

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU**

Azime DEMİREL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2007
ANKARA**

Azime DEMİREL tarafından hazırlanan KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Ahmet BİÇER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. Ali Yavuz BİLGESU

Üye : Prof.Dr. Ahmet BİÇER

Üye : Prof.Dr. H. Vecihi PAMUK

Üye : Prof.Dr. Mübeccel ERGÜN

Üye : Prof.Dr. Süleyman TEKELİ

Tarih : 07 / 05 / 2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Azime DEMİREL

**KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)**

Azime DEMİREL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2007**

ÖZET

Kompozit malzeme kullanımının gitgide arttığı günümüzde karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonunun yapılması bu çalışmada hedeflenmiştir. Çalışmada, tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçineden oluşan kompozit malzemeler hazırlanarak, elyaf yatırma açısının tabakalı epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkileri çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Kompozit malzemeler otoklav yöntemiyle hazırlanmıştır.

Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu aşamasında; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, sıkıştırma, taşıma ve düzlem içi kayma testi, termal özelliklerin belirlenmesi için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA), kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) uygulanmıştır.

Yapılan mekanik karakterizasyon çalışmaları sonunda, elyaf yönlenmelerinin kompozitin mekanik dayanımında oldukça etkili olduğu görülmüştür. Çekme testi sonucunda, eşit tabaka sayısında farklı yönlendirmelerle hazırlanan numune gruplarından en yüksek çekme

dayanımı ve çekme modülü değerini, çekme dayanımı 1713,48 MPa ve çekme modülü 127,12 GPa değerleri ile 0° yönlendirmeli numune grubu vermiştir. Aynı zamanda çok yönlü numunelerde 0°'li yönlendirme oranı arttıkça dayanım artmaktadır. $\pm 45^\circ$ yönlendirmeli numunelere uygulanan düzlem içi kayma testi sonucunda tabaka sayısı 10 kattan oluşan kompozitin düzlem içi kayma dayanımı 75,20 MPa ve düzlem içi kayma modülü 5,00 MPa değeri elde edilmiştir. Taşıma testi sonucunda 0°'li yönlendirme oranı azaldıkça taşıma dayanımı artmıştır. En yüksek taşıma dayanımı 1010,46 MPa ve taşıma modülü 105,17 GPa olarak bulunmuştur. TGA termogramları incelendiği zaman karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitin bozunma sıcaklığı değeri yaklaşık 385 °C olarak bulunmuştur.

SEM mikrograflarından matris sitemi olan epoksi reçinenin, takviye sistemi olan tek yönlü karbon elyafları ıslatabilirliğinin ve ara yüzey yapışmalarının başarılı olduğu düşünülmüştür. Mikrograflarda elyaf doğrultuları açıkça görülebilmektedir.

Bilim Kodu	: 912.1.092
Anahtar Kelimeler	: Karbon elyaf, epoksi reçine, polimer kompozit, mekanik özellikler, termal özellikler
Sayfa Adedi	: 135
Tez Yöneticisi	: Prof. Dr. Ahmet Biçer

**THE CHARACTERISATION OF CARBON FIBER REINFORCED
EPOXY COMPOSITE MATERIALS**

(M.Sc. Thesis)

Azime DEMİREL

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2007

ABSTRACT

In this study, unidirectional carbon fiber/epoxy resin composite materials were produced. Then, the effect of change in fiber directional and number of ply on the composite structure was examined. For this objective, the specimens were fabricated from commercially available carbon/epoxy pre-impregnated tapes. The tapes were made of unidirectional carbon fibres Magnamite® AS4 pre-imregnated with Hexcel 8552 epoxy resin. Composite materials were produced by using autoclave technique.

In order to determine mechanical properties of the composite materials tensile, bearing, compressive and in plane shear tests were conducted. Thermal properties of composite materials were analyzed by using differential scanning calorimeter (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA). The fracture surface of the composite materials were examined by using scanning electron microscope (SEM) test method.

As a result of mechanical characterization studies showed that, the directional of the fiber is very effective on the mechanical performance

of the composite. The 0° orientation gave the maximum tensile strength 1713,48 MPa and tensile modulus 127,12 GPa. When the 0° orientation ply increase on multi-directional composite materials, the tensile strength of the composites samples increased. The in-plane shear strength 75,20 MPa and modulus 5,00 MPa were found with the $\pm 45^\circ$ orientations of the plies of the composite materials. When the 0° orientation ply decrease on multi-directional composite materials, the bearing strength and modulus of the composite samples increased. The maximum bearing strength 1010,46 MPa and the maximum bearing modulus 105,17 GPa was found. The decomposition temperature of the composite samples are found about 385°C from the TGA thermograms.

The SEM micrographs taken from fracture surfaces were examined, the carbon fiber epoxy composites showed good wetting of fiber with resin. The fiber directions are shown clearly with the micrographs.

Science Code : 912.1.092
Key Words : Carbon fiber, epoxy resin, polymer composite, mechanical properties, thermal properties
Page Number : 135
Adviser : Prof. Dr. Ahmet BİÇER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardımlarını ve katkılarını eksik etmeyen değerli Hocam Prof. Dr. Ahmet BİÇER'e, SEM sonuçlarını almamda büyük emeği olan Öğr. Göv. Dr. Bülent Bostan'a, kullandığım malzemeleri ücretsiz temin eden Tusaş Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın her döneminde, her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan biricik annem ve babama, çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen üzerimde büyük emekleri olan manevi güçlerim eşim Kimyager Tahsin Bilge MERCAN'a ve kardeşim Kimya Mühendisi Miyaser DEMİREL'e ve tüm aileme teşekkürlerimi ve sonsuz sevgilerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım süresince; Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı'nın (2001K120590) sayılı projesi kapsamında kurulan laboratuvarı kullanmama imkan tanıyan Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesine ve Devlet Planlama Teşkilatına teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	4
2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	7
2.1.1. Parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeler.....	8
2.1.2. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	10
2.1.3. Tabakalı kompozitler	13
2.2. Polimer Matrisli Kompozitler	18
2.3. Epoksi Reçineler.....	22
2.4. Karbon Elyaflar.....	27
2.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	32
2.6. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	36
2.7. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu	39
2.7.1. Termal karakterizasyon.....	39

