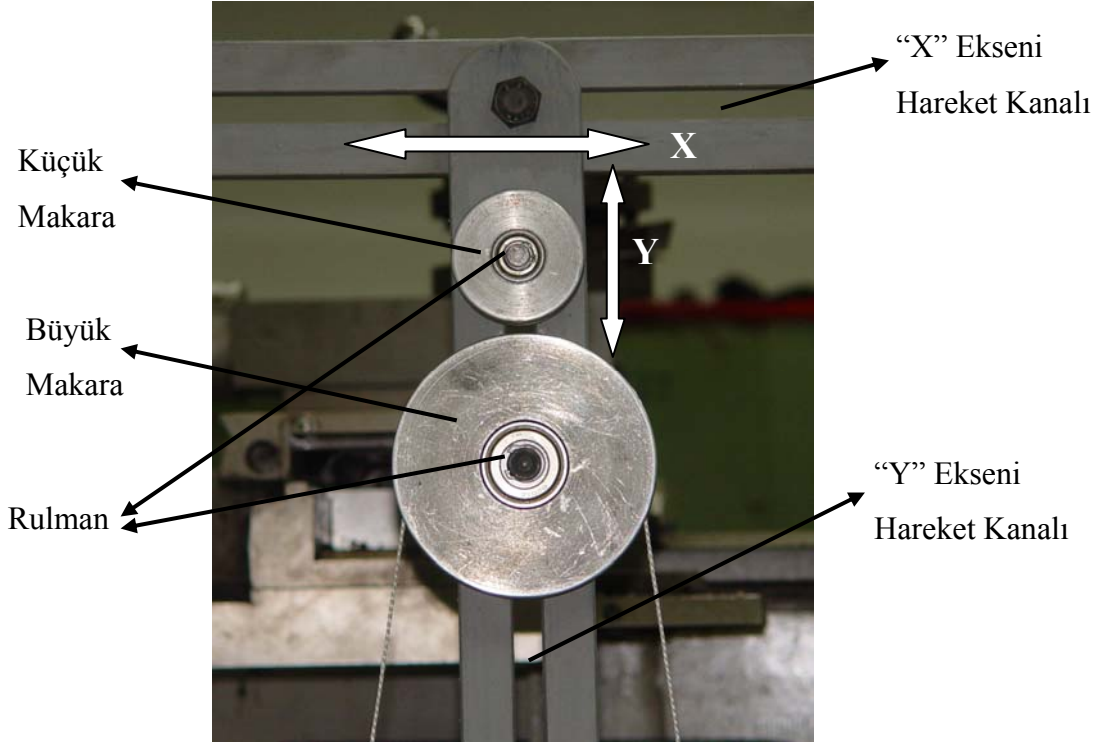
Şekil III.4. Manyetik Fren Ünitesinde Kullanılan Elemanlar

Manyetik fren ünitesinde kullanılan elemanların teknik özellikleri tablo III.1.'de verilmiştir.

Tablo III.1. Manyetik Fren Ünitesinde Kullanılan Elemanların Teknik Özellikleri

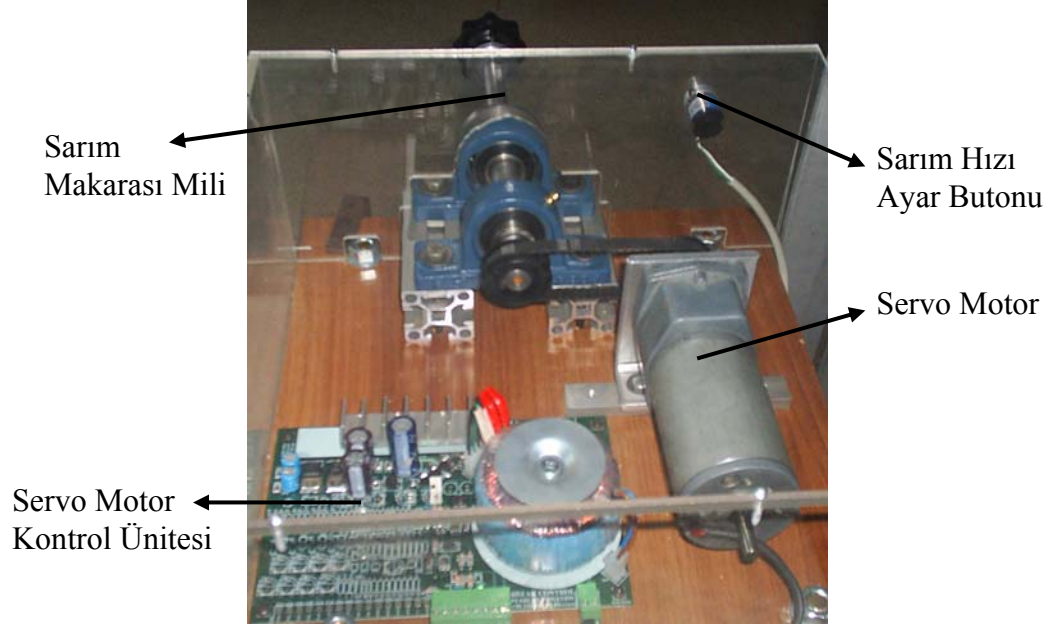
Ön Gerilme Yük Göstergesi (ENDA EI141 Programlanabilir Gösterge)	Manyetik Fren	Yük Ölçer	
Ebat: 34x77mm	Gerginlik Kontrol Cihazından gönderilen 0 – 10 V elektrik sinyaline göre çalışır	Doğruluk Sınıfı	1000d
4 hane dijital göstergeli.	Fren kapalı ortamda çalıştığı için ortam faktörlerinden etkilenmez.	Kapasite	10 kgf
Gösterge skalası -1999 ile 4000 arasında ayarlanabilir.		Kullanım Alanı	Baskı ve Çekme
Ölçüm birimi görülebilir.			
Dört farklı seçilebilir standart giriş tipi (0-20mA, 4-20mA, 0-1V, 0-10V)			

Şekil III.1.b.'de, ikinci bölüm olan ön gerilme ünitesi gösterilmektedir. Ön gerilme ünitesi sarım esnasında elyafın üzerinde bulunan ön gerilme yükünü sabit tutarak sarımın her noktada aynı gerginlikte gerçekleşmesini ve elyaflar arasında boşluklar oluşmasını engellemektedir. Elyaf sarma makinelerinde bulunan ön gerilme ünitesinin sarım esnasında elyafın mukavemetine etkisinin araştırılabilmesi için bu ünite tasarlanmıştır.



Şekil III.1.b. Ön Gerilme Ünitesi

Tasarım da elyafın geçeceği makaralar iki farklı çapta seçilmiştir. Küçük çaplı makaranın çapı 32.2 mm ve büyük çaplı makaranın çapı 78.9 mm olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca bu makaraların kendi ekseninde dönerken maruz kalacağı sürtünmelerin en aza indirilmesi için makara göbeklerinde rulman kullanılmıştır. Böylece sarım esnasında elyafın maruz kalacağı sürtünme de en aza indirilmiştir. Üretilen bu makaraların istenilen konumlarda sabitlenebilmesi için uygun bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Buna göre makaraların, şekil III.1.b.'de görüldüğü gibi X ve Y eksenlerinde konumları rahatlıkla değiştirilebilmektedir. Şekil III.1.c.'de de üzerine sarım yapılacak olan makaranın bağlandığı ve bu makaranın kendi ekseninde dönmesini sağlayan servo motor ünitesi gösterilmektedir.



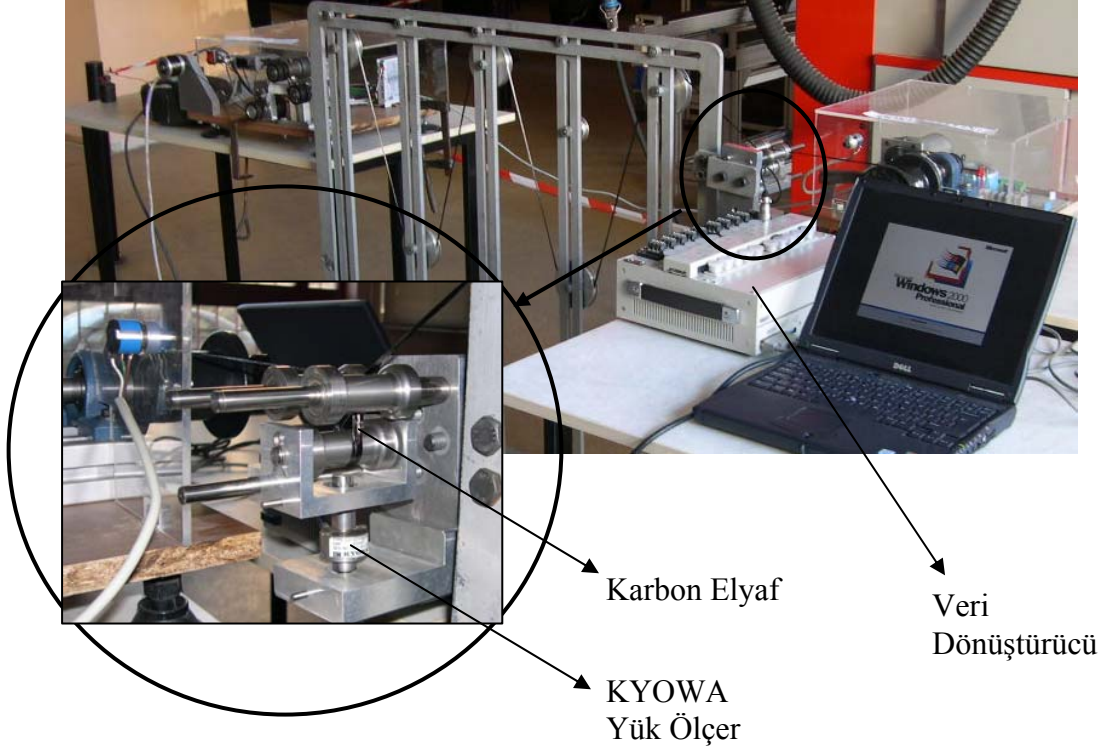
Şekil III.1.c. Servo Motor Ünitesi

Servo motora bağlı olan mile üzerine sarım yapılacak olan makara veya bobin bağlanır. Sarım esnasındaki servo motorun dönüş hızı sarım hızıdır. Bu sarım hızını ayarlamak için sarım hızı ayar butonu kullanılır. Buton servo motor kontrol ünitesine bağlıdır.

Sarım işlemlerinin istenilen ön gerilme değerleri altında gerçekleştirilebilmesi için şekil III.1.'de gösterildiği gibi sarım düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

III.1.2. Elyaf Sarım Düzeneğinin Kalibrasyonu

Tasarlanmış ve üretilmiş elyaf sarım düzeneğinin hassasiyeti ve doğruluğunun belirlenmesi amacıyla düzeneğin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon işleminin yapılabilmesi için doğruluğu kabul edilmiş bir ölçüm sistemine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada kalibrasyon işlemi için KYOWA-UCAM 21 ölçüm sistemi kullanılmıştır.

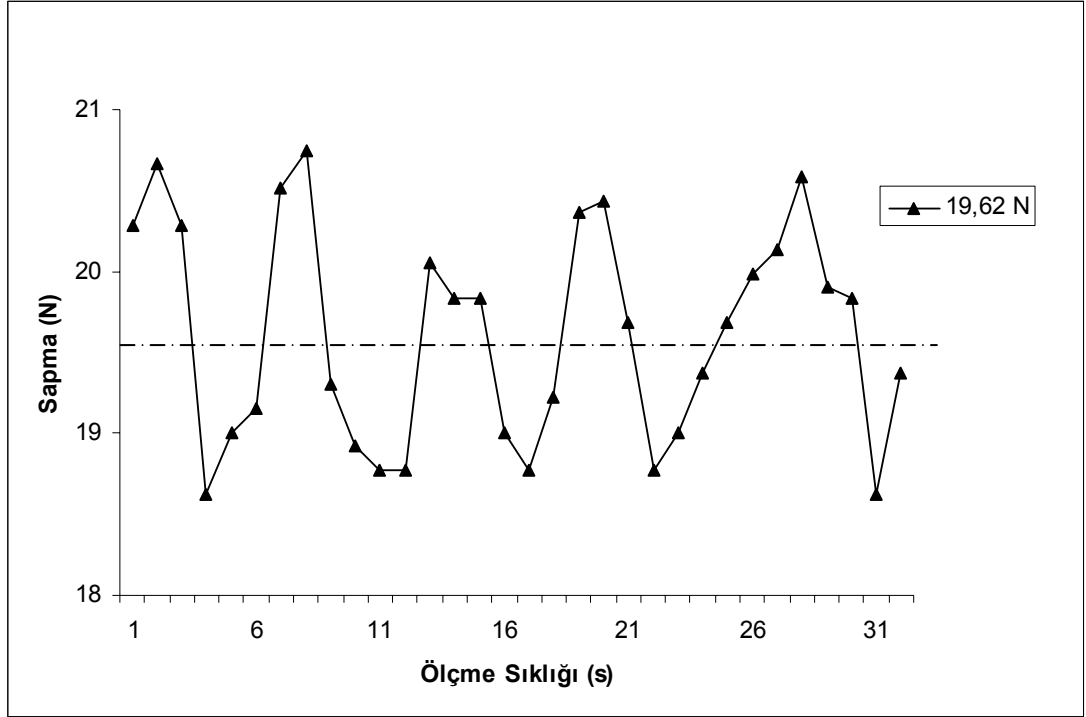


Şekil III.5. Elyaf Sarım Düzeneginin Kalibrasyonu

Şekil III.5.'de gösterildiği gibi üretilmiş olan elyaf sarım düzenegi KYOWA-UCAM 21 ölçüm sistemi kullanılarak kalibre edilmiştir.

Kalibrasyon işlemi aşağıdaki işlem sırasına göre yapılmıştır;

1. Makaraların konumları belirlenmiş ve sabitlenmiştir,
2. Ön gerilme ünitesinin çıkışına bir yük ölçer bağlanmış ve bu yük ölçere bağlı veri dönüştürücü ve bilgisayar bağlanmıştır,
3. Manyetik fren ünitesinde sarım için ön gerilme yükü ayarlandı,
4. Manyetik fren ünitesinde ayarlanan ön gerilme yüküne bağlı olarak sarım işlemi gerçekleştirilmiştir.
5. Sarım işlemi gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak yük ölçerden de yapılan ölçümler bilgisayara kayıt edilmiştir.



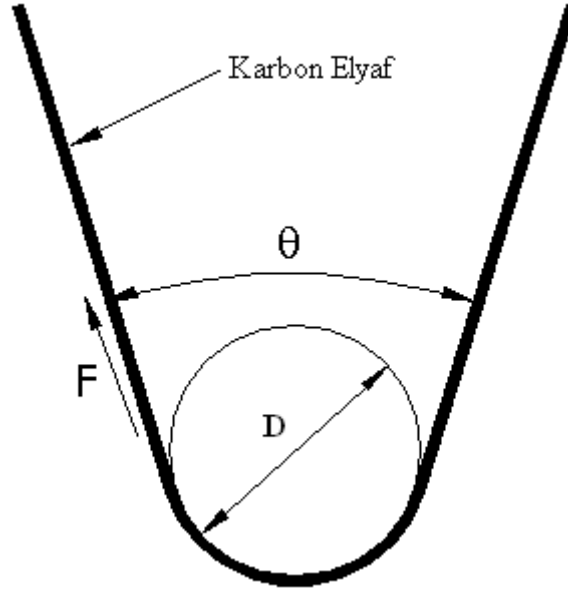
Şekil III.6. Sarım Esnasında Ön Gerilme Yükünün Sapma Aralığı

Yapılan bu kalibrasyon işlemi ile sistemin istenilen hassasiyette ve doğrulukta olduğu tespit edilmiştir.