	Sayfa
2.7.2. Mekanik karakterizasyon.....	41
2.7.3. Yüzey karakterizasyonu.....	51
3. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	53
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	62
4.1. Malzemeler.....	62
4.1.1. Pre-empreyne.....	62
4.1.2. Kalıp ayırıcı.....	63
4.2. Kompozit Numunelerin Hazırlanışı.....	63
4.3. Kompozit Numunelerin Karakterizasyonu.....	66
4.3.1. Mekanik karakterizasyon.....	66
4.3.2. Termal karakterizasyon.....	67
4.3.3. Yüzey karakterizasyonu.....	67
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	68
5.1. Çekme-Düzlem İçi Kayma-Taşıma Testi.....	68
5.2. Sıkıştırma Testi.....	72
5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	73
5.4. Termal Testler.....	78
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	85
EKLER.....	89
EK-1. Çekme testi standardı.....	90
EK-2. Düzlem içi kayma testi standardı.....	101
EK-3. Taşıma testi standardı.....	116
EK-4. Sıkıştırma testi standardı.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin metallerin çekme dayanımı ve çekme modülleri	6
Çizelge 2.2. Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri...	22
Çizelge 2.3. Çekme testi numune boyutları.....	45
Çizelge 2.4. Sıkıştırma testi numune boyutları.....	47
Çizelge 2.5. Taşıma testi numunesinin boyutları.....	48
Çizelge 4.1. Epoksi reçinenin bazı özellikleri.....	62
Çizelge 4.2. Karbon elyafın bazı özellikleri.....	63
Çizelge 4.3. Hazırlanan numune grupları, elyaf yönlenmeleri ve tabaka sayısı.....	64
Çizelge 5.1. Numune gruplarının çekme ve taşıma testi değerleri.....	69
Çizelge 5.2. Numune gruplarının düzlem içi kayma testi değerleri.....	69
Çizelge 5.3. Numunelerin sıkıştırma dayanımı ve sıkıştırma modülü değerleri.....	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çekme-uzama eğrisi.....	6
Şekil 2.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitlerin yapısı.....	9
Şekil 2.3. Elyaf ve dokuma takviyeli kompozitlerde elyafların kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler.....	12
Şekil 2.4. Tabakalandırmada kullanılan tabakaların genel görünüşü	14
Şekil 2.5. Dokuma ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi.....	14
Şekil 2.6. Tabakalarda yönlendirme şekilleri.....	15
Şekil 2.7. Tabakalı bir kompozit yapısı	16
Şekil 2.8. Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması.	21
Şekil 2.9. DGEBA'nın oluşumu.....	23
Şekil 2.10. Çapraz bağlanmış epoksi polimeri	24
Şekil 2.11. Epoksi reçinelerin üretimi.....	25
Şekil 2.12. Epoksi reçinelerin amin çapraz bağlanması.....	26
Şekil 2.13. Karbon elyafların temel yapısal özellikleri.....	30
Şekil 2.14. Çekme dayanımı ve elastik modülü üzerine sıcaklığın etkisi...	31
Şekil 2.15. Tek yönlü ve dokuma şeklindeki prepreg görünüşü.....	33
Şekil 2.16. Prepreg üretim şeması.....	33
Şekil 2.17. Basit bir serme konfigürasyonu.....	35
Şekil 2.18. Torba kalıplama yöntemi şematik görünüşü.....	36
Şekil 2.19. Çekme testinde uygulanan kuvvet yönü.....	44
Şekil 2.20. Çekme testi numunesi.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 2.21. Sıkıştırma testinde uygulanan kuvvet yönü.....	46
Şekil 2.22. Sıkıştırma testi numunesi.....	46
Şekil 2.23. Tipik hasar modları.....	47
Şekil 2.24. Taşıma testi numune boyutları.....	48
Şekil 2.25. Düzlem içi kayma testinde uygulanan kuvvet yönü.....	50
Şekil 2.26. Kayma testi numunesi.....	50
Şekil 2.27. Simetri eksenleri gösterilmiş tek yönlü takviyeli plastik kompozit	51
Şekil 4.1. Epoksi reçinenin viskozite-sıcaklık ve jelleşme süresi-sıcaklık grafiği.....	62
Şekil 4.2. Elyaf yönlendirme doğrultuları.....	65
Şekil 5.1. Numunelerin çekme dayanımı değerleri (MPa).....	70
Şekil 5.2. Numunelerin taşıma dayanımı değerleri (MPa).....	70
Şekil 5.3. Numunelerin düzlem içi kayma dayanımı değerleri (MPa).....	70
Şekil 5.4. Numunelerin çekme modülü değerleri (GPa).....	71
Şekil 5.5. Numunelerin taşıma modülü değerleri (GPa).....	71
Şekil 5.6. Numunelerin düzlem içi kayma modülü değerleri (MPa).....	71
Şekil 5.7. Numunelerin sıkıştırma dayanımı değerleri (MPa).....	72
Şekil 5.8. Numunelerin sıkıştırma modülü değerleri (GPa).....	73
Şekil 5.9. E1 ₄₅ numune grubunun TGA ve türev termogramı.....	78
Şekil 5.10. E2 ₄₅ numune grubunun TGA ve türev termogramı.....	79
Şekil 5.11. E1 ₄₅ ve E2 ₄₅ numune gruplarının TGA termogramı.....	79
Şekil 5.12. E1 ₄₅ ve E2 ₄₅ numune gruplarının DSC termogramı.....	80

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. E ₀ numune grubunun x500 büyütmede SEM mikrografı	74
Resim 5.2. E ₀ numune grubunun x1000 büyütmede SEM mikrografı....	74
Resim 5.3. E90 numune grubunun x250 büyütmede SEM mikrografı ...	75
Resim 5.4. E90 numune grubunun x1000 büyütmede SEM mikrografı ..	75
Resim 5.5. E45 numune grubunun x250 büyütmede SEM mikrografı	76
Resim 5.6. E45 numune grubunun x1000 büyütmede SEM mikrografı ..	76
Resim 5.7. E442 numune grubunun x750 büyütmede SEM mikrografı...	77
Resim 5.8. E442 numune grubunun x1000 büyütmede SEM mikrografı.	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
b	numunenin genişliği, mm
d	taşıma delik çapı, mm
E	elastik modülü, MPa
E_c	sıkıştırma elastik modülü, MPa
ϵ_b	kırılmada çekme uzaması
ϵ_c	sıkıştırma gerinimi
ϵ_{cM}	kırılmada sıkıştırma uzaması
ϵ_x	numune eksenine paralel yöndeki gerinim
ϵ_y	numune eksenine dik yöndeki gerinim
F	ani yük, F
σ	gerilim
σ_c	sıkıştırma gerilimi, MPa
σ_{cM}	sıkıştırma dayanımı, MPa
σ_{T11}	çekme mukavemeti
G_{12}	kayma modülü
h	numunenin kalınlığı, mm
L	kuvvet uygulandıktan sonra anlık boy, mm
L_0	orijinal ölçüm uzunluğu
ΔL	deformasyon sonucu numunenin boyundaki değişim
m	yük-uzama eğrisine çizilen teğetin eğimi
n	gözlem sayısı
P_R	kopma anındaki kuvvet, N

Simgeler	Açıklama
P	%4 delik deformasyonunda taşıma yüklemesi, N
S_b	taşıma dayanımı, MPa
S	hesaplanan standart sapma
t	numune kalınlığı, mm
τ_{12}	düzlem içi kayma gerilimi
τ_{12M}	düzlem içi kayma dayanımı
γ_{12}	kayma gerinimi
X	tek gözlemin değeri
$\bar{X}$	gözlem setlerinin aritmetik ortalaması

Kısaltmalar	Açıklama
DGEBA	Diglisidil eter bisfenol-A
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
E	Takviyesiz epoksi/sertleştirici karışımı
EMM	Epoksi moleküler kütle
PAN	Poliakrilonitril
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı
TGA	Termogravimetrik analiz
E₀	0° yönlendirmeli numune
E₉₀	90° yönlendirmeli numune
E₄₄₂	0/+45/90/-45/0/0/-45/90/+45/0 yönlendirmeli numune
E₂₆₂	+45/0/-45/90/+45/-45/90/+45/0/-45 yönlendirmeli numune
E₁₄₅	+/-45 yönlendirmeli numune
E₂₄₅	+/-45 yönlendirmeli numune

1. GİRİŞ

Malzemenin tarih içindeki gelişim, değişim ve çeşitlenme süreci incelendiğinde, saf ve doğal malzemenin kullanımdaki payının zamanla azaldığı, buna karşılık gelişen teknolojiyle birlikte, birden fazla malzemenin değişik tekniklerle bir araya getirildiği, amaca uygun özellikler taşıyan, bir anlamda tasarlanmış malzemenin, başka bir ifadeyle kompozit malzemenin gitgide arttığı, yaygınlaştığı açıkça görülmektedir [1].

Kompozit malzeme; iki veya daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, en iyi özelliklerini bir araya toplamak yada ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin mikro ve makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir.

Kompozit malzemeler aslında binlerce yıldan beri mevcuttur. Mısırdaki M.Ö. 2800 yıllarında arkeologlar lamine edilmiş tahta tabakalar bulmuşlardır. Bina yapımı içinde çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç de bir kompozit malzemedir. Alüminyum alaşımları son 75 yıldan beri uçak iskeleti olarak kullanılmıştır. Az oranda Cu, Mg ihtiva eden Duraluminyum olarak adlandırılan bu alaşım saf Al kadar hafif olmamasına rağmen çok dayanımlı olduğu tesadüfen bulunmuş ve I. Dünya savaşı esnasında bu malzemeden bir kaç uçak üretilmiştir. Kompozit malzemelerin gelişimi ise, II. Dünya savaşı esnasında mevcut malzemelerin tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri bu malzemelerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmektedir. Bu gelişmeler için tahrik edici güç malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı elde etmek olmuştur [2].

Kompozit malzemelerde ilk uygulamalara cam takviyeli plastik esaslı kompozitler (CTP) kullanılarak radar kubbeleri yapılarak başlanılmıştır. Bu kompozitlerin hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri

nedeniyle en uygun olduğu ortaya çıkmıştır. Yine Gemi yapım tekniği de 1942 yılında CTP ile gerçekleşmiştir. Daha sonra uçak pervaneleri 1950'li yıllarda kompozitten yapılmaya başlanmıştır. Boeing 707, 727 uçaklarında cam, karbon elyaf, Boeing 767 de ise rmeli karbon/keklar/epoksi kompozitten iniş kapısı dişlisi, kanat, sabit ve arka kenar dengeleyicisi yapılmıştır. Bunun da dokuma yapımındaki cam elyafa göre daha uzun süre dayandığı anlaşılmıştır. Dış kanat esas olarak karbon/epoksi'den oluşmaktaydı, fakat daha sonra karbon/epoksi ve boron/epoksi içeren karma kompozitten yapılmıştır. Bu yapılan kompozit ile metal versiyona göre 2 kat daha fazla uçuş zamanı elde edilmiştir. 1986 yılında kanatlar, uçak n gövdesi, yatay stabilizatörü, irtifa dümeni, dmen pedalı, aşağı sarkan kanat ve kapaklar, kanatçıklar ve kanat üzeri kaplaması yeniden tasarlanmış ve karbon/epoksi malzemeden üretilmiş ve yapılan denemelerde kırılma (bozulma) olmaksızın performanslarında iyileşme gözlenmiştir. Almanya'da Alfa-Jet şirketi metal malzeme yerine zırhlı araç için karbon elyaf kullanmış, sınırsız uçuş gerçekleştirerek ağırlığı azaltmıştır [2].

Kompozit malzemelerin, çeliğin yerini almasıyla %60-80 ve alüminyumun yerini almasıyla ise %20-50 ağırlıktan kazanım mümkündür. Günümüzde kompozitler birçok mühendislik uygulamaları için tercih edilen malzemeler gibi gözükmektedir. Bu ağırlık kazançları, enerjinin giderek artan bir sorun haline geldiği çağımızda yakıtta önemli tasarruflar sağlamaktadır [3].

Kompozit malzemelerin kullanılmasında ki önemli bir noktada ekonomikliktir. Kimya endüstrisinde çeşitli reaktif veya zeltelerin depolanmasında, taşınmasında çözeltilere karşı inert davranan, reaksiyon vermeyen malzemelerin seçilmesi gerekir. Bu iş için en uygun malzemeler paslanmaz çelikler ve plastiklerdir. Tamamen plastik bir malzeme mukavemetsiz, tamamen paslanmaz çelikten yapı ise çok pahalıdır. Paslanmaz çeliğe göre çok daha ucuz olan düşük karbonlu çeliğin kimyasal maddeyle temas yüzeyinin plastik malzeme ile kaplanması hem yüksek mukavemetli hem de ucuz bir çözüm olmaktadır [4].

Kompozit malzemenin kullanımının gitgide arttığı doğrultuda, özellikle havacılık sanayinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretilmesi ve karakterizasyonunun yapılması bu çalışmada hedeflenmiştir. Bu amaçla, HexPly® 8552 epoksi reçine esaslı, Magmamite® AS4 karbon elyaf içeren, HexPly® 8552 tek yönlü önceden reçine emdirilmiş (prepreg) karbon elyaf kullanılmıştır. Otoklav yöntemiyle kompozit malzemeler hazırlanmıştır.

Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu aşamasında; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, sıkıştırma, taşıma ve düzlem içi kayma testi, termal özelliklerin belirlenmesi için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA), kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) uygulanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla bileşenin karışımından veya birleşmesinden oluşan bir malzeme sistemidir. Kompozit malzemeler, doğrudan doğruya istenilen maksatta kullanılmayan en az iki ayrı malzemeden belli olan bir özelliği elde edebilmek için, bu malzemelerin belli şartlar altında ve belli bir oranda fiziksel olarak birleştirilmesiyle elde edilirler. Bir kompozit malzeme genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır. Ancak, molekül ve atomik düzeyde birleştirilen malzemeler alaşımlar mikroskopik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz [2].

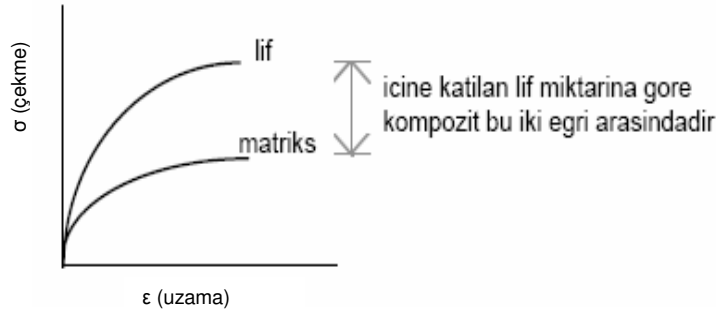
Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerin sahip olduğu özellikleri sunmasının yanı sıra; yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, boyutsal stabilite, yüksek dielektrik direnimi, korozyon dayanımı, kalıplama kolaylığı, yüzey uygulamaları, yüksek ısı dayanım, şeffaflık özelliği, yüksek kimyasal direnç, titreşim sönümlendirme, akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu gibi avantajları sağlar. Aynı ağırlıktaki mukavemetleri metallere oranla çok yüksektir. Aynı yönlü aramid ve karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemeler, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 4-6 kat daha yüksek spesifik çekme dayanımına sahiptir. Aynı yönlü grafit takviyeli epoksi, çelik ve alüminyumdan yaklaşık 3,5-5 kat daha yüksek spesifik çekme dayanımına sahiptir. Kullanım yerine ve özelliklerine bağlı olarak gereksinim duyulan özellikler artırılır, kontrol edilir. Karmaşık parçaların tek olarak üretilebilmesinden dolayı parça sayısının azalmasını sağlarlar. Böylece ara birleştirme detay ve parçalarının azalmasıyla üretim süresi kısalmaktadır. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur [1,2].

Buna karşılık belirgin bazı dezavantajları; hammaddenin pahalı olması; uçaklarda kullanılabilecek kalitede karbon elyafının bir metre karelik kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$'dır. Ancak bağlantı elemanları sayısında ve ağırlıkta azalma olması dikkate alındığında, toplam maliyette bir düşme söz konusu olur. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanıklılık özelliği bulunmaktadır. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur. Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler yaratabilir. Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı durumlarda bu zor olabilir. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir [5].

Kompozit malzemelerin yapılarında genel olarak üç ana eleman bulunmaktadır. Bunlardan matris malzemesi, takviye elemanını sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilerden koruyan sürekli fazı oluşturmaktadır. Matris malzemesi, bu işlevlerin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. Ancak, yük taşımaya ikinci malzeme olarak katılma durumu basınç halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük ölçüde matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır. Bir kompozitin kullanım sıcaklığı matrisin kullanım sıcaklığı ile sınırlıdır. Matrislerin çoğu sıvı halde kullanıldığı için viskozite önemlidir. Erime noktası, kür zamanı, sıcaklık gibi fiziksel özellikler de matrislerin diğer önemli noktalarıdır [1,6,7].

Kompozitlerin yapısında takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin dayanımını artırmaktır. Takviye edici, kompozitin mekanik dayanıklılığından sorumludur ve dayanıklılığı artırıcı etkisi çoğu kez kompozit içerisindeki hacmi %10'unu geçtiğinde gözlenmeye başlar. Bu nedenle

takviye amacıyla kullanılan lifin mekanik dayanımı matristen belirgin yüksek olmalıdır [2,6]. Şekil 2.1’de kompozit malzemenin çekme uzama eğrisinin hangi aralıkta olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çekme-uzama eğrisi [7]

Cam, karbon, aramit, bor, polietilen, poliamit, poliester, doğal lifler veya dokumalar kompozit hazırlamada kullanılan liflere örneklerdir. Çizelge 2.1’de takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin ve metallerin çekme dayanımı ve çekme modülü değerleri verilmiştir. Bu lifler içerisinde genel amaçlı ticari kompozitlerde en fazla cam lifler, ileri kompozitlerde ise aramit ve karbon lifler kullanılmaktadır [6].

Çizelge 2.1. Takviye amacıyla sık kullanılan bazı liflerin ve metallerin çekme dayanımı ve çekme modülleri [6]

Lif veya metal	Çekme dayanımı(MPa)	Çekme modülü(GPa)
Karbon lifi	2000-3500	325-440
Aramit lifi	3100-3600	60
E-cam lifi	2400	70
S-cam lifi	3450	85
Alüminyum	130-180	72
Titanyum	250-400	105
Paslanmaz çelik	206-520	196

Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile büyük kütsel yapılar oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, *elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri* aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır.

1. Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.
2. Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.
3. Elastisite modülünün çok yüksek olması.

Dolgular, kimyasallar ve diğer katkılar matrise niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilirler. Katkı maddelerinin; yanma geciktirici, yağlayıcı ve oksit giderici gibi amaçları vardır [6].

2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri yapıları gereği değişik şekillerde sınıflandırma olanağı mümkündür. Matris malzemesine göre metal matris kompozitler, seramik matris kompozitler ve polimer matris kompozitler olarak sınıflandırılabilirdiği gibi takviye malzemesine göre de sınıflandırma yapmak mümkündür.

Metal matris kompozitler alüminyum, bakır, magnezyum, titanyum gibi hafif metal ve alaşımların matris işleviyle; karbon, bor ve diğer bazı metallerin elyaf, parçacık, plakacık, kıl-kristal (whisker) yapısında takviye fazını oluşturmasından meydana gelir. Bu karma malzemeler daha üstün mukavemet, aşınma, korozyon, sertlik özellikleriyle nükleer güç ekipmanlarında, gaz türbinlerinde, uzay-havacılık, otomotiv sektöründe kullanılırlar. Seramik matris kompozitler seramik matris malzemelerin (Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC gibi) seramik veya metal parçacık, plakacık, kıl-kristal veya elyaf olarak takviyesiyle oluşturulan üstün ısıl dayanım ve mukavemete sahip malzemeler grubudur. Seramikler düşük yoğunluklu, çok dayanıklı ve sert olmalarına rağmen aşırı derecede gevrekler. Bunlar genellikle termal ve kimyasal etkilere karşı dirençlidirler. Ancak yüksek ergime sıcaklık dereceleri ve sertlikleri işlenmelerini zorlaştırır ve yalıtıkdırlar. Kırılgan oluşları bunları potansiyel olarak güvensiz yapar. Polimer matris kompozitler ileri plastik-

polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri veya pekiştirilmeleri sonucu oluşturulur [2,8].