19,62 N'luk ön gerilme yükünün zamana bağlı olarak sarım esnasındaki değişimi şekil III.6.'te verilmiştir. Burada açıkça görülmektedir ki sarım düzeneği $\pm 0,981$ N hassasiyetle ön gerilme yükünü sabit tutabilmektedir.

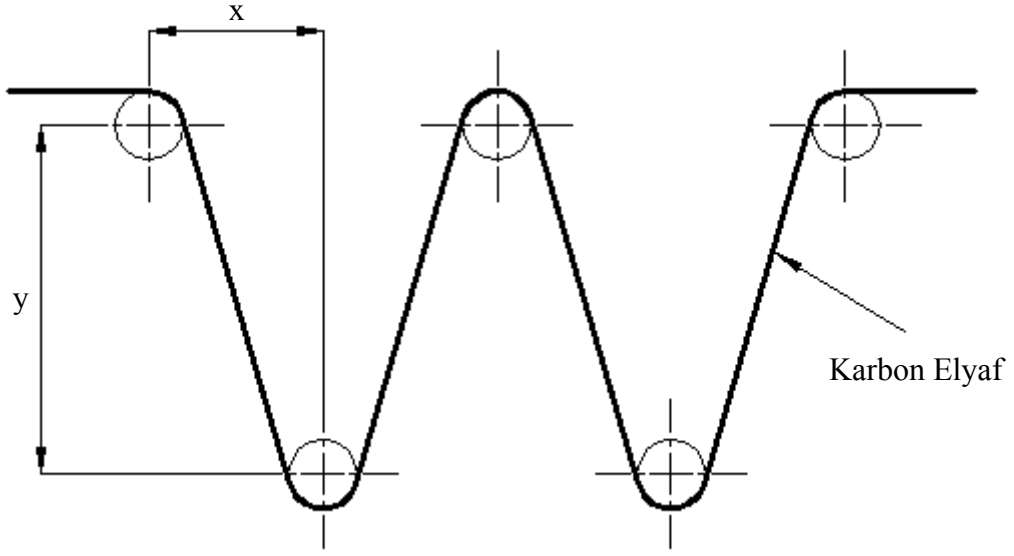
III.2. SARIM İŞLEMİNİN VE KARBON ELYAFLARIN MEKANİK TESTLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sarım esnasında sürekli karbon elyafın mekanik özelliklerine etki eden parametrelerin ve etki miktarlarının belirlenebilmesi çok önemlidir. Bu nedenle şekil III.6.'de gösterilen parametrelerin değiştirilmesi ile elde edilen farklı koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil III.7. Farklı Şartların Elde Edilmesi İçin Değiştirilen Sarım Parametreleri

Şekil III.7.'de gösterilen parametreler değiştirilerek elde edilen farklı sarım koşulları altında sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Burada θ sarım açısını ifade etmektedir. θ Açısının değişmesine bağlı olarak sürekli karbon elyaf ile makara arasında meydana gelen sürtünme kuvveti ve sürekli karbon elyafın maruz kaldığı eğilme gerilmeleri değişecektir. F kuvveti sarım esnasında ayarlanan ön gerilme yükünü ifade etmektedir. D ise sarımlarda kullanılan makara çapını ifade etmektedir. Buradan da rahatlıkla anlaşılacağı gibi makara çapındaki değişim θ değerini değiştirecektir. Dolayısıyla makara çapının değişimi de hem karbon elyaf ile makara arasındaki sürtünme kuvvetini hem de sürekli karbon elyafın maruz kaldığı eğilme gerilmelerini etkileyecektir.



Şekil III.8. Ön Gerilme Ünitesinin Şematik Gösterimi

Sarım işlemi gerçekleştirilirken ele alınan koşullar Şekil III.8.'de gösterilen ön gerilme ünitesinin şematik gösterimi üzerinde ifade edilecektir. Burada x ve y değişkenleri ile kullanılan makaralar arasındaki mesafe ayarlanmıştır. Ön gerilme ünitesinde her sarım koşulu için simetrik konumlandırılmış beş makara kullanılmıştır. Şekil III.1.b.'de de gösterildiği gibi ön gerilme ünitesinde iki farklı makara kullanılmıştır. Küçük makara 32,2 mm çapında ve büyük makara ise 78,9 mm olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca sarım esnasında elyaf üzerindeki ön gerilme kuvveti 19,62 ve 24,52 N olarak iki farklı değer olarak ayarlanmıştır. Sarım işleminin gerçekleştirildiği koşullar aşağıda verilen tablo III.2.'de gösterilmektedir.

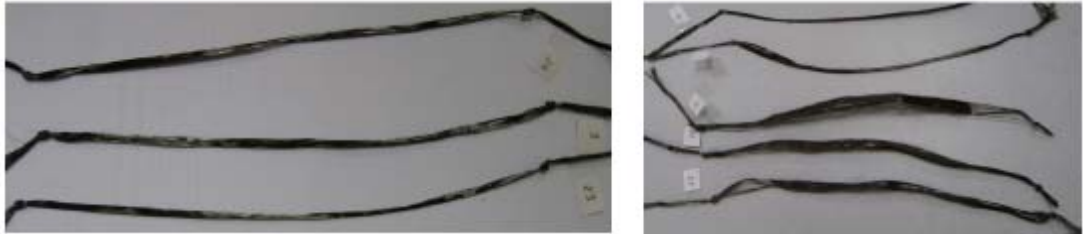
Tablo III.2. Sarım İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Koşullar

Koşul	x (mm)	y (mm)	Sarım Açısı (θ)	Makara Çapı (mm)	Ön Gerilme Kuvveti (N)	Koşul Gösterimi
1	200	400	45°	D = 78,9	19,62	19,62 N_D_200_400
2	200	400	33°	d = 32,2	19,62	19,62 N_d_200_400
3	200	400	45°	D = 78,9	24,52	24,52 N_D_200_400
4	200	400	33°	d = 32,2	24,52	24,52 N_d_200_400
5	200	780	17°	D = 78,9	19,62	19,62 N_D_200_780
6	200	780	24°	d = 32,2	19,62	19,62 N_d_200_780
7	200	780	17°	D = 78,9	24,52	24,52 N_D_200_780
8	200	780	24°	d = 32,2	24,52	24,52 N_d_200_780

Yukarıdaki koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu sarım işlemleri sonucunda elde edilen numuneler çekme deneyine tabi tutularak mekanik özellikleri test edilmiştir.

III.2.1. Kuru Elyaf Sarma Yöntemi ile Sarılmış Sürekli Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Hazırlanması

Farklı koşullar altında sarım işlemi gerçekleştirilen karbon elyafların çekme deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla çekme numuneleri hazırlanmıştır. Sarım işlemi bir makara üzerine gerçekleştirilmiştir. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra bu makara üzerinden alınan karbon elyaf çekme numuneleri ASTM D 4018-99 standardına göre uygun uzunluklarda kesilmiştir [34].



Şekil III.9. Kuru Elyaf Sarma Yöntemi ile Sarılmış Sürekli Karbon Elyaf Çekme Numuneleri

Numuneler uygun uzunluklarda kesildikten sonra iki ucuna düğüm atılmıştır. ASTM standardına göre numunenin uzunluğu 150 mm'dir. Ancak çekme makinesinin tutma çenelerinin yüksekliği 50 mm olduğu için şekil III.9.'de gösterilen numunelerin ucuna atılan düğümler arası 250 mm olarak oluşturulmuştur. Numunelerin çekme makinesinin tutma çenelerine bağlanması esnasında bu düğümlerden yararlanılmıştır.

Çekme deneylerinden elde edilen sonuçların kayıt altına alınabilmesi için hazırlanmış olan bu numuneler numaralandırılmıştır.

III.2.2. Kuru Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Deneyleerde kullanılan sürekli karbon elyaf numunelerin mekanik özellikleri tablo III.3.'te verilmiştir. Bu değerler üretici firmanın katalog değerleridir. Bu değerlere göre kullanılan sürekli karbon elyafın kesme modülü;

$$G = \frac{E}{2.(1+\nu)}$$

$$G = \frac{230000}{2.(1+0,19)}$$

$G = 96638,7$ MPa olarak hesaplanabilir.

Tablo III.3. Kuru Karbon Elyaf Çekme Numunelerinin Mekanik Özellikleri

Kuru Karbon Elyaf (T700SC-12000)						
A (mm²)	Demetteki Elyaf Lif Sayısı	Elyaf Lif Çapı (mm)	E (MPa)	ν	G (MPa)	ρ (g/cm³)
0,4618	12000	0,007	230000	0,19	96638,7	1,8

Tablo III.3.'te elde edilen kuru karbon elyaf çekme numunelerinin mekanik özellikleri verilmektedir.

III.2.3. Islak Elyaf Sarma Yöntemi ile Sarılmış Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyaf Kompozit Çekme Numunelerinin Hazırlanması

Sarım işlemi tamamlanan karbon elyaf numunelerinin diğer bölümü ise kompozit haline getirilmiştir.

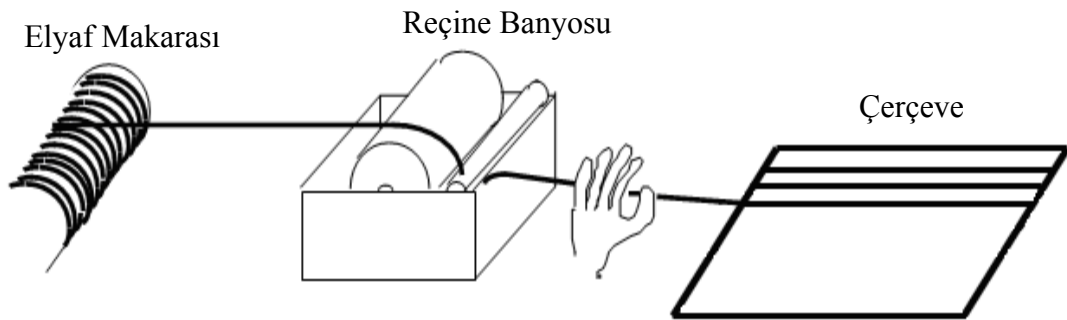
Karbon elyafların kompozit haline getirilebilmesi için reçine emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Reçinenin birleştirme özelliği elyaf tellerini bir arada tutarak elde edilen kompozitin mukavemetini arttırmaktadır. Reçine emdirme işlemi için reçine banyosu;

- Reçine (BRE-PW-05)
- Katılaştırıcı - MEK (Metil Etil Keton)
- Hızlandırıcı (Kobalt Naftalat), kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo III.4. Kullanılan Reçinenin Özellikleri[35]

Reçine Ürün Kodu	Kullanım Alanı	Teknik Özellikleri
BRE-PW-05	Elyaf Sarma	<ul style="list-style-type: none">▪ Çekme Dayanımı 75 MPa ISO 527▪ Kopma Uzaması 3.5 % ISO 527▪ Çekme Modülü 3700 MPa ISO 527▪ HDT 85 °C ISO 75A▪ Sertlik 40 Barcol 934-1
	El Yatırması	

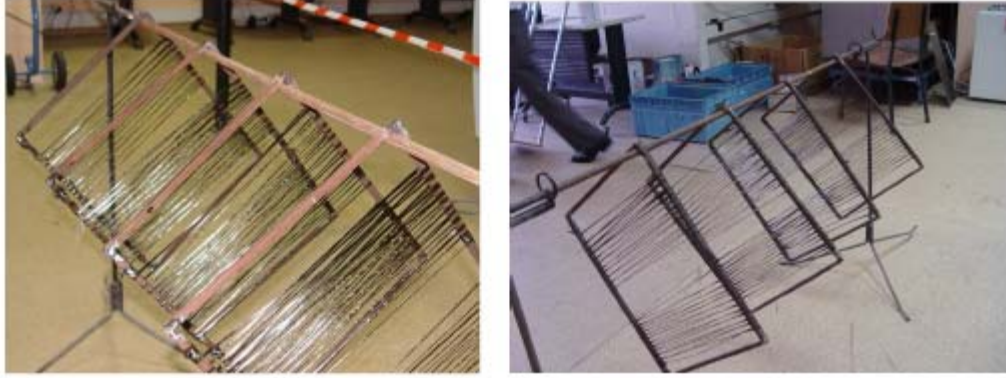
Farklı koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirildikten sonra karbon elyaflar şekil III.10.'da gösterildiği gibi hazırlanan reçine banyosundan geçirilerek reçine emdirme işlemine tabi tutulmuşlardır.



Şekil III.10. Reçine Emdirme İşlemi

Sarımı gerçekleştirilmiş elyafların reçine emdirme işlemi gerçekleştirilirken elyafların birbirine temas etmemesi ve elyafların kurutma işlemi esnasında belli bir

gerginlikte kalması gerekmektedir. Bu nedenle şekil III.11.'de gösterildiği gibi reçine emdirilmiş karbon elyaflar tasarlanmış ve üretilmiş çerçeveler üzerine sarılmıştır. Bu çerçevelerin ölçüleri reçine emdirilmiş elyafların kurutulmasında kullanılacak olan fırın ölçülerine uygun tasarlanmıştır.



Şekil III.11. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Kompozit

Farklı koşullar altında sarım işlemi gerçekleştirilen ve daha sonra şekil III.11.'de gösterildiği gibi çerçeveler üzerine sarılan karbon elyaflar kurutma aşamasına hazır hale getirilmiştir.

Tablo III.5. Ecocell Laboratuvar Kurutma Fırını Teknik Özellikleri[36]

Özellikler	Ölçüler
Hacim (lt)	55
Genişlik(mm)	400
Derinlik (mm)	390
Yükseklik (mm)	350
Çalışma Sıcaklığı (°C)	0-250
Gerekli Voltaj (V)	230

Kurutma işlemi için tablo III.5.'te teknik özellikleri verilen Ecocell laboratuvar kurutma fırını kullanılmıştır.

Şekil III.12.'de gösterildiği gibi çerçeveler fırın içine yerleştirildikten sonra 200 °C sıcaklıkta 120 dakika bekletilerek kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil III.12. Ecocell Laboratuvar Kurutma Fırını Kullanılarak Karbon Elyafların Kurutma İşlemi

Elde edilen reçine emdirilmiş karbon elyaf numuneler şekil III.13.'de görüldüğü ASTM D 4018-99 standardına göre uygun uzunluklarda kesilmiştir [34]. Numunelerin kesilmesi esnasında numaralandırma işlemi yapılmıştır. Bu numaralandırma işlemi elyafların sarıldığı koşullara göre yapılmıştır.

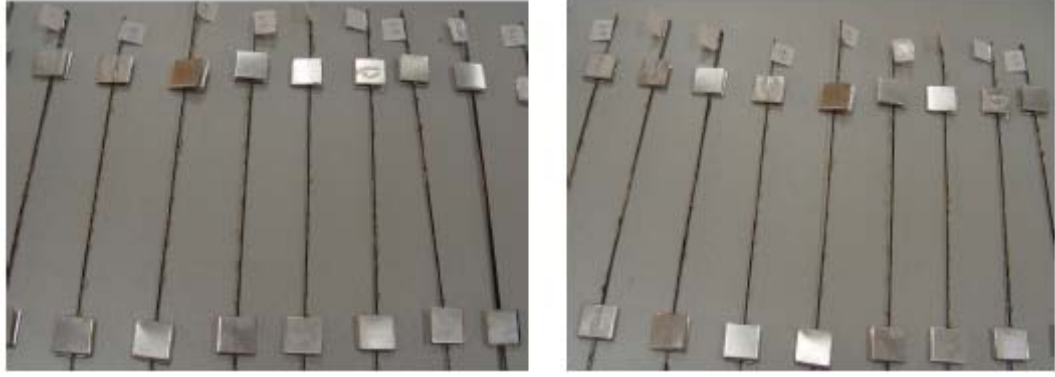


Şekil III.13. Kurutma İşlemi Sonucu Elde Edilen Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numuneleri

Elde edilen bu numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için bu numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur.

Ancak çekme deneyleri esnasında görülmüştür ki çekme makinesinin tutma çeneleri numunelere zarar vermektedir. Zarar gören bu numuneler kopma anında bağlama noktalarından kopmaktadır. Bu da yapılan deneylerin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesini ve doğru verilerin alınabilmesini engellemektedir.

Bu problemi engellemek amacıyla numunelerin tutma çeneleri içerisinde kalan kısmına, şekil III.14.'de görüldüğü gibi alüminyum malzemedeki kesilen levhalar yapıştırılmıştır.



Şekil III.14. Çekme Deneyi İçin Hazırlanmış Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numuneleri

Numunelerin her iki ucuna alüminyum levhaları yapıştırabilmek için tablo III.5.'te teknik özellikleri verilen Pattex süper Japon yapıştırıcı kullanılmıştır.

Tablo III.6. Pattex Süper Japon Yapıştırıcı Teknik Özellikleri[37]

Kullanım Yerleri ve Özellikleri
▪ Plastik (PVC, ABS, Polistren, Polistrol)
▪ Ahşap, Metal, Porselen
▪ Seramik, Deri, Kauçuk, Mukavva vb. gözenekli ve gözenekli olmayan yüzeyleri yapıştırmak için kullanılır.
▪ Çabuk kurur
▪ Solvent içermez
▪ Isı ve kimyasal direnci yüksektir
▪ İz bırakmaz

Çekme deneyi için numuneler ASTM D 4018-99 standardına göre şekil III.14.'de görüldüğü gibi hazırlanmıştır.

III.2.4. Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyaf Kompozit Çekme Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Sarım işlemleri sonucunda elde edilen kompozit numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kompozit mekaniğinden yararlanılarak gerekli hesaplar yapılmıştır.

Tablo III.7. Kompozit Malzemenin Yapımında Kullanılan Reçine ve Karbon Elyafın Mekanik Özellikleri

	A (mm²)	E (MPa)	V	ν	G (MPa)	ρ (g/cm³)
Reçine	(Ortalama) 1,1837	3000	(Ortalama) 0,7193	0,45	1034,48	1,1
Karbon Elyaf	0,4618	230000	(Ortalama) 0,2807	0,19	96638,7	1,8

Tablo III.7.'de verilen reçine ve karbon elyafın mekanik özellikleri kullanılarak elde edilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Kompozit malzemenin elyaf eksenine göre Elastiklik Modülünün (E_x) belirlenmesi;

$$E_x = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$E_x = (230000 \cdot 0,280651) + (3000 \cdot 0,719349)$$

$$E_x = 66707,7 \text{ MPa ,}$$

Kompozit malzemenin y eksenine göre Elastiklik Modülü (E_y) ise;

$$E_y = \frac{E_f E_m}{V_m E_f + V_f E_m}$$

$$E_y = \frac{230000 \cdot 3000}{(0,719349 \cdot 230000) + (0,280651 \cdot 3000)}$$

$$E_y = 4149,32 \text{ MPa,}$$

Kompozit malzemenin Poisson Oranı (ν_{xy});

$$\nu_{xy} = \nu_m V_m + \nu_f V_f$$

$$\nu_{xy} = (0,45 \cdot 0,719349) + (0,19 \cdot 0,280651)$$

$$\nu_{xy} = 0,377,$$

Kompozit malzemenin Kesme Modülü (G_{xy});

$$G_{xy} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m}$$

$$G_{xy} = \frac{1275,86.2058,8}{(0,719349.2058,8) + (0,280651.1275,86)}$$

$$G_{xy} = 1428,305 \text{ MPa},$$

ve kompozit malzemenin yoğunluğu (ρ_c);

$$\rho_c = \rho_r \cdot V_r + \rho_f \cdot V_f$$

$$\rho_c = 1,1.0,7193 + 1,8.0,2807$$

$\rho_c = 1,29 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanabilir.

Tablo III.8. Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri

Kompozit						
A (mm²)	E_x (MPa)	E_y (MPa)	V_f	ν_{xy}	G_{xy} (MPa)	ρ (g/cm³)
(Ortalama) 1,6455	66708	4149,3	1	0,377	1432,1	1,29

Tablo III.8.'de elde edilen kompozit malzemenin hesaplanan mekanik özellikleri verilmektedir.

III.3. ÇEKME DENEYLERİNİN YAPILMASI

Sarım işlemlerinde T700SC–12000 katalog numaralı sürekli karbon elyaf kullanılmıştır. Farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemlerinden sonra

karbon elyafların mukavemet değerlerinin nasıl etkilendiğinin belirlenmesi amacıyla malzeme muayene yöntemlerinden biri olan çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri için şekil III.15.'te gösterildiği gibi instron 4411 test makinesi kullanılmıştır.



Şekil III.15. Instron 4411 Test Makinesi

Şekil III.15.'te gösterilen instron 4411 test makinesinin teknik özellikleri tablo III.9.'da verilmiştir.

Tablo III.9. Instron 4411 Test Makinesi Teknik Özellikleri[38]

Instron 4411 Test Makinesi
Çift Kolonlu Sistemlerdir
5 KN (11.250 Lbf) Altındaki Testlerde Kullanılabilir
Çekme ve/veya Basma Uygulamaları için Uygundur
Belirtilen Yüke Ait %0,5 Yük Doğruluk Verir

ASTM D 4018-99 standardına göre çekme deneyleri;

- Çekme makinesinin tutma çeneleri arasındaki mesafe: 150 mm
- Çekme hızı: 5 mm/dak.
- Değerlendirmeye alınacak numune sayısı: 4 Adet

kriterleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

ASTM D 4018-99 standardına göre çekme deneylerinin geçerli sayılabilmesi için çekme numunelerinin orta bölümlerinden kopması gerekmektedir. Numunenin bağlandığı yerlerden kopması durumunda çekme deneyi dikkate alınmayacaktır. Çünkü numunenin bağlandığı yerlerden kopması, numunenin bağlama sırasında zarar gördüğü anlamına gelmektedir. Zarar gören numune daha düşük bir yük altında

kopacaktır. Bu nedenle deneyler gerçekleştirilirken numunenin bağlama sırasında zarar görmemesi için önlem alınmıştır.

III.3.1. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Deneyleri

Sarım işlemlerinden sonra kullanılan karbon elyafların mukavemet değerlerindeki değişimin belirlenebilmesi için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri kuru karbon elyaf kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ancak sarım işlemlerinin etkilerinin belirlenebilmesi için çekme deneyleri ilk olarak sarım işlemelerine tabi tutulmayan karbon elyaflar için uygulanmıştır. Böylece sarım işlemine tabi tutulan karbon elyafların mukavemet değerleri ile sarım işlemine tabi tutulmayan karbon elyafların mukavemet değerleri arasında rahatlıkla karşılaştırılma yapılabilecektir.

Bu karşılaştırma ile de sarım parametrelerinin kullanılan karbon elyafın mukavemet değerlerine etkileri belirlenmiş olacaktır.

Tablo III.7.'de sarım işlemine tabi tutulmayan karbon elyafın kuru olarak gerçekleştirilmiş çekme deneyi sonuçları verilmektedir.

Tablo III.10. Sarım İşlemine Tabi Tutulmayan Kuru Karbon Elyafın (T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları

Numune No	Max. Yük (N)	Birim Şekil Değişirme (%)	Çekme Gerilmesi (MPa)
1	764,297	2,720	1654,323
2	774,303	2,680	1675,981
3	783,721	2,740	1696,366
4	790,686	2,780	1711,442
Ortalama (± Standart Sapma):			1684,528 (± 24,832)

Tablo III.10.'de ise farklı koşullar altında sarım işlemleri ve kuru olarak çekme deneyleri gerçekleştirilen karbon elyafların sonuçları verilmektedir.



Şekil III.16. Çekme Deneyleri Sonucunda Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Kopma Şekilleri

Şekil III.16.'da çekme deneyleri sonucu elde edilen kuru karbon elyaf numunelerin kopma şekilleri gösterilmektedir.



Şekil III.17. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Hatalı Kopma Şekilleri

Şekil III.17.'te çekme deneyleri sonucu elde edilen kuru karbon elyaf numunelerin hatalı kopma şekilleri gösterilmektedir. Burada numuneler çekme makinesinin çenelerinden kaynaklanan hasardan dolayı kopmuştur. Bu nedenle hatalı numunelerin değerleri dikkate alınmamış ve bu deneyler geçersiz sayılmıştır.

Tablo III.11. Sarım İşleminde Sonra Elde Edilen Kuru Karbon Elyafın
(T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları

X (mm)	Y (mm)	Makara Çapı (mm)	Ön Gerilme Yükü (N)	Numune No	Max. Yük (N)	Birim Şekil Değişirme (%)	Çekme Gerilmesi (MPa)	KAYIP (%)
200	400	D = 78,9	19,62	1	691,115	2,560	1495,919	10
				2	705,241	2,600	1526,495	
				3	708,380	2,610	1533,290	
				4	711,029	2,640	1539,023	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1523,682 (± 19,204)								
200	400	d = 32,2	19,62	1	659,919	2,520	1428,395	14
				2	660,213	2,530	1429,032	
				3	668,159	2,530	1446,232	
				4	676,596	2,540	1464,493	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1442,038 (± 17,098)								
200	400	D = 78,9	24,52	1	618,324	2,460	1338,364	18
				2	630,783	2,480	1365,331	
				3	641,770	2,490	1389,113	
				4	652,365	2,500	1412,045	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1376,213 (± 31,630)								
200	400	d = 32,2	24,52	1	586,540	2,400	1269,567	23
				2	590,660	2,420	1278,485	
				3	603,904	2,420	1307,151	
				4	609,692	2,430	1319,679	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1293,720 (± 23,592)								
200	780	D = 78,9	19,62	1	531,996	2,330	1151,507	30
				2	538,863	2,340	1166,371	
				3	539,844	2,330	1168,494	
				4	558,581	2,360	1209,051	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1173,856 (± 24,650)								
200	780	d = 32,2	19,62	1	500,899	2,320	1084,196	35
				2	506,392	2,320	1096,087	
				3	511,395	2,320	1106,916	
				4	512,769	2,330	1109,889	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1099,272 (± 11,670)								
200	780	D = 78,9	24,52	1	462,738	2,300	1001,597	39
				2	477,158	2,310	1032,810	
				3	484,810	2,300	1049,373	
				4	489,029	2,320	1058,503	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 1035,571 (± 25,022)								
200	780	d = 32,2	24,52	1	436,545	2,260	944,903	43
				2	440,763	2,260	954,033	
				3	444,393	2,280	961,890	
				4	454,203	2,290	983,123	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 960,987 (± 16,308)								

Tablo III.10. ve tablo III.11. incelendiğinde farklı koşullar altında sarım işlemine tabi tutulan kuru elyafın mukavemet değerleri sayısal olarak görülmektedir.

Tablo III.11. verilen sarım koşullarına karşılık, sarım sonrası kuru karbon elyafın çekme mukavemeti değerleri ve ortaya çıkan kayıp yüzdesi verilmektedir.

Kuru elyaf sarma yöntemi ile farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası, kullanılan karbon elyafın çekme mukavemeti değerlerinde % 10 ile % 43 aralığında kayıp tespit edilmiştir.

III.3.2. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Kompozit Numunelerin Çekme Deneyle

Elyaf sarma teknolojisinde kuru karbon elyaf kullanılarak gerçekleştirilen uygulamaların yanı sıra reçine emdirilmiş karbon elyafların kullanıldığı uygulamalar da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu nedenle sarım işlemlerinin her iki uygulamasına çözüm bulabilmek amacı ile reçine emdirilmiş elyafların da çekme deneyleri yapılmıştır.

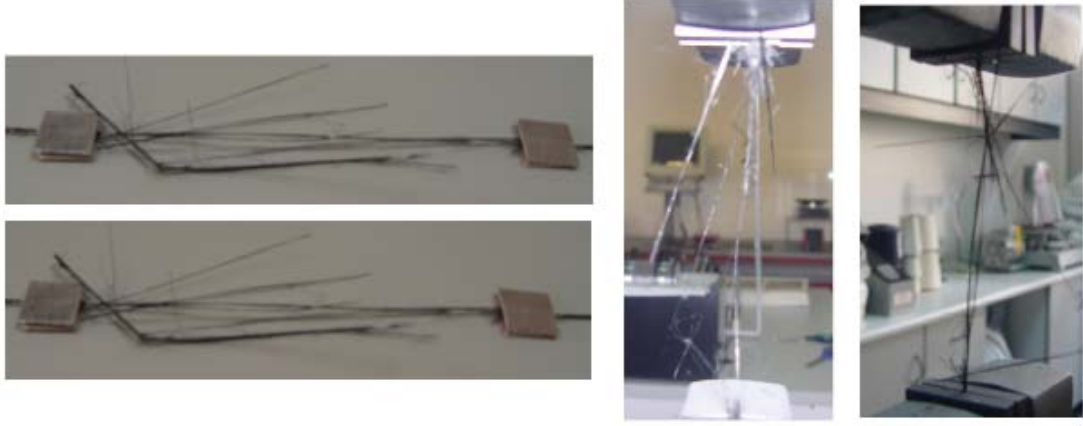
Kuru elyaflarda yapılan işlemler burada da tekrarlanmıştır. Bu uygulamada da sarım işlemlerinin etkilerinin belirlenebilmesi için çekme deneyleri ilk olarak sarım işlemelerine tabi tutulmayan reçine emdirilmiş karbon elyaflar için uygulanmıştır.

Böylece sarım işlemine tabi tutulan kompozit karbon elyafların mukavemet değerleri ile sarım işlemine tabi tutulmayan kompozit karbon elyafların mukavemet değerleri arasında rahatlıkla karşılaştırılma yapılabilecektir.

Tablo III.12.'da sarım işlemine tabi tutulmayan kompozit karbon elyafların çekme deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo III.12. Sarım İşlemine Tabi Tutulmayan Reçine Emdirilmiş Karbon Elyafın (T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları

Numune No	Max. Yük (N)	Birim Şekil Değişirme (%)	Çekme Gerilmesi (MPa)
1	1843,29	3,930	3989,825
2	1847,22	4,030	3998,318
3	1859,97	4,120	4025,922
4	1900,19	4,340	4112,981
Ortalama (± Standart Sapma):			4031,761 (± 56,296)



Şekil III.18. Çekme Deneyleri Sonucunda Kompozit Elyaf Numunelerin Kopma Şekilleri

Şekil III.18.'de çekme deneyleri sonucu elde edilen kompozit karbon elyaf numunelerin kopma şekilleri gösterilmektedir.