Kompozit malzemeleri takviye elemanlarına göre şöyle sınıflandırabiliriz:

- 1) Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
- 2) Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler,
- 3) Tabakalı kompozit malzemeler,

Bu üç tip takviye elemanlı kompozit yine plastik, metal veya seramik matris içinde olabilir. İkinci faz veya takviye elemanı her zaman net özellik sağlanması için matristen daha serttir. Burada elyaf takviyeli kompozitleri de;

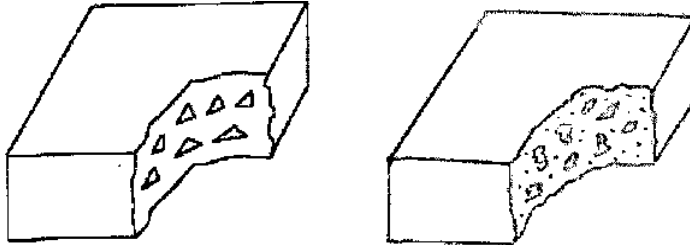
- a) Sürekli elyaf takviyeli kompozitler,
- b) Kesikli elyaf takviyeli kompozitler,
- c) Rasgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler olarak alt sınıflara ayrılabilir.

Parçacık takviyeli kompozitleri de iki alt grupta incelenebilir. Bunlar da; (a) büyük parçacıklarla dayanımı artırılmış kompozitler, (b) dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitler olarak da alt gruba ayırmak mümkündür. Şimdi sırası ile bu karma malzemelerin bazı özelliklerini açıklayalım [2].

2.1.1. Parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Bu tip kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile

oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 μm 'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC 'den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler izotropiktir. Bu kompozitler dayanımı iyileştirmekten ziyade beklenilmeyen alışılmışın dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, bunlar büyük parçacık içerdiklerinden kaymayı etkili olarak yapamazlar. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler [2].



Şekil 2.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla dayanımı artırılmış kompozitlerin yapısı [2]

Döküm yoluyla üretilen bu tür kompozitlerde pratikte karşılaşılan bir problemde parçacık ilave edildiğinde tozların karıştırılma zorluğu ve eriyik viskozitenin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatılamamasıdır.

Dağınımla(dispersiyon) mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler

Bu tür kompozitlerde yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çöktiller veya parçacıkların metalik matris içinde homojen dağılmasıyla elde edilir (Şekil 2.2). Bu parçacıkların çapı 0.01 ile 0.1 μm ve uzunluğu 50-200 μm arasında kullanılan parçacıkların hacim oranı %1-15 arasında değişir. Bunlar izotropik bir özellik gösterirler [2].

Tanecik takviyeli kompozitlerde, takviye amacıyla kullanılan malzemenin üç yöndeki boyutları arasında önemli ve belirgin bir fark yoktur. Bunlar arasında karbonatlar, kil, mika, silikatlar, mikroküreler, tarımsal atıklar, metal tozları veya parçaları, pudra, pul, pelet, granül, küre, disk vb geometrilerdeki veya şekilsiz küçük kırıntılar bu grupta yer alır. Tanecikli takviye edicilerin kompozitlerinin mekanik özellikleri zayıftır. Bu nedenle, daha çok mekanik dayanımın önemli olmadığı süs ve dekoratif eşyaların, genel amaçlı ürünlerin ve yük etkisinde kalmayacak diğer tür malzemelerin yapımında yararlıdırlar [6].

2.1.2. Elyaf (Lif) takviyeli kompozit malzemeler

Genellikle yeterli basınç dayanımına oranla çekme, eğilme, çarpma dayanımları çok düşük düzeyde kalan veya zayıf yapılı, kırılğan malzemenin zayıf olan yönlerinin iyileştirilmesi, kırılğanlığın giderilmesi, malzemenin sünekleştirilmesi gibi amaçlarla bu özellikleri iyileştirecek nitelikte elyaflarla donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir. Elyaf tanımı, makroskobik açıdan homojen, boyu kesitinin en az 100 katı olan esnek malzemeler şeklinde yapılır ve değişik elyaflar kompozitlerde takviye amacıyla kullanılır. Elyaf takviyeli kompozitlerde dışarıdan yapılan yüklemeleri karşılayan ana bileşen elyaftır, polimer matris ise elyafları istenilen geometride bir arada tutan çevreyi oluşturur [1,6].

Elyaf takviyeli polimerik kompozitler hazırlanırken elyaflar açısından bazı temel noktalara dikkat edilmesi gerekir. Bu noktalar: elyafların mekanik özellikleri, elyaf miktarı, elyaf kalınlığı, elyafların yönlendirme biçimi [6].

Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Genel bir kural olarak kompozitlerin mekanik dayanımı içlerindeki elyaf miktarı arttıkça yükselir, elyaf oranı belli

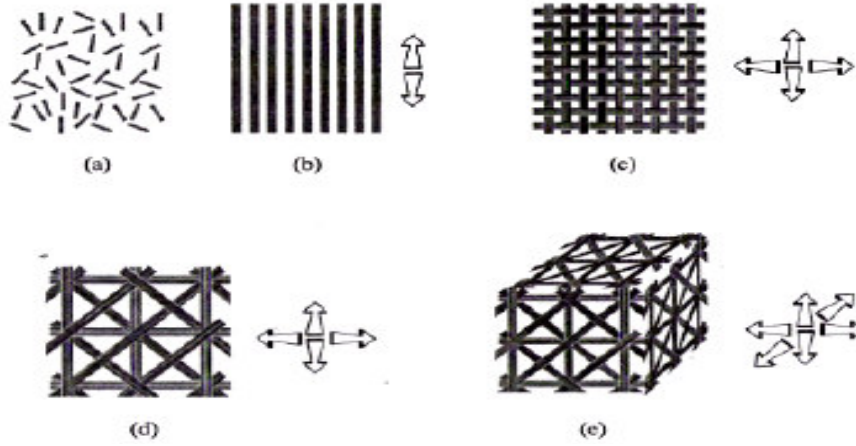
bir değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bunun nedeni, artışına bağlı olarak kompozit içerisindeki polimer miktarının azalmasıdır. Polimer, kompozit içerisindeki oranı belli bir değerin altına düştüğünde matris işlevini kaybeder ve lifleri bir arada tutamaz [6].

Elyaf kalınlığı kompozit özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. İnce liflerle hazırlanan kompozitlerde polimerin lifi ıslattığı alan büyüktür. Elyaf-polimer değme yüzeyinin artması, elyaf-polimer etkileşimleri arttırarak kompozit içerisinde yük (enerji) dağılımını kolaylaştırır. Bu nedenle aynı kütlede ince ve kalın elyaflarla takviye edilen kompozitlerden, ince elyaflarla takviye edileni daha dayanıklıdır [6].

Elyaf lar demet haline getirildiklerinde her zaman yapımlarında kullanılan polimerin yığın haline göre daha dayanıklıdır lar. Elyaf demeti üzerine dışarıdan bir etki yapıldığında, demette bulunan elyaflardan bazıları kopabilir veya yüzeylerinde çatlama, çizilme vb kusurlar oluşabilir. Demetin dış kuvvetler karşısında aldığı bu tür zararlar, yalnız etkilenen elyaflarla sınırlı kalır ve demet içerisindeki diğer elyaflara aktarılmaz. Yığın halindeki bir maddenin (cam parçası, polimer parçası vb) herhangi bir bölgesinde oluşan kusur malzeme içerisinde ilerler ve sonuçta malzemeyi kullanılamaz hale getirebilir. Bu özellik elyaf takviyeli kompozitlerin üstünlüklerinden birisidir [6].

Elyaf ların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyaf lar kompozit içerisine uygun geometrilerde yerleştirilerek, kompozitin çekme gibi yüklemelere farklı yönlerde farklı yanıtlar vermesi sağlanır (anizotropi). Örneğin kompozitin kopma dayanımı, elyafların yönlendirildiği eksene 90° lik açıdan yapılan yüklemelerde en büyük

olacaktır. Benzer şekilde vurma dayanımı, ısı iletkenlik, ısı ıl genleşme gibi davranışlar da elyafların yönlenme eksenine açısal olarak bağıldır. Elyaflarla yapılan takviye, elyaf yönlenmesi ayarlanarak sözü edilen özellikler yöne bağılı kontrolüne olanak sağılar [6].



Şekil 2.3. Elyaf ve dokuma takviyeli kompozitlerde elyafların kompozit içersine yerleşim biçimlerine örnekler a) kesikli rasgele, (b) sürekli tek yönlü, (c) sürekli düzlemsel iki yönlü, (d) sürekli düzlemsel üç yönlü, (e) üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğı yönleri gösterir) [6]

Elyafların ve dokumaların kompozit içersine yerleşim biçimlerine örnekler Şekil 2.3'de verilmiştir. Kesikli elyaflar, polimer matris içersine genellikle rasgele dağıtılırlar ve böyle bir kompozit mekanik özellik açısından izotropik davranır. Sürekli elyaflar genelde yükün yönüne paralel olacak şekilde reçine içersine yatırılırlar. Birkaç yönden yüklemeyle karşılaşacak kompozitler, elyafların farklı yönlerde yerleştirilmesi veya dokumalar kullanılarak hazırlanabilir. Dokumalar, kompozite her zaman en az iki yönde dayanıklılık kazandırılan takviye edicilerdir. Üç boyutlu dokumalarla kompozitin mekanik dayanımı her üç yönde artırılır [6].

Elyaf takviyeli kompozitler, özellikle uzay ve havacılık alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş malzemelerdir. Uzay ve havacılık alanlarında ilk kullanılan kompozitler alüminyum alaşımlarından hazırlanmış ve uçakların bazı

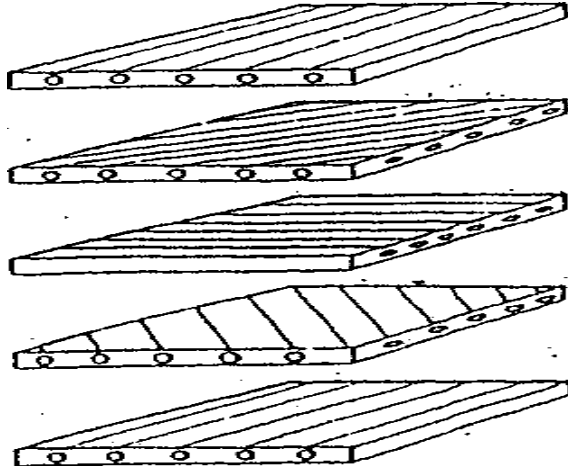
parçaları yüksek mekanik dayanımları ve hafifliklerinden dolayı alüminyum kompozitlerden yapılmıştır. Ancak alüminyum alaşımları korozyona ve metal yorulmasına uğrayabilen maddelerdir ve bu zayıf özelliklerin iyileştirilmesi pahalı işlemler gerektirir. Elyaf takviyeli polimerik kompozitlerde korozyon söz konusu değildir ve malzeme yorulması metallerdeki kadar hızlı gelişmez [6].

2.1.3. Tabakalı kompozitler

Tabaka; bir matristeki örülmüş lifler veya tek yönlü lif düzlemidir. Tek yönlü lif haline aynı zamanda tek yönlü lamına da denir. Tipik tabakalandırma aşağıdaki şekillerdeki gibi lif yönlerine dikey ve paralel olan ana malzeme eksenleri boyunca gösterilmiştir [9].

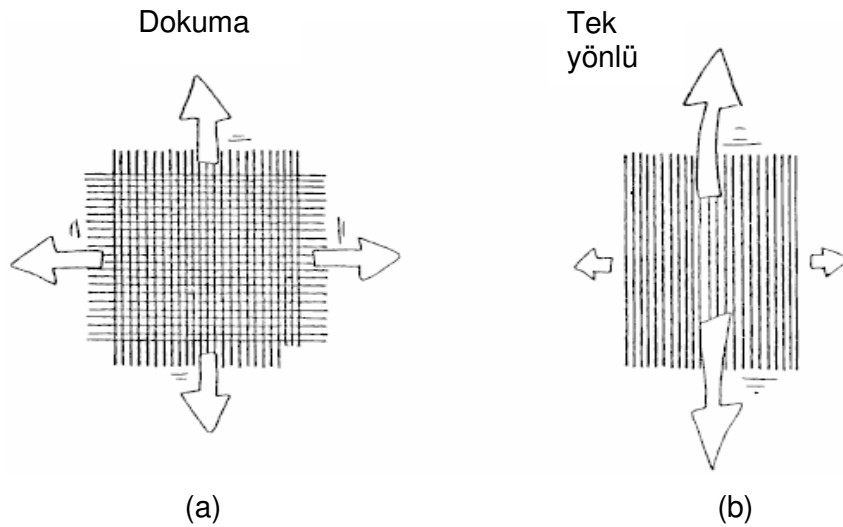
Tabakalı kompozitler, yapısal yönden taneli ve liflerle donatılı kompozit malzemeden farklılık göstermektedir. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [1,4].