Reçine emdirilmiş karbon elyafların çekme deneyleri esnasında şekil III.18.'de görüldüğü gibi çekme numunesinin çok küçük parçalara ayrılarak koptuğu gözlemlenmiştir.

Tablo III.13.'da ise farklı koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirildikten sonra reçine emdirilerek kompozit haline getirilen elyafların çekme deneyleri sonuçları verilmektedir.

Tablo III.13. Sarım İşleminde Sonra Elde Edilen Reçine Emdirilmiş Karbon Elyafının (T700SC–12000) Çekme Deneyi Sayısal Sonuçları

X (mm)	Y (mm)	Makara Çapı (mm)	Ön Gerilme Yüğü (N)	Numune No	Max. Yüğü (N)	Birim Şekil Değiştirme (%)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Kayıp (%)
200	400	D = 78,9	19,62	1	1648,08	3,630	3567,273	11
				2	1662,79	3,680	3599,123	
				3	1670,64	3,710	3616,110	
				4	1676,52	3,760	3628,851	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 3602,839 (± 26,655)								
200	400	d = 32,2	19,62	1	1574,50	3,450	3408,019	15
				2	1586,27	3,490	3433,500	
				3	1596,08	3,540	3454,734	
				4	1609,82	3,580	3484,461	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 3445,179 (± 32,412)								
200	400	D = 78,9	24,52	1	1531,34	3,270	3314,591	17
				2	1534,28	3,280	3320,961	
				3	1539,18	3,300	3331,578	
				4	1547,03	3,320	3348,565	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 3328,924 (± 14,851)								
200	400	d = 32,2	24,52	1	1453,84	3,120	3146,844	20
				2	1486,21	3,170	3216,916	
				3	1493,08	3,210	3231,779	
				4	1507,79	3,240	3263,630	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 3214,792 (± 49,312)								
200	780	D = 78,9	19,62	1	1364,57	2,880	2953,617	26
				2	1368,49	2,890	2962,110	
				3	1384,19	2,940	2996,084	
				4	1388,11	3,040	3004,578	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 2979,097 (± 25,004)								
200	780	d = 32,2	19,62	1	1301,78	2,700	2817,721	30
				2	1303,74	2,730	2821,968	
				3	1312,57	2,780	2841,078	
				4	1321,40	2,820	2860,188	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 2835,239 (± 19,490)								
200	780	D = 78,9	24,52	1	1256,66	2,570	2720,045	32
				2	1268,43	2,610	2745,526	
				3	1275,30	2,640	2760,390	
				4	1285,11	2,670	2781,623	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 2751,896 (± 25,890)								
200	780	d = 32,2	24,52	1	1207,61	2,390	2613,877	35
				2	1213,49	2,440	2626,617	
				3	1222,32	2,480	2645,727	
				4	1230,17	2,500	2662,714	
Ortalama Çekme Gerilmesi (± Standart Sapma): 2637,234 (± 21,445)								

Tablo III.12. ve tablo III.13. incelendiğinde farklı koşullar altında sarım işlemine tabi tutulan reçine emdirilmiş karbon elyafın mukavemet değerleri sayısal olarak görülmektedir.

Tablo III.13. verilen sarım koşullarına karşılık sarım sonrası reçine emdirilmiş karbon elyafın mukavemet değerleri ve ortaya çıkan kayıp yüzdesi verilmektedir.

Reçine emdirilmiş elyafların farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası çekme mukavemeti değerlerinde % 11 ile % 35 aralığında kayıp tespit edilmiştir.

III.3.3. Alüminyum Makara ile Karbon Elyaf Arasındaki Dinamik Sürtünme Katsayısının Teorik ve Deneysel Hesaplanması

Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınçlı tüpler ve boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu tüplerde aranan en önemli özellikler yüksek basınca karşı dayanım ve hafifliktir. Bu tüplerin mukavemetlerinin artırılması için yapılan en önemli işlemlerden birisi elyaf sarma teknolojisi ile tüp üzerine karbon elyaf sarmaktır. Tüp üzerine sarılan karbon elyaflar, tüpün maruz kalacağı iç basınçtan dolayı çekme gerilmelerine maruz kalacaktır. Çekme gerilmelerine karşı yüksek mukavemet özelliklerine sahip karbon elyaflar böylece tüpün mukavemetini arttırmış olacaktır. Sarım esnasında tüp üzerine sarılan karbon elyaflar arasında oluşması muhtemel boşlukların önüne geçebilmek için kullanılan karbon elyafın üzerinde belli bir gerginlik bulunması gerekir. Bu gerginliğin istenilen değerlerde olabilmesi için elyaf sarma makinelerinde ön gerilme ünitesi bulunmaktadır. Ön gerilme ünitesinde bulunan makaralar ile kullanılan karbon elyaf arasında sürtünme meydana gelmektedir. Elyaf sarma teknolojisi ile imalatta karbon elyafın sarım işlemi esnasında dayanım kaybına uğradığı bilinmektedir. Ortaya çıkan bu dayanım kaybının nedenlerinden bir tanesi karbon elyafların maruz kaldığı sürtünmedir.

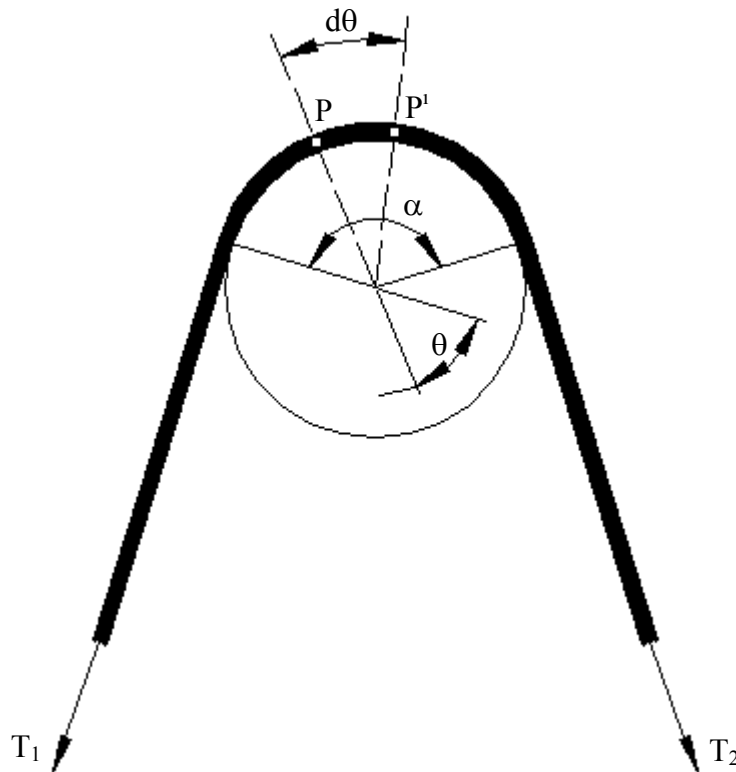
Bu çalışma ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında sürekli karbon elyaf malzeme kullanılarak kuru elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısı üzerine herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Ancak tabaka halinde bulunan kompozit karbon elyaf ve cam elyafların sürtünme katsayısı ile ilgili birden çok

araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmalar özellikle farklı matris malzemesi kullanılarak elde edilen kompozit elyaflar üzerine yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışmalara örnek olarak, J. Schon [39], birbirine cıvata ile bağlanmış alüminyum iki malzeme arasından karbon elyaf emdirilmiş epoksi kompozit malzemenin çekilmesi esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır ve sürtünme katsayısının çeşitli parametrelere bağlı olarak 0,23 – 0,68 aralığında değiştiğini ifade etmiştir.

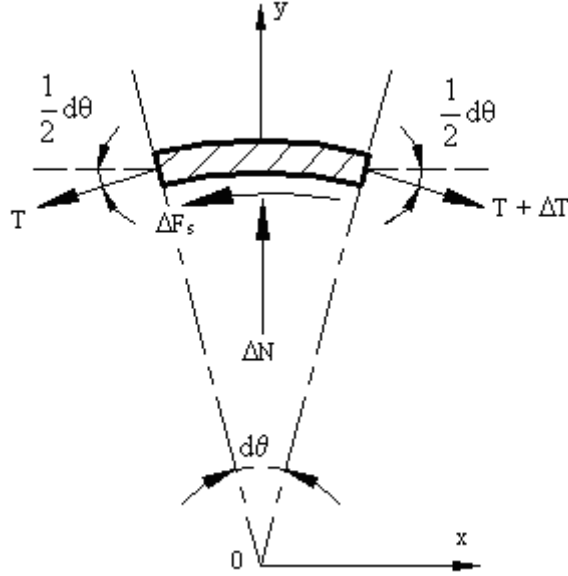
J. Schon başka bir çalışmasında [40], aynı şekilde birbirine cıvata ile bağlanmış alüminyum iki malzeme arasından karbon elyaf emdirilmiş epoksi malzemenin çekilmesi esnasında ortaya çıkan sürtünme kuvveti, karbon elyaf üzerinde sürtünmeden kaynaklanan aşınma ve yorulma değerlerinin belirlenmesi için elektron mikroskop kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır.

J. Schon bir diğer çalışmasında da [41], levha halindeki elyaf emdirilmiş epoksi malzemeler arasında ortaya çıkan sürtünme ve aşınma mekanizmalarının elektron mikroskop kullanarak incelenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır.



Şekil III.19. Ön Gerilme Sisteminde Bulunan Makara ile Karbon Elyaf Arasındaki Sürtünmenin Modellenmesi[42]

Şekil III.19.'de kendi ekseninde serbest dönebilen makara ve sarım esnasında üzerinden geçen karbon elyaf bulunmaktadır. Sarım işlemi T_2 yönünde çekilerek gerçekleştirilmektedir. Sarım esnasında servo motor tarafından çekilen elyaf üzerinde T_2 çekme kuvveti ve ön gerilme sistemi tarafından oluşturulan T_1 ön gerilme kuvveti oluşmaktadır.



Şekil III.20. Serbest Çizim Diyagramı[42]

Karbon elyaf sürtünmesinin bulunabilmesi için T_1 ve T_2 arasındaki bağıntının kurulması gerekir. Burada α açısı, karbon elyaf ile makaranın temas ettiği yüzeyin merkez açısı olup her zaman radyan cinsinden ölçülür. Eğer elyaf makaraya n defa tam devir yapacak olursa, $\alpha=2\pi n$ radyan olur. Çekme kuvveti T_2 ; ön gerilme kuvveti T_1 kuvvetinin yanı sıra elyafın makara üstündeki sürtünmesini de karşılaması gerekir ki bu nedenle $T_2 > T_1$ olmalıdır. Bu amaçla şekil III.19.'da alınan P ve P' noktaları arasındaki $d\theta$ merkez açılı yay elemanının şekil III.20.'de gösterilen serbest çizim diyagramı çizilir. Burada makara tespit milinden elyafa etkiyecek ΔN normal kuvveti ile ΔF_s sürtünme kuvveti söz konusudur. Hareketin tam başlayacağı anda bu kuvvetler arasındaki ilişki statik sürtünme katsayısına bağlı olarak;

$$\Delta F_s = \mu_s \cdot \Delta N \quad (III.1.)$$

bağıntısı şeklinde yazılabilir.[42] Daha sonra şekil III.19. dikkate alınır ise, buradaki denge denklemi, $\Sigma F_x = 0$ dan,

$$(T + \Delta T)\cos\left(\frac{1}{2}d\theta\right) - T\cos\left(\frac{1}{2}d\theta\right) - \mu_s \Delta N = 0 \quad (\text{III.2.})$$

ve $\Sigma F_y = 0$ dan,

$$-(T + \Delta T)\sin\left(\frac{1}{2}d\theta\right) - T\sin\left(\frac{1}{2}d\theta\right) + \Delta N = 0 \quad (\text{III.3.})$$

denklemleri yazılır.[42]

Denklem III.2. ve Denklem III.3.'ten ΔN yok edildikten sonra elde edilen ifade $\Delta\theta$ 'ya bölünür ve denklem yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\Delta T}{d\theta} \cos\left(\frac{1}{2}d\theta\right) - \mu_s \left(T + \frac{1}{2}\Delta T\right) \frac{\sin\left(\frac{1}{2}d\theta\right)}{\left(\frac{1}{2}d\theta\right)} = 0 \quad (\text{III.4.})$$

denklemini elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldı ise;

$$\frac{dT}{d\theta} - \mu_s T = 0, \quad (\text{III.5.})$$

şeklinde bir diferansiyel denkleme dönüşür.

Karbon elyafın makaraya sürtüdüğü dairesel yayın merkez açısı α 'dır. Buna göre denklem III.5. $d\theta$ ile çarpılır ve integral şeklinde yazılırsa;

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = \int_0^\alpha \mu_s d\theta \quad (\text{III.6.})$$

elde edilir. Denklem III.6.'nın integrali alınır ise;

$$T_2 = T_1 e^{\mu_s \alpha}, \quad (\text{III.7.})$$

bulunur.[44]

Teorik olarak elde edilen denklem III.7.'de ;

T_1 = Ön Gerilme Kuvveti

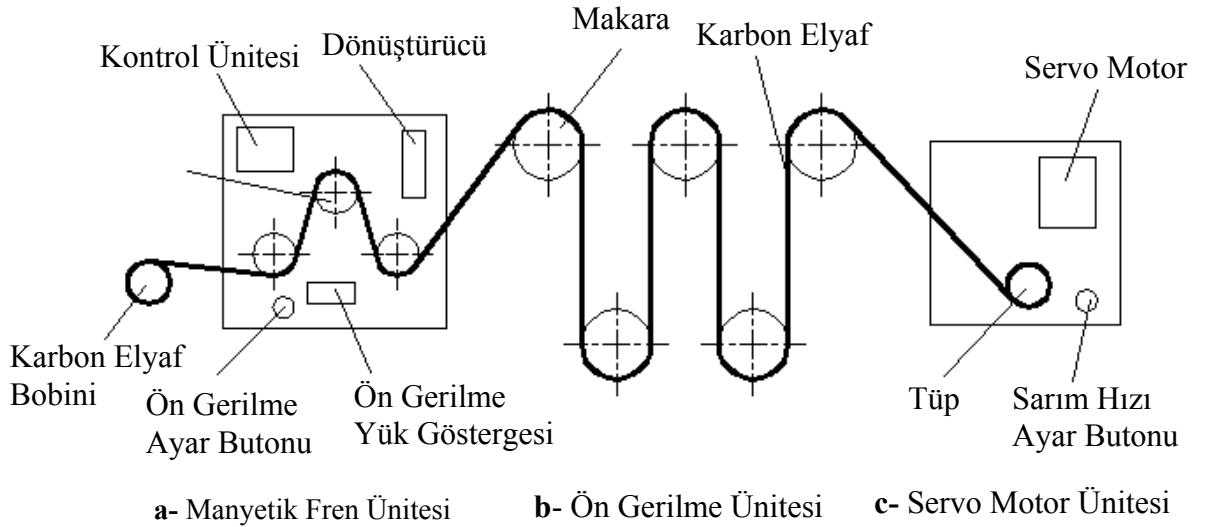
T_2 = Çekme Kuvveti

μ = Sürtünme Katsayısı

α = Temas Açısı

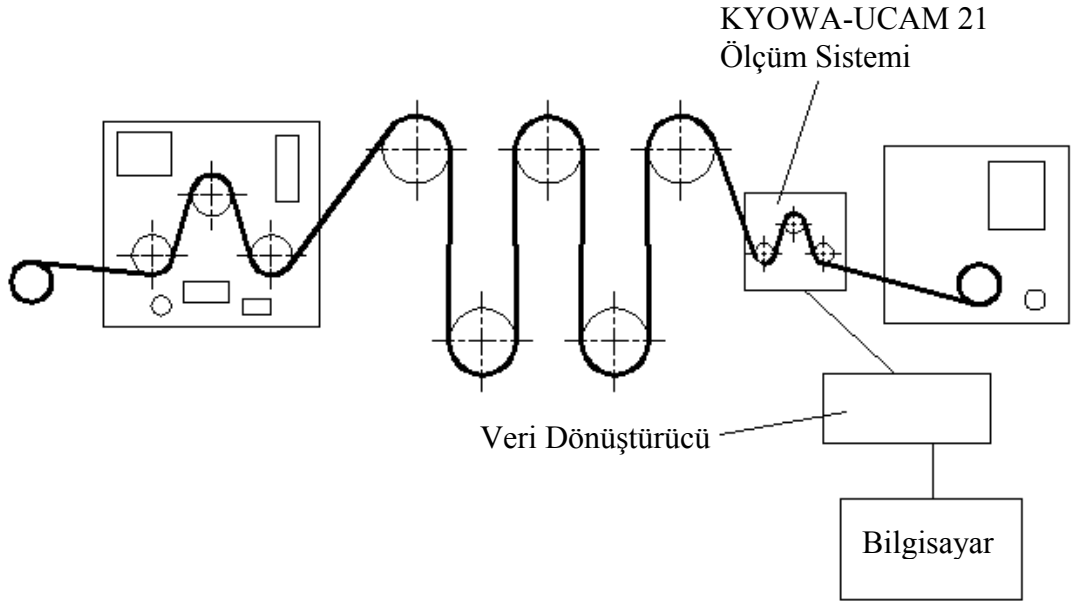
olarak tanımlanmıştır.