Tabakalandırma: Bir tabakalandırma, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, tabakalardaki ana malzeme yönlerinin açık yönlendirmesi şeklinde tabakalar yığıdır. Bir tabakalandırmanın katmanları, genellikle tabakalarda kullanılan matris malzemesi aynıdır [10]. Tabakalandırma; farklı malzemelerin tabakaları veya elyaf takviyeli katmanların tabakaları olabilir,



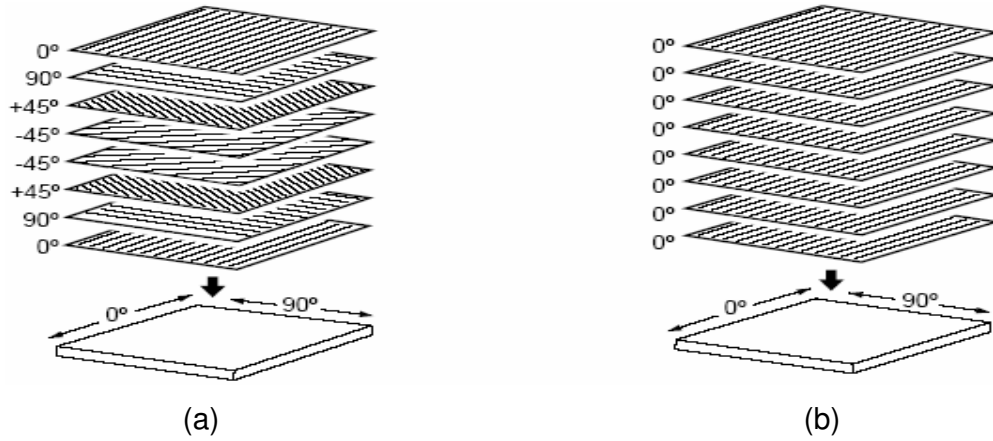
Şekil 2.4. Tabakalandırmada kullanılan tabakaların genel görünüşü

Tek yönlü kompozit malzemeler tek yönde daha üstün mekanik özelliklere sahiptir ve anizotropik (farklı yönlerde farklı özelliklerin sergilenmesi) özellik gösterir. İzotropik (bütün yön ve doğrultularda aynı özelliklere sahip olan malzeme) malzemeler (daha çok metaller) bütün doğrultularda eşit özellikler gösterir [11].



Şekil 2.5. Dokuma ve tek yönlü elyaflar için farklı yönlerde özelliklerin gösterimi [11]

- a) Eşit özellikler
- b) Eşit olmayan özellikler

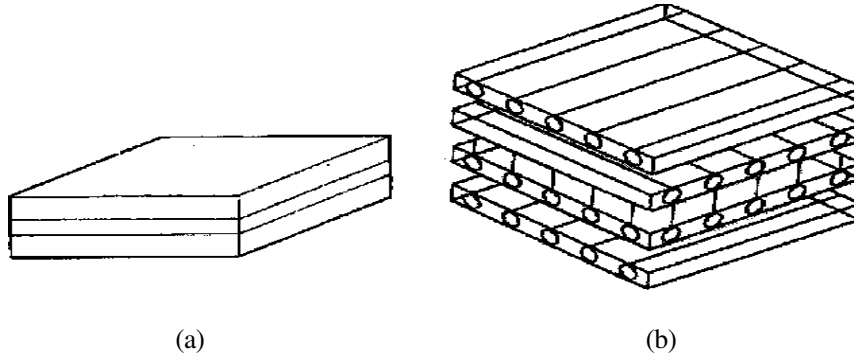


Şekil 2.6. Tabakalarda yönlendirme şekilleri [11]

- a) Yarı-izotropik yönlendirme
- b) Tek yönlü yönlendirme

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler çok katlıdırlar. Her tabaka tasarım amaçlarına bağlı olarak değişen elyaf doğrultuları ile tek katlı kompozitten oluşabilir. Genellikle her katman çok ince olup yaklaşık 0.1 mm kalınlığında olduğundan dolayı bu şekilde kullanılmaz. Her kattaki kompoziti oluşturan elemanlar aynı ise bunlar "izotropik" basitçe "laminat" olarak adlandırılır (Şekil 2.7). Bir çok katlı kompoziti oluşturan malzemeler farklı malzemelerden oluşuyorsa bunlar "ortotropik" veya "karma ve melez laminetler" olarak adlandırılır. Buna örnek olarak da bir karma laminet kompozitin bir katı cam elyaf takviyeli epoksi iken diğer tabaka ise grafit elyaf takviyeli epoksi kompozit olabilmektedir. Ortotropik aynı zamanda birbirine dik doğrultuda iki eksenle simetrik malzeme özelliği göstermesi demektir [2].

Laminetler, matris içerisine rasgele yönelmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakadan oluşabilir. Örneğin, 10 tabakadan 6 tanesi 1 doğrultuda ve diğer 4 tanesi bu yöne dik 90°'lik doğrultuda yönlenebilir. Sonuçta 1 doğrultudaki yönelimli kompozitin dayanım ve rijitliği (bir malzeme içinde oluşan elastik deformasyon miktarının nitelikli bir ölçümü ve yüksek elastikliğe sahip olma) yaklaşık %50'den daha büyük olacaktır. Her iki doğrultuda uzamalı rijitlik oranı yaklaşık 6/4'dür fakat eğilme rijitliği orta yüzey için belli değildir [2].



Şekil 2.7. Tabakalı bir kompozit yapısı a) İzotropik, b) Ortotropik yapı [2]

Orta yüzeydeki laminata simetrik düzenlenmemişse eğilme ve uzama arasında birleşmeden kaynaklanan rijitlik bileşenleri mevcut olabilmektedir. Her bir tabakanın bitişiğindeki tabakadan bağımsız olarak deforme olma eğilimi olduğu için laminatlarda kayma gerilmeleri oluşabilir. Bu bütün tabakalarda temel malzeme doğrultularındaki farklı yönlenme kadar farklı özelliklerden de ileri gelebilir [2]. Bu kayma gerilmeleri laminat kenarları yakınında en büyük olur ve orada delaminasyon başlama sebebi olabilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler geniş özelliklerine bağlı olarak tek veya çok katlı tabakalı malzemeler olarak da sınıflanabilir. Tek katlı kompozitler bir kaç farklı laminadan yapılabilir, her tabaka aynı yönelme ve özelliklere sahip, sonuçta tüm laminata tek katlı tabakalı kompozit olarak düşünülebilir [2].