Denklem III.7. kullanılarak karbon elyaf ile ön gerilme sisteminde bulunan makaralar arasında gerçekleşen sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Sürtünme kuvvetinin hesaplanabilmesi için sarım düzeneğinde ayarlanan ön gerilme kuvveti (T_1) ile birlikte ön gerilme sisteminin çıkışında ölçülen çekme kuvvetinin (T_2) de ölçülmesi gereklidir.



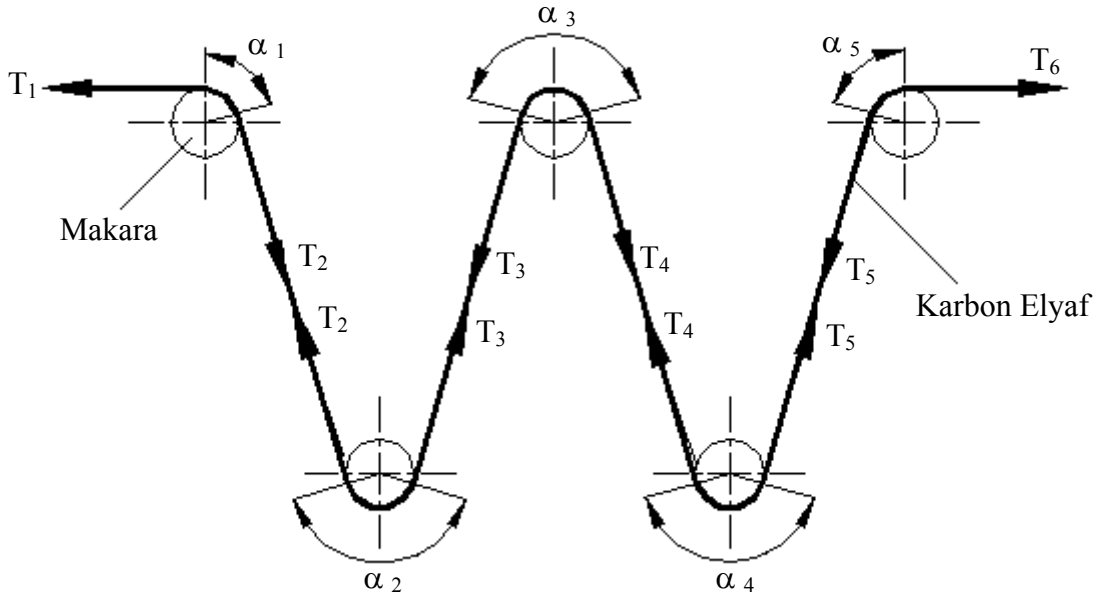
Şekil III.21. Elyaf Sarma Sisteminin Şematik Gösterimi

Şekil III.21.'de gösterilen elyaf sarma sisteminden de anlaşılacağı gibi ön gerilme kuvveti (T_1), ön gerilme yük göstergesinden okunan değerdir. Ancak bu sistemde çıkış yükünün okunabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle çekme kuvvetinin (T_2) ölçülmesinde şekil III.8.'te gösterilen KYOWA-UCAM 21 ölçüm sistemi kullanılmıştır. Bu sistem yukarıda da anlatıldığı gibi sistemin kalibrasyonunda da kullanılmıştır.



Şekil III.22. KYOWA-UCAM 21 Ölçüm Sistemi Kullanılarak Çekme Kuvvetinin Ölçümü

Şekil III.22.'de gösterildiği gibi KYOWA-UCAM 21 ölçüm sisteminden ölçülen veriler bir dönüştürücü kullanılarak bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil III.23. Elyaf İle Makara Arasındaki Sürtünmenin Belirlenmesinde Ölçülen Parametreler

Şekil III.23. incelendiğinde ön gerilme sistemi üzerinde aynı çapta 5 adet makara ve bu makaralar arasından geçen karbon elyaf görünmektedir. Karbon elyaf T_2 yönünde çekilen karbon elyaf belli konumlarda sabitlenmiş makaralar arasından geçmektedir. Karbon elyafın makaralara temas açıları $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ve α_5 olarak tanımlanmıştır.

Denklem III.7.'de sürtünme katsayısının hesaplanabilmesi için gerekli düzenlemeler dinamik sürtünme için yapılır ise;

$$T_2 = T_1 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_1} \quad (\text{III.8.})$$

$$T_3 = T_2 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_2} = (T_1 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_1}) \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_2} \quad (\text{III.9.})$$

$$T_4 = T_3 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_3} = \left[(T_1 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_1} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_2}) \right] e^{\mu_d \cdot \alpha_3} \quad (\text{III.10.})$$

$$T_5 = T_4 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_4} = \left[(T_1 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_1} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_2} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_3}) \right] e^{\mu_d \cdot \alpha_4} \quad (\text{III.11.})$$

$$T_6 = T_5 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_5} = \left[(T_1 \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_1} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_2} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_3} \cdot e^{\mu_d \cdot \alpha_4}) \right] e^{\mu_d \cdot \alpha_5} \quad (\text{III.12.})$$

$$T_6 = T_1 \cdot (e^{\mu_d})^{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5} \quad (\text{III.13.})$$

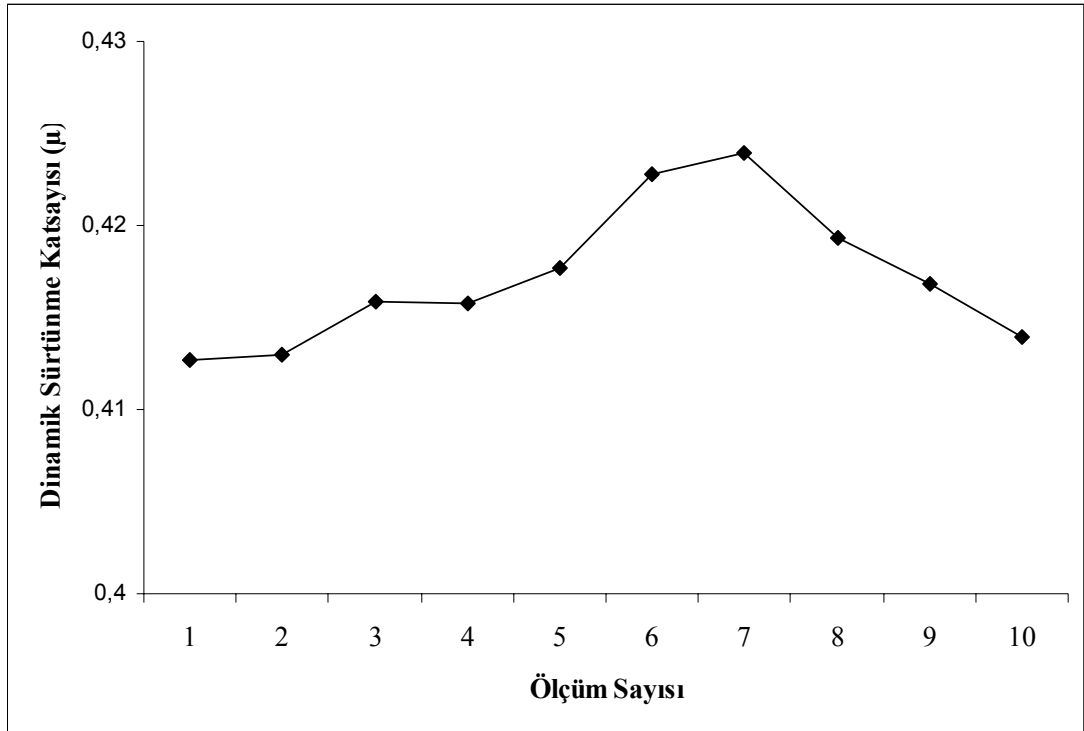
denklemleri elde edilir.

Denklem III.13.'de tanımlanan parametrelerin deneylerle ölçülen değerleri yerine yerleştirilir ve hesaplamaları yapılırsa tablo III.14.'de verilen değerler elde edilir.

Tablo III.14. Ölçümü Yapılan Parametre Değerlerine Bağlı Sürtünme Katsayısı Değerleri

	Ön Gerilme Kuvveti T_1 (N)	Çekme Kuvveti T_2 (N)	Toplam Temas Açısı (α) (Rad)	Dinamik Sürtünme Katsayısı (μ_d)
1	1,2753	88,746	10,28	0,41270
2	1,2753	88,974	10,28	0,41295
3	1,2753	91,712	10,28	0,41590
4	1,2753	91,598	10,28	0,41578
5	1,2753	93,423	10,28	0,41770
6	1,2753	98,442	10,28	0,42279
7	1,2753	99,583	10,28	0,42391
8	1,2753	95,020	10,28	0,41935
9	1,2753	92,625	10,28	0,41687
10	1,2753	89,887	10,28	0,41395
Dinamik Sürtünme Katsayısı (\pm Standart Sapma):				0,417 (\pm 0,003)

Tablo III.14.'te verilen değerler incelendiğinde aynı ön gerilme kuvveti için 10 adet ölçüm yapıldığı görülmektedir. Her ölçümde çekme kuvvetleri arasında PI sistemin hassasiyetine bağlı olarak dalgalanma gözlemlenmiştir.



Şekil III.24. Karbon Elyaf ile Alüminyum Makara Arasındaki Dinamik Sürtünmenin PI Kontrollü Sistem ile Ölçümü

Şekil III.24.'de PI kontrollü sistem kullanılarak karbon elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısı için 10 adet ölçüm yapıldığı ve her bir ölçüm için hesaplanan değerlerin değişimi gözlemlenmektedir.

Ancak PI kontrollü sistemin hassasiyetine bağlı olarak ölçümler arasında belli bir dalgalanma gözlemlenmektedir.

Bu noktadan hareketle karbon elyaf ile alüminyum makara arasındaki dinamik sürtünme katsayısının ortalama çekme kuvveti dikkate alınarak $\mu_d=0,417$ (S.S. $\pm 0,003$) olarak hesaplanmıştır.

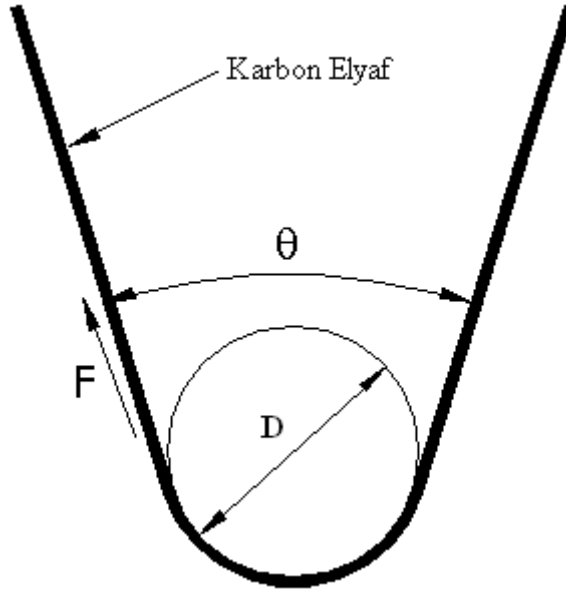
Böylece ön gerilme ünitesinde bulunan makaralar ile sarım işlemlerinde kullanılan sürekli karbon elyaf arasında gerçekleşen sürtünme kuvvetleri hesaplanabilecektir.

BÖLÜM IV

ELYAF SARMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL MODELLENMESİ

IV.1. VERİLERİN TOPLANMASI VE DÜZENLENMESİ

Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen elyaf sarma sisteminde sarım işlemleri farklı koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Şekil IV.1.'de gösterilen elyaf sarım açısı (θ) ve ön gerilme kuvveti (F) parametrelerinin değiştirilmesi ile elde edilen toplam sekiz farklı koşul altında sarım işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil IV.1. Sarım Parametreleri

Bütün koşullar için, sarım işlemlerinde uygulanan parametre değerleri tablo IV.1.'de verilmiştir. Farklı koşullar altında gerçekleştirilmiş sarım işlemleri ile elde edilen çekme numuneleri çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri sonucunda elde edilmiş çekme kuvvet (P) değerleri tablo IV.1.'de verilmiştir.

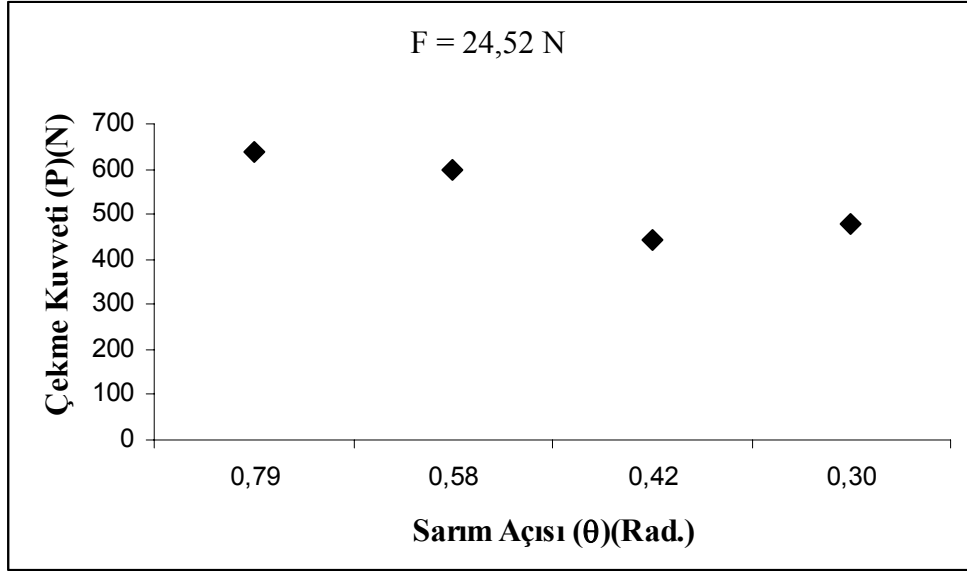
Tablo IV.1. Kestirim Değerleri

Sarım Açısı (θ) (Rad)	Ön Gerilme Kuvveti (F) (N)	Max. Çekme Kuvveti (P) (N)
0,79	19,62	703,9
0,58	19,62	666,2
0,42	19,62	507,8
0,30	19,62	542,3
0,79	24,52	635,8
0,58	24,52	597,7
0,42	24,52	443,9
0,30	24,52	478,4

Tablo IV.1.'de verilen çekme kuvveti (P) değerleri her koşul için çekme standardına göre uygun olarak kabul edilen farklı 15'er ölçümün aritmetik ortalaması dikkate alınmıştır.

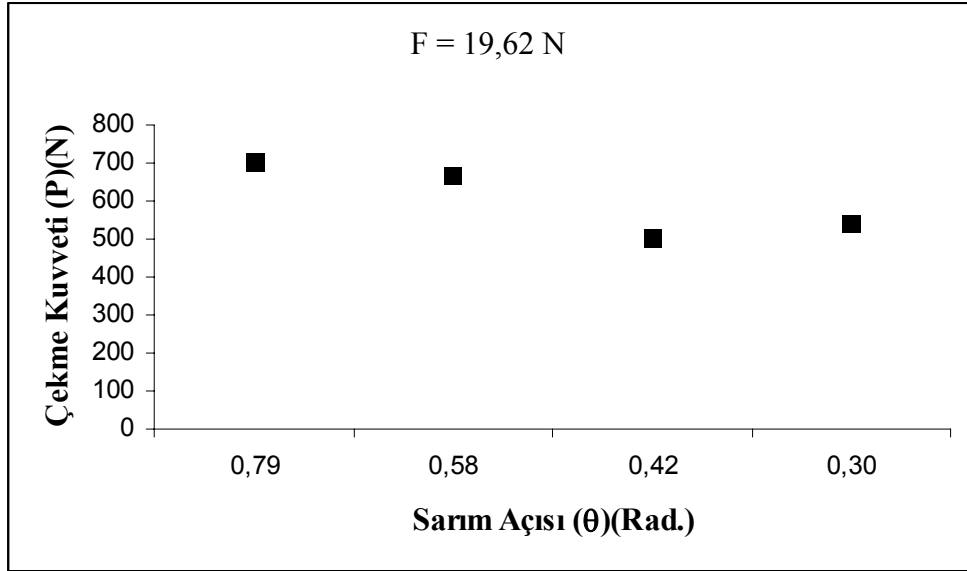
IV.1.1. Verilerin İncelenmesi

Tablo IV.1.'de verilen sarım açısı (θ) ve ön gerilme kuvveti (F) değerleri incelendiğinde sarım açısının (θ) 4 farklı değerinin 2 kez, ön gerilme kuvvetinin (F) 2 farklı değerinin 4 kez tekrarlandığı görülmektedir. Bu duruma ait en iyi modelin ortaya çıkarılabilmesine yardımcı olması amacıyla ön gerilme kuvvetinin (F) her bir değerine karşılık sarım açısının (θ), çekme kuvvetine (P) göre serpilme diyagramı şekil IV.2. ve şekil IV.3.'te verilmiştir.



Şekil IV.2. $F=24,52$ N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Şekil IV.2.'de gösterildiği gibi dört farklı sarım açısı (θ)'nın değerlerine karşılık ön gerilme kuvveti (F) parametresinin 24,52 N değerinde sabit tutulmasıyla elde edilmiş, sarım açısı değerlerine karşılık çekme kuvveti (P) değerlerinin serpilme diyagramı verilmiştir.



Şekil IV.3. $F=19,62$ N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Şekil IV.3.'te gösterilen serpilme diyagramı ise ön gerilme kuvvetinin 19,62 N değerinde sabit tutulması ile elde edilen, sarım açısı değerlerine karşılık çekme kuvveti (P) değerlerinin serpilme diyagramını göstermektedir.

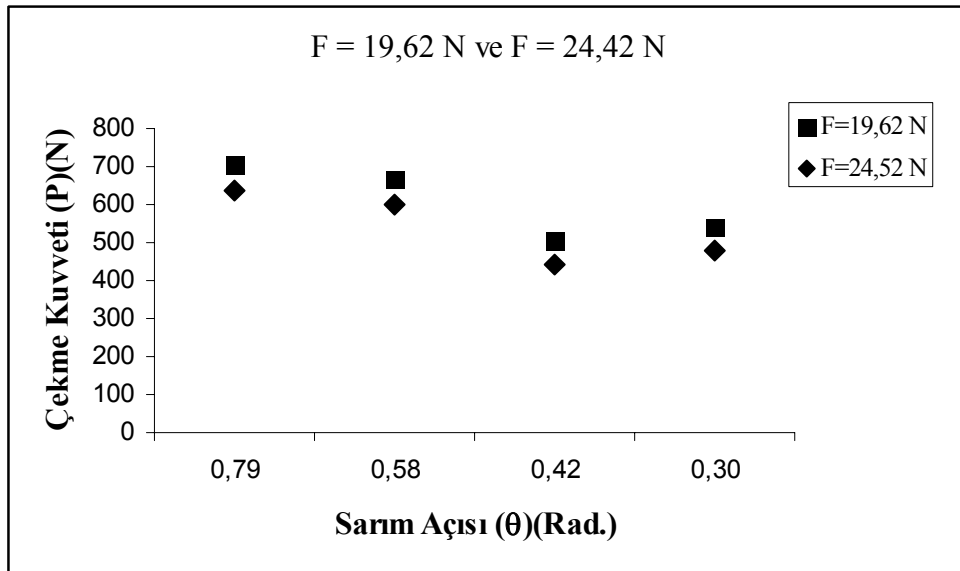
Bu serpilme diyagramlarının oluşturulması eğri uydurma işlemi yapılırken daha hassas değerlerin elde edilebilmesi için uygun bir fonksiyon seçiminde yardımcı olacaktır.

Şekil IV.2. ve şekil IV.3.'te verilen serpilme diyagramları incelendiği zaman, θ değerinin yaklaşık olarak Sinüs fonksiyonuna benzer bir dağılım sergilediği görülmektedir. Bu durumda istatistiksel eğri uydurma tekniklerinin yardımıyla, her iki durum için gösterilen noktalardan geçen bir eğri olarak

$$P = A + B \cdot \sin\left(\frac{\pi(\theta - C)}{D}\right) \quad (IV.1.)$$

önerilebilir [43].

Denklem IV.1., P değerinin θ 'ya bağlı olduğu Fourier eğrisidir. Ancak denklem IV.1. sadece θ değişkenine bağlı bir denklemdir. Diğer yandan, iki farklı F değerlerinin dikkate alınması durumunda oluşan serpilme diyagramı Şekil IV.4.'de verilmiştir.



Şekil IV.4. F=19,62 N ve F=24.52 N için Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) ne Bağlı Serpilme Diyagramı

Bu analizde oluşturulmak istenen, ön gerilme kuvveti (F) ve sarım açısı (θ) değerlerine bağlı çekme kuvveti (P) değerlerinin tahminidir. Şekil IV.4. ve Tablo IV.1.'den de görülebileceği gibi sabit sarım açısı (θ) altında farklı ön gerilme kuvveti (F) değerleri kullanılarak gerçekleştirilen sarım işlemlerinde ön gerilme kuvvetinin arttırılması çekme kuvveti (P) değerlerinin azalmasına sebep olacaktır. Çünkü ön gerilme yükünün artması kullanılan karbon elyafın göreceği hasarı arttıracaktır. Bu durumda yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında P değeri ile F değeri arasında lineer ters orantılı bir ilişki olduğu görülebilmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda denklem IV.1. yeniden düzenlenir ise;

$$P = A.F + B.\text{Sin}\left(\frac{\pi(\theta - C)}{D}\right) \quad (\text{IV.2.})$$

elde edilir. Burada çekme kuvveti (P) değerinin ön gerilme (F) ile lineer, sarım açısı (θ) ile lineer olmayan (nonlinear) bir ilişki olduğu kabulü yapılarak denklem IV.2. önerilmiştir.

Denklem IV.2.'de önerilen iki değişkenli nonlinear modelin parametre değerlerinin tahmini için Statistika istatistik paket programı kullanılmıştır.[43] Bu programda nonlinear regrasyon modelinin parametre tahminleri için Gauss Newton yöntemi kullanılmıştır. Denklem IV.2.'de verilen A, B, C, D parametrelerinin tahmini için standart olarak başlangıç değerleri A=1, B=1, C=1, D=1 olarak alınmıştır. Yapılan analiz sonucu Çekme Kuvveti (P)değerlerinin, ön gerilme (F) ve sarım açısı (θ) değerlerine bağlı olarak % 87,31 açıklanabildiği görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre modelin elde edilen parametre tahminleri tablo IV.2.'de verilmiştir.

Tablo IV.2. Parametrelerin Tahmin Değerleri[43]

Parametre	Tahmin
A	-7,17
B	836,80
C	65,22
D	4,22

Buna göre elde edilen model denklem IV.3.'te gösterildiği gibi;

$$P = -7,17.F + 836,80.\sin\left(\frac{\pi(\theta + 65,22)}{4,22}\right) \quad (\text{IV.3.})$$

elde edilmiştir.[43]

Burada ön gerilme kuvvetinin çok düşük seçilmesi durumunda kullanılan karbon elyafın önceden belirlenen sarım yörüngesine oturması mümkün olmayacaktır. Bu durum sarım işleminin gerçekleşmesini engelleyecektir. Diğer bir yandan ön gerilme kuvvetinin çok yüksek seçilmesi durumunda da sarım esnasında karbon elyafın kopmasına neden olacağından bu durum da sarım işleminin gerçekleşmesini engelleyecektir.

Denklem IV.3.'te tanımlanan diğer bir sarım parametresi de sarım açısıdır. Sarım açısının belirlenmesi aşamasında, sarım açısını oluşturan makara çapı ve makaralar arasındaki mesafeler dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak denklem IV.3.'te verilen ön gerilme kuvveti ve sarım açısı değerlerinin uygun değerlerde seçilmesi çok önemlidir. Aksi takdirde verilen bu denklemden elde edilecek olan sayısal değerler anlamsız olacaktır.

Tablo IV.3. Spearman Korelasyon Katsayısı Kullanılarak Ön Gerilme Kuvveti (F) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi[44]

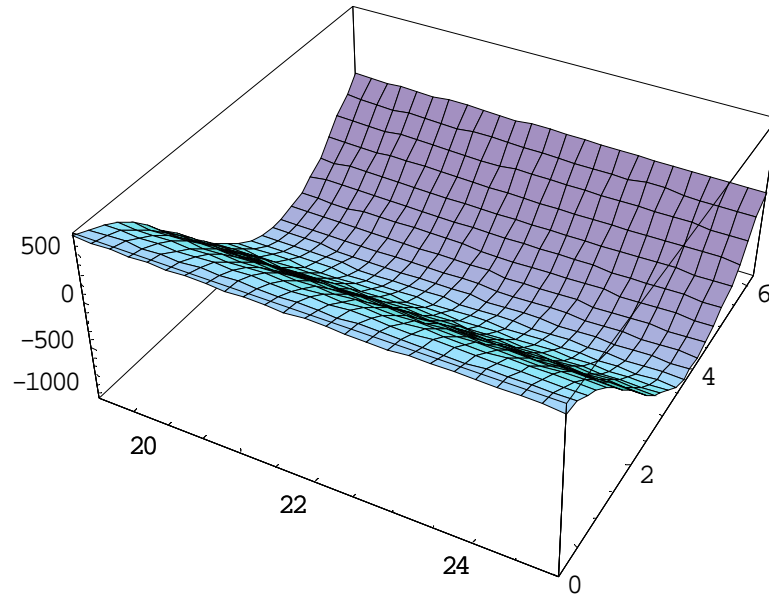
Yöntem	Parametre	Spearman Korelasyon Katsayısı
Non Parametrik	Ön Gerilme Kuvveti (F)	- 0,436
	Çekme Kuvveti (P)	

Tablo IV.3.'te spearman korelasyon katsayısı kullanılarak hesaplanan ön gerilme kuvveti (F) ve çekme kuvveti (P) parametreleri arasındaki ilişki – 0,436 olarak belirlenmiştir. Elde edilen spearman korelasyon katsayısına göre ön gerilme kuvveti ile çekme kuvveti arasında negatif bir ilişki vardır. Ön gerilme kuvveti arttıkça karbon elyafın göreceği hasar artacağından dolayı çekme kuvveti ve dolayısıyla çekme gerilmesi düşecektir.

Tablo IV.4. Spearman Korelasyon Katsayısına Göre Sarım Açısı (θ) ve Çekme Kuvveti (P) Parametreleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi[44]

Yöntem	Parametre	Spearman Korelasyon Katsayısı
Non Parametrik	Sarım Açısı (θ)	+ 0,781
	Çekme Kuvveti (P)	

Tablo IV.4.'te spearman korelasyon katsayısı kullanılarak hesaplanan sarım açısı (θ) ve çekme kuvveti (P) parametreleri arasındaki ilişki + 0,781 olarak belirlenmiştir. Elde edilen spearman korelasyon katsayısına göre sarım açısı ile çekme kuvveti arasında pozitif güçlü bir ilişki vardır. Sarım açısı arttıkça karbon elyafın maruz kalacağı eğilme gerilmelerinden dolayı göreceği hasar azalacağından dolayı çekme kuvveti ve dolayısıyla çekme gerilmesi artacaktır.



Şekil IV.5. Sarım Açısı (θ) ve Ön Gerilme Kuvveti'ne (F) Bağlı Çekme Kuvveti (P) Yüzey Denklemi[45]

Tahmin edilen P değerleri ile elde edilen yüzey şekil IV.5.'de verilmiştir.

Böylece üretim parametrelerinin kullanılan elyaf çekme mukavemetine etkisinin belirlenmesi ve tasarım aşamasında yardımcı olabilmesi için bir istatistiksel model önerilmiştir.

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Elyaf Sarma Teknolojisi (Filament Winding) ile üretilen endüstriyel FRP kompozitlerde üretimden sonra ortaya çıkan ürünün mekanik özelliklerindeki değişimin nedenleri teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Elyaf sarma teknolojisi ile üretimi yapılan endüstriyel ürünlerin başında özellikle yüksek basınç tüpleri ve basınçlı gazların taşınmasında kullanılan boru şeklindeki simetrik elemanlar gelmektedir. Bu tür yüksek basınç tüplerinin (özellikle hidrojen yakıt teknolojisinde) kullanımı ve önemi gün geçtikçe artmaktadır. Bu tüplerde aranan en önemli özellikler yüksek basınca karşı dayanım ve hafifliktir. Bundan dolayı bu tüplerin tasarımı ve üretimi çok hassas yapılmaktadır. Bu tür elyaf sarma yöntemi ile yapılan ürünler, kimyasal çevre koşullarından mukavemet testlerine kadar genel olarak devletler tarafından belirlenen testlerden geçmektedir. Bu testlerden olumlu sonuç almanın tek yolu ise çok detaylı bir tasarım ve modellemedir.

Özellikle sürekli karbon elyafın (CF) kullanıldığı elyaf sarma teknolojisi ile imalatta dayanım kaybına uğrayan elyafın kayıp miktarının öngörülebilmesi hem imalat açısından hem de endüstriyel tasarım açısından büyük kolaylık getirecektir.

V.1. DENEYLERİN SAYISAL SONUÇLARI

Elyaf sarma yöntemlerinden kuru elyaf sarma yöntemi ve ıslak elyaf sarma yöntemi ile deneyler gerçekleştirilmiş ve her iki yöntemin üstünlükleri ve kısıtlılıkları karşılaştırılmıştır.

V.1.1. Kuru Elyaf Sarma Yönteminde Kullanılan Sürekli Karbon Elyafıta Hasar Tespiti

Kuru elyaf sarma yöntemi ile farklı koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirilerek elde edilen kuru karbon elyaf numunelerin çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar tablo V.1.'de verilmiştir.

Tablo V.1. Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Sarım Koşullarına Bağlı Olarak Çekme Gerilmeleri

Koşul Gösterimi	Çekme Gerilmeleri (MPa)	Kayıp (%)
Hasarsız Kuru Elyaf	1684,528	
19,62 N_D_200_400	1523,682	10
19,62 N_d_200_400	1442,038	14
24,52 N_D_200_400	1376,213	18
24,52 N_D_200_400	1293,720	23
19,62 N_D_200_780	1173,856	30
19,62 N_d_200_780	1099,272	35
24,52 N_D_200_400	1035,571	38
24,52 N_D_200_400	960,987	43

Tablo V.1.'de verilen bilgiler ışığında, farklı sarım koşulları altında sarım işlemi gerçekleştirilmiş kuru karbon elyaf numuneler ile sarım işlemine tabi tutulmamış kuru karbon elyaf numunelerin çekme gerilmeleri sayısal olarak karşılaştırılabilmektedir.

Kuru karbon elyaf kullanarak farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası, kullanılan karbon elyafın % 10 ile % 43 arasında çekme mukavemeti değerlerinde kayıp tespit edilmiştir.

V.1.2. Islak Elyaf Sarma Yönteminde Kullanılan Reçine Emdirilmiş Sürekli Karbon Elyafta Hasar Tespiti

Islak elyaf sarma yöntemi ile farklı koşullar altında sarım işlemleri gerçekleştirilerek elde edilen reçine emdirilmiş karbon elyaf numunelerin çekme deneyleri yapılmış ve elde edilen sayısal sonuçlar tablo V.2.'de verilmiştir.

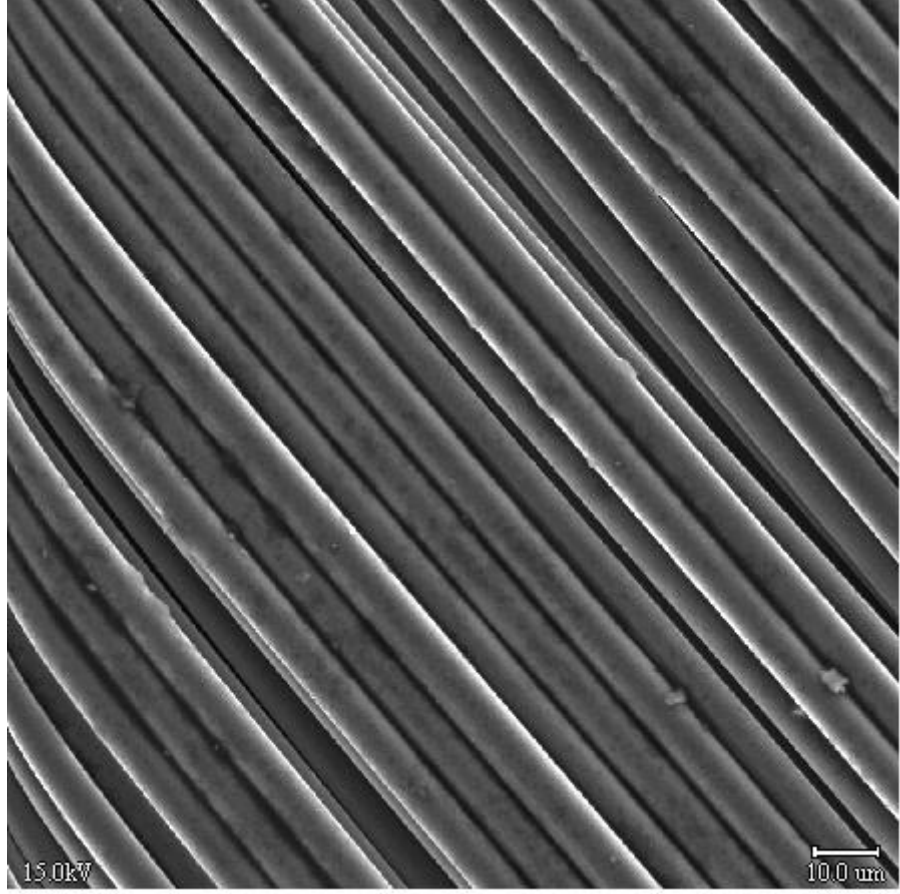
Tablo V.2. Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Malzemelerin Sarım Koşullarına Bağlı Olarak Çekme Gerilmeleri

Koşul Gösterimi	Çekme Gerilmeleri (MPa)	Kayıp (%)
Hasarsız Kompozit Elyaf	4031,761	
19,62 N_D_200_400	3602,839	11
19,62 N_d_200_400	3445,179	15
24,52 N_D_200_400	3328,924	17
24,52 N_D_200_400	3214,792	20
19,62 N_D_200_780	2979,097	26
19,62 N_d_200_780	2835,239	30
24,52 N_D_200_400	2751,896	32
24,52 N_D_200_400	2637,234	35

Tablo V.2.'de verilen bilgilere göre; farklı sarım koşulları altında işlem görmüş reçine emdirilmiş karbon elyaf malzeme ile sarım işlemine tabi tutulmamış reçine emdirilmiş karbon malzemenin çekme gerilmeleri sayısal olarak karşılaştırılabilir.

Reçine emdirilmiş karbon elyaf kullanarak farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası, kullanılan reçine emdirilmiş karbon elyafın % 11 ile % 35 arasında çekme mukavemeti değerlerinde kayıp tespit edilmiştir.

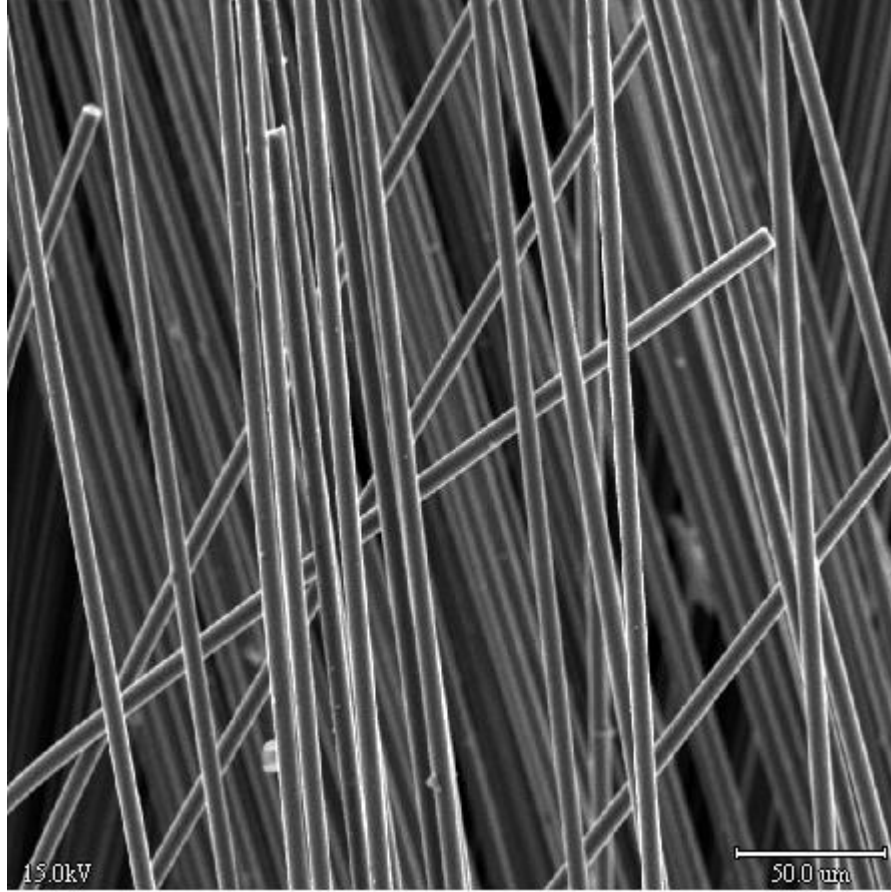
Karbon elyafların çekme mukavemeti değerlerinde ortaya çıkan bu kaybın en önemli sebebi sarım esnasında karbon elyafın maruz kaldığı eğilme gerilmeleridir.



Şekil V.1. Elektron Mikroskop ile Çekilmiş (x 700) Hasarsız Karbon Elyafların Bir Demetinde Bulunan Lifler

Sarım esnasında eğilme gerilmelerinden dolayı karbon elyaf demetindeki elyaf lifler kopmaktadır. Şekil III.19.'da elektron mikroskop ile 700 kat büyütülerek çekilmiş hasarsız karbon elyafların bir demetinde bulunan 0,007 mm çapındaki lifler görülmektedir.

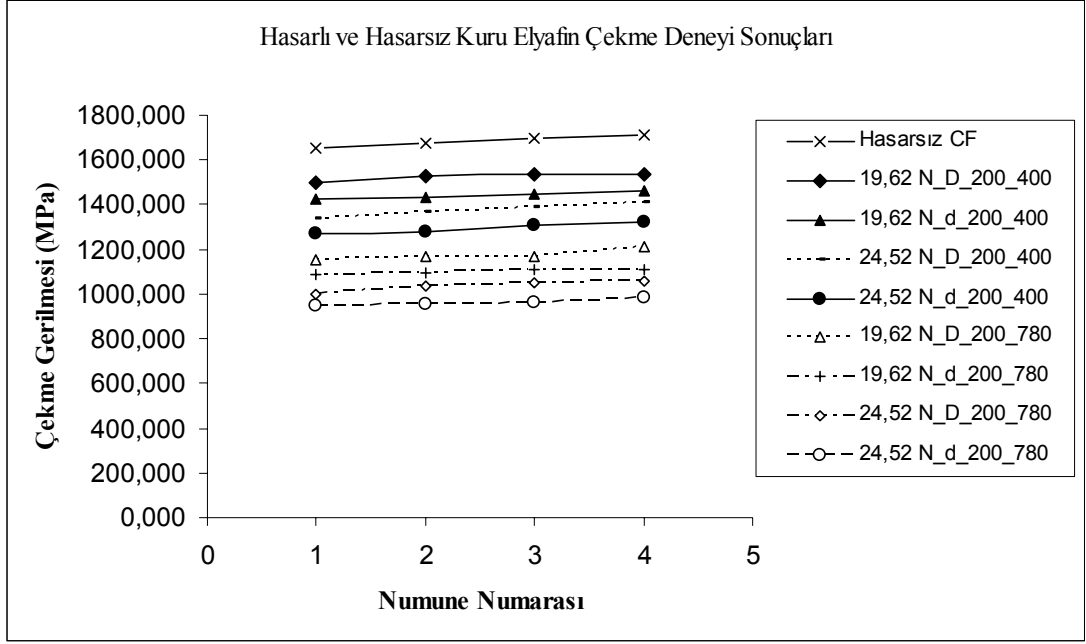
Ancak sarım işlemlerine tabi tutulan karbon elyafların sarım esnasında uğradığı hasar karbon elyaf liflerinin kırılmasına, kopmasına sebep olmaktadır.



Şekil V.2. Elektron Mikroskop ile Çekilmiş (x 350) Sarım İşlemlerine Tabi Tutulmuş Karbon Elyafların Bir Demetinde Bulunan Lifler

Şekil III.20.'de sarım işlemlerine tabi tutulmuş karbon elyaf numuneler elektron mikroskop ile 350 kat büyütülerek çekilmiştir. Kullanılan karbon elyaf liflerinin sarım esnasında kırıldığı gözlemlenmektedir. Buradan da sarım işlemlerine tabi tutulan karbon elyafların ön gerilme ünitesinden geçerken nasıl hasara uğradığı (liflerinin koptuğu) ve dolayısı ile mukavemet kaybının gerçekleştiği görülebilmektedir.

V.2. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMALAR

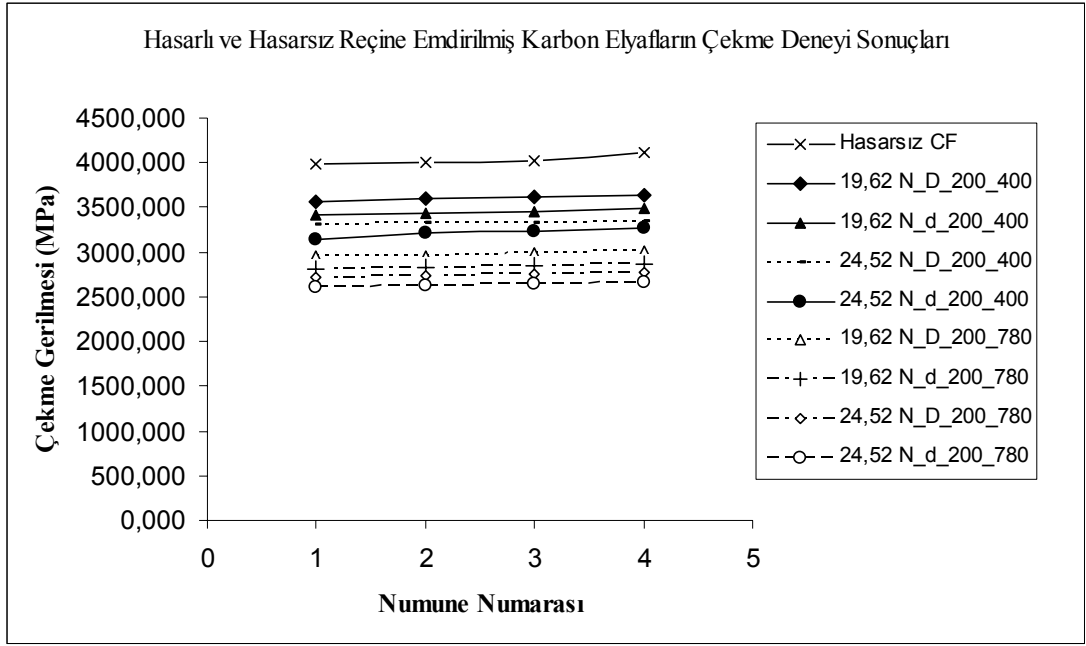


Şekil V.3. Hasarlı ve Hasarsız Kuru Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Gerilmeleri

Şekil V.1.'de gösterilen verilere göre, kuru elyaf sarım yöntemi ile sarım işlemleri gerçekleştirilen sürekli karbon elyafların çekme gerilme değerleri hasarsız elyaflara oranla büyük oranda düşüş göstermektedir.

Kuru karbon elyaf kullanarak farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası, kullanılan karbon elyafın % 10 ile % 43 arasında mukavemet değerlerinde kayıp tespit edilmiştir.

Literatür incelemesi yapıldığında görülmüştür ki; elyaf sarım teknolojisi ile üretilen ürünlerde, sarım işleminden kaynaklanan mukavemet kaybı olup olmadığı üzerine yapılmış herhangi bir çalışma yoktur.



Şekil V.4. Hasarlı ve Hasarsız Reçine Emdirilmiş Karbon Elyaf Numunelerin Çekme Gerilmeleri

Şekil V.2.'de gösterilen verilere göre, ıslak elyaf sarma yöntemi ile sarım işlemleri gerçekleştirilen sürekli karbon elyafların çekme gerilme değerleri hasarsız elyaflara oranla büyük oranda düşüş göstermektedir.

Reçine emdirilmiş karbon elyaf kullanarak farklı koşullar altında gerçekleştirilen sarım işlemleri sonrası, kullanılan reçine emdirilmiş karbon elyafın % 11 ile % 35 arasında mukavemet değerlerinde kayıp tespit edilmiştir.

Literatür incelemesi yapıldığında görülmüştür ki; elyaf sarma teknolojisi ile üretilen ürünlerde, sarım işleminden kaynaklanan mukavemet kaybı olup olmadığı üzerine yapılmış herhangi bir çalışma yoktur.

Kullanılan karbon elyafın mekanik özelliklerindeki bu kayıp, üretilen ürününde mekanik özelliklerinde kayıp anlamına gelmektedir. Ortaya çıkan bu istenmeyen durumun engellenmesi veya en aza indirgenebilmesi için elde edilen bu verilerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Şekil V.1.ve Şekil V.2'de verilen bilgilere göre;

1. Eşit şartlar altında ve aynı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiş deneyler, ıslak elyaf sarma yönteminin ürüne kazandırdığı mekanik özelliklerin kuru elyaf sarma işleminin kazandırdığı mekanik özelliklere göre yaklaşık iki kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Elde edilen bu sonuca bağlı olarak reçinenin birleştirme

özelliğinin de ürün mukavemeti açısından son derece önemli olduğunun vurgulanması gerekmektedir.

2. Deneyleerde 19,62 N ve 24,52 N olarak iki farklı ön gerilme kuvveti ayarlanmıştır. Ön gerilme yükünün artması ile kullanılan karbon elyafların çekme gerilmeleri azalmaktadır. Ön gerilme yükü ile karbon elyafların çekme gerilmeleri arasında ters orantı vardır.

3. Ön gerilme düzeneğinde farklı çaplara sahip iki makara kullanılmıştır. Kullanılan makara çapına bağlı olarak elyafların temas yüzeyleri artmakta ve sarım açısı değişmektedir. Buradan da, kullanılan makara çapının azalmasıyla birlikte karbon elyafların çekme gerilmeleri de azalmaktadır sonucuna ulaşılır.

4. İncelenen diğer bir parametre ise ön gerilme düzeneğinde kullanılan makaraların konumlarına bağlı olarak değişen sarım açısıdır. Sarım açısı azaldıkça kullanılan karbon elyafların çekme gerilmeleri de azalmaktadır.

Yukarıda verilen çıkarımlar yapılarak elyaf sarma işlemi ile yapılacak üretimlerde tasarım aşamasında ürünün mekanik özelliklerinin azalmasını engellemek veya an aza indirmek için dikkat edilmesi gereken parametreler ve bu parametrelerin ürün mukavemetine etkisi belirlenmiş olmaktadır.

Böylece bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

4. Elyaf sarma teknolojisinde kullanılan sürekli karbon elyafların sarım esnasında ön gerilme yükünden kaynaklanan çekme mukavemeti kaybının ölçülebilmesinde kullanılacak numunelerin sarım işlemleri ile elde edilebilmesi için bir ön gerilme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir.

5. Elyaf sarma yöntemlerinden kuru elyaf sarma yöntemi ve ıslak elyaf sarma yöntemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Islak elyaf sarma yönteminde sarılan karbon elyafların çekme mukavemetinin kuru elyaf sarma yöntemi ile elde edilen karbon elyafların çekme mukavemetinin iki kat daha fazla olduğu görülmüştür.

6. Elyaf sarma işleminde kullanılan sürekli karbon elyafların ön gerilme parametrelerinden kaynaklanan çekme mukavemeti değerlerindeki kayıp miktarı deneysel çalışmalarla belirlenmiştir.

7. Elyaf sarma işleminin en önemli üretim parametresi olan ön gerilme parametresinin sarım işlemi esnasında elyaf mukavemetine etkisi sayısal olarak incelenmiş ve bu etkinin neden olduğu kayıp miktarının en aza indirgenebilmesi için çeşitli öneriler getirilmiştir.

8. Elyaf sarma makinelerinde kullanılan ön gerilme ünitesinde bulunan makaralar ile kullanılan sürekli karbon elyaf arasında ortaya çıkan sürtünme modellenmiş ve buna bağlı olarak dinamik sürtünme katsayısı ölçülmüştür.

9. Üretim parametrelerinin, kullanılan karbon elyafın çekme mukavemetine etkisinin belirlenmesi ve tasarım aşamasında yardımcı olabilmesi için istatistiksel bir model önerilmiştir.

Yukarıda verilen sonuçlar elyaf sarma teknolojisinde kullanılan karbon elyaflarında meydana gelen ön gerilme parametrelerinin neden olduğu çekme mukavemeti kaybını göstermektedir. Böylece sürekli karbon elyafların kullanıldığı elyaf sarma işleminde çok önemli bir imalat parametresi belirlenmiş olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Breen, C.; Guild, F.; Pavier, M.: “*Impact Of Thick CFRP Laminates: The Effect of Impact Velocity*”, Composites: Part A, Applied Science and Manufacturing ISSN 1359-835 X, **2005**, Vol. 36, Pp. 205-211
- [2] Changliang, Z.; Mingfa, R.; Wei, Z.; Haoran, C.: “*Delamination Prediction of Composite Filament Wound Vessel With Metal Liner Under Low Velocity Impact*”, Composite Structures 75 (**2006**) 387–392
- [3] Krishnamurthy, K.S.; Mahajan, P.; Mittal, R.K.: “*Impact Response and Damage in Laminated Composite Cylindrical Shells*”, Composite Structures 59 (**2003**) 15–36
- [4] Akkuş, N.; Genç, G.: “*Ankastre kompozit kirişte gerilme-şekil değiştirme kontrolü*”, Uluslar arası 1. Mesleki Eğitim Teknolojileri Konferansı, İstanbul, Türkiye, 5-7 Eylül, **2005**
- [5] Akkus, N.; Verchery, G.; Kanemoto, Y., Kawahara, M., and Hurez, A., “*Inter-Laced Fibers / Light – Curing Resin Composite Structures*”, In: Proceedings of ACCM-2000 Conference, Kyongju, Korea, August **2000**, p.211-216
- [6] Akkus, N; Kawahara, M.: “*Bending Behaviors of Thin Composites Pipes with Reinforcing Nodes,*” Materials Science Research International, 6-2, 337-342 (**2000**)
- [7] Mertiny, P.; Ellyin, F.: “*Influence of the Filament Winding Tension on Physical and Mechanical Properties of Reinforced Composites*”, Composites: Part A 33 (**2002**) 1615–1622
- [8] Banerjee, A.; Sun, L.; S. Mantell, C.; Cohen, D.: “*Model and Experimental Study Of Fiber Motion In Wet Filament Winding*”, Printed in Great Britain, Composites Part A 29A (**1998**) 251-263
- [9] Kaynak, C.; Erdiller, E.S.; Parnas, L.; Senel, F.: “*Test Method Use Of Split-Disk Tests For The Process Parameters Of Filament Wound Epoxy Composite Tubes*”, Polymer Testing 24 (**2005**) 648–655
- [10] Zhao, L.; Mantell, S.C.; Cohen, D.; McPeak, R.: “*Finite Element Modeling Of The Filament Winding Process*”, Composite Structures 52 (**2001**) 499-510

- [11] Cohen D.: “*Influence Of Filament Winding Parameters On Composite Vessel Quality And Strength*”, Composites Part A **1997**; 28A: 1035-47.
- [12] Cohen D.; Mantell S.C.; Zhao L.: “*The Effect of Fiber Volume Fraction on Filament Wound Composite Pressure Vessel Strength*”, Composites Part B, **2001**; 32B:413-29.
- [13] Hurez, A.; Akkus, N.; Verchery, G.; Kawahara, M.: “*Design And Analysis Of Composite Structures With Interlaced Fibers*”, Composites: Part A 32 , **2001**, 1455-1463
- [14] Migliaresi, C.; Nicoli, F.; Rossi, S.; and Pegoretti, A.: “*Novel Uses Of Carbon Composites For The Fabrication Of External Fixators*”, Composites Science and Technology 64 (**2004**) 873–883
- [15] Koussios, S.; Bergsma, O.K.; Beukers, A.: “*Filament winding. Part 1: determination of the wound body related parameters*”, Composites: Part A 35 (**2004**) 181–195
- [16] Rousseau, J.; Perreux, D.; Verdière, N.: “*The Influence of Winding Patterns on the Damage Behavior of Filament-Wound Pipes*”, Composites Science and Technology 59 (**1999**) 1439-1449
- [17] Kim, C. U.; Kang, J. H.; Hong, C. S.; Kim, C. G.: “*Optimal Design of Filament Wound Structures Under Internal Pressure Based on the Semi-Geodesic Path Algorithm*” , Composite Structures, 67 (**2005**) 443–452
- [18] Kabir, M.Z.: “*Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner*”, Composite Structures 49 (**2000**) 247-255
- [19] Park, J. S.; Hong, C.S.; Kim, C. G.; Kim, C. U.: “*Analysis of Filament Wound Composites Structures Considering the Change of Winding Angels Through the Thickness Direction*”, Composite Structures 55 (**2002**), 63-71
- [20] Rosato, D.V.; Grove, C.S.: “*Filament Winding: Its Development, Manufacture, Applications, and Design*”, Interscience Publishers a Division of John Wiley and Sons, Inc., New York, London, (**1964**)
- [21] <http://www.gatech.edu/>, Georgia institute of Technology, (Eriřim tarihi: Ocak **2007**)
- [22] <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/tanso/01.html>, (Eriřim tarihi: Ocak **2007**)
- [23] <http://www.torayusa.com/cfa/links.html>, (Eriřim tarihi: Ocak **2007**)

- [24] Chung, D.D.L.: “*Carbon Fiber Composites*”, Material Science/Composites, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-9147-7, (1994), 3
- [25] <http://www.carbon-fiber.com/>, (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [26] <http://pslc.ws/macrog/carfib.htm>, (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [27] Jones, R.: “*Mechanics Of Composite Materials*”, Second Edition, Taylor & Franci Inc, ISBN: 9781560327127, Blacksburg, Virginia, USA, 1999, 126-135
- [28] Sharon, A.; Lin, S.: “Development of an Automated “*Ber Optic Winding Machine for Gyroscope Production*”, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 223-231
- [29] Choi, S. B.; Cheong, C.C.; Kim, G.W.: “*Feedback Control Of Tension In A Moving Tape Using An Er Brake Actuator*”, Mechatronics Vol. 7, No. I, pp. 53--66, 1997
- [30] Yeung, M.F.; Falkner, A.H.; Gergely, S.: “*The Control of Tension in Textile Filament Winding*”, Mechatronics, Volume 5, Issues 2-3, March-April 1995, Pages 117-131
- [31] Sauter, D.; Jamouli, H.; Keller, J. Y.; Ponsart, J.C.: “Actuator Fault Compensation for A Winding Machine”, Control Engineering Practice 13 (2005) 1307–1314
- [32] Kudo, M.; Nasu, Y.; Mitobe, K.; Borovac, B.: “Multi-Arm Robot Control System for Manipulation of Flexible Materials in Sewing Operation”, Mechatronics 10 (2000) 371±402
- [33] Polini, W.; Sorrentino, L.: “*Influence of Winding Speed and Winding Trajectory On Tension in Robotized Filament Winding of Full Section Parts*”, Composites Science and Technology 65 (2005) 1574–1581
- [34] ASTM D 4018-99.: “*Standard Test Methods for Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Fiber Tows*”, (Reapproved 2004)
- [35] Boytek Reçine, <http://www.boytek.com.tr/> (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [36] <http://www.pauleyequipment.co.uk/home.asp>, (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [37] <http://www.henkel-ua.com/>, (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [38] http://www.instron.com.tr/wa/products/universal_material/4411.aspx, (Eriřim tarihi: Ocak 2007)
- [39] Schon, J.: “*Coefficient of Friction For Aluminum in Contact With a Carbon Fiber Epoxy Composite*”, Tribology International 37 (2004), pp 395–404

- [40] Schon, J.: “*Coefficient of Friction and Wear of A Carbon Fiber Epoxy Matrix Composite*”, *Wear* 257 (2004), pp 395–407
- [41] Schon, J.: “*Coefficient of Friction of Composite Delamination Surfaces*”, *Wear* 237_2000, pp 77–89
- [42] Omurtag, M.: “Statik”, Beta Basım Yayım, pp 329-332, ISBN 975-295-188-0, Şubat 2003, İstanbul
- [43] Statistica 6.0 ; Data Analysis Software System, 2001
- [44] SPSS Statistics 15.0, 2005
- [45] Mathematica 5.1, Wolfram Research, Inc., 2004

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Garip GENÇ

Doğum Tarihi: 25 Şubat 1977

Doğum Yeri: İskenderun

Unvanı: Arş. Gör.

Öğrenim Durumu:

Derece	Alan	Üniversite	Yıl
Lise	Makine	İskenderun Teknik Lisesi	1995
Ön Lisans	Makine	Marmara Üniversitesi, Tek. Bil. Mes. Yüksekokulu	1998
Lisans	Makine Eğitimi	Marmara Üniversitesi, Tek. Eğitim Fak.	2001
Y. Lisans	Makine Eğitimi	Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	2004
Doktora	Makine Eğitimi	Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	2008

Görevler:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Arş. Gör.	Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu	2003~

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler:

- [1] Akkus, N.; Verchery, G.; Kawahara, M.; Genc, G.: “*Design, Testing, and FEM Simulation of Interlaced Fiber Composite Structures*”, Composite Structures, ISBN: 0263-8223, Article in press, 2008

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:

- [2] Akkuş, N.; Genç, G.: “*Ankastre Kompozit Kirişte Gerilme-Şekil Değişirme Kontrolü*”, Uluslar arası 1. Mesleki Eğitim Teknolojileri Konferansı, İstanbul, Türkiye, 5-7 Eylül, 2005
- [3] Akkus, N.; Genc, G.; Girgin, C.: “*Control of The Pretension in Filament Winding Process*”, 4th International Conference, Mechatronic Systems and Materials (MSM 2008), 14 - 17 July, 2008, Białystok, Poland

Görev Yaptığı Projeler:

- 1- Elyaf Sarma Yöntemiyle Üretilen FRP Kompozitlerde Ön Gerilme Parametrelerinin Elyaf ve Kompozit Mukavemetine Etkisi, Marmara Üniversitesi [Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu](#), Devam Ediyor. (Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Nihat AKKUŞ)