Kompozit bir yapının yüksek hızlardaki çarpmalara gösterdiği direnç lifin elastiklik modülü, kırılma uzaması gibi lif özellikleri ile lifin bu kompozit yapı içerisindeki kullanım şekline ve kompozitin alansal yoğunluğuna bağlıdır [12]. Katlı yapıların ciddi tehlike tipleri için geliştirildiği ve bu yapıların temelde lif tipi, reçine tipi, doku konstrüksiyonu, kat sayısı, iplik yönü ile kesişmeleri ve iplik setleri ile yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Vurmanın katlı yapılara etkisi katı ve esnek tiplerine bağlı olarak değişmekte, katlı yapılar için katlar arası açılmanın bozulma modu olduğu ve bunun enerjinin dağıtılması açısından olumlu ancak yapının dayanımı açısından negatif olarak etkilediği iddia edilmiştir. Katlı yapıların

ağırlığı ve konforunun da tehlike tipine bağlı olarak göz önüne alınması gerekir [13].

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Tabakalandırılmış fiber takviyeli kompozitlerin kullanım yerleri; Polaris fuze kasaları, cam elyaf gemi kaplaması, raylı taşıt gövdeleri, tenis raketleri, v.b. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler [2,9].

Elyaf/matris takviyeli bir kompozitin üretimi esnasında, istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için çok katlı, düz veya değişik yönlü ve doğrultulu elyafların düzenlenmesi gerekir. Bu yapılacak parçaya bağlı olarak takviye elemanı tasarımında aşağıdaki formlardan biri gibi olacaktır:

- a) İzotropik özellik istendiğinde, elyaflar rasgele yönlenmiş,
- b) Ortotropik özellik olması isteniyorsa, ortogonal yönlü,
- c) Ortotropik özellik olması isteniyorsa tek yönlü olarak takviye edilmelidir [4].

Bu nedenle, kompozit tabakanın özellikleri, lamine, malzemede tek bir kompozit tabakası; elemanların özelliklerine, elyafların düzenlenmesine ve kompozitin üretim tekniğine bağlı olacaktır. Reçinenin düşük gerilme bölgesinde doğrusal olmasına rağmen genellikle elyafların doğrusal elastik olarak kırıldığı varsayılır. Bu elyaflar kırılma bölgesinde doğrusal olmayan özellikler gösterir. Ancak, kırılma bölgesinde doğrusal olmayan elastiklik matristen daha az değişmez ve sonunda matrisin doğrusal elastiklik varsayımını doğrulamada sonraki gerilme kompozitin kırılmasında oldukça

düşük olacaktır. Lamina kompozit analizinde bir diğer varsayımda elyaf ve matris arasında tam bağın mevcut olmasıdır. Kompozitin elastik karakteristikleri üzerine polimer matris içinde gerilim dağılımı üzerine sürünmenin etkisi, elyafların en uygun şekilde konumlanmasının sağlanması ile minimize edilebilir. Bu eksenel kuvvetler uygulanan kuvvetin doğrultusu boyunca olacaktır. Bununla beraber, kompozitte cam elyafların oranının artırılması, yükün büyük kısmının elyaflar tarafından taşındığını ve bunun sonucu olarak da yükün daha az kısmı matris tarafından taşınacağını gösterir. Diğer taraftan, elyaf içeriği az ise fazla yüklerde matris üzerine etkiyen sürünme etkisi oldukça fazla olabilir. Ancak bu kompozitler için genellikle uygulanan yük sürünme sağlayamayacak kadar yeterli düşüklükte olabilecektir [4].

2.2. Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozitler malzemelerin % 90'ı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. İleri plastik-polimer grubu matris malzemelerin çoğunlukla elyaf formunda sert, dayanımlı malzemelerle takviye edilmeleri bu gruptaki kompozit malzemeleri oluşturur. En tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve "fiberglas" olarak bilinen poliestere esaslı reçinelerin cam elyaf takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastik modül ve yüksek tokluğa sahiptirler [1,8].

Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 Nm/g olmasına karşın cam lifi-poliesterlerde 620 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 Nm/g ve kevlar epoksida 886 Nm/g'dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu

üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışabilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Kompozit malzemelerde polimer matris olarak kullanılan genelde üç tip plastikler mevcut olup bunlar; termosetler, termoplastikler ve elastomerlerdir. Termosetler grubunda ağırlıklı olarak poliester ve epoksi reçine kullanılır. Bunun yanı sıra vinil ester/bisfenol ve fenolik reçinelerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Termoplastik grubunda yaygın olarak poliamid ve polipropilen kullanımı görülür (yaklaşık %68.3). Bunların yanı sıra hibrid formda polietilen ve polibutilen tereftalat, polietereterketon ve polietersulfon kullanımı da dikkat çekmektedir. Naylonlar ve polikarbonatlar, ticari kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan az sayıdaki termoplastikten ikisidir [2,6,14].

Termoplastikler: Termoplastikler, oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Isıtılırsa yumuşar, sıcaklık arttıkça viskozitesi düşer. Bu özellik bunlardan yapılan ürünleri daha ekonomik yapar ve kolaylıkla şekillenmesini sağlar. Bu tekrar soğutulduğunda yeniden sertleşir. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termosetlere göre daha zordur. Ancak şekillendirme kapasitesi iyi olduğundan bunların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu polimerler kristalin veya şekilsiz (amorf) olabilir. Kristal şekilli olanlarda moleküller büyük uzaklıklarda oldukça düzenli şekil oluştururlar. Amorf polimerler de ise uzun zincirler birçok noktada birbirine dolaşmıştır. Kısa elyafla küçük hacim ortamında hamur veya levha kalıplama yöntemi ile kullanılmaktadır [2].

Termoplastikler, üretilen bütün sentetik polimerlerin yaklaşık %70'ini meydana getirir ve üç tipten ticari olarak en önemlisidir. Termosetler ve elastomerler ise yaklaşık %30'unu oluşturur. Tipik olarak kullanılan termoplastikler Acetal, Acrylonitrile- Butadiene-Styren (ABS), Selüloz, Politetra-floretilene= Fluoropolymers (PTFE), Poli amids(PA), Polikarbonat (PC), Polietilen (PE), Polyester (PET), Polivinil klorür (PVC), Naylon 6.6, Polistiren

(PS) ve Polipropilen (PP)'dir. Ancak bu üç tür olan polimerler bazen birbiri içerisine girebilir. Termoplastik olan belli polimerlerden termosetler de yapılabilir [2].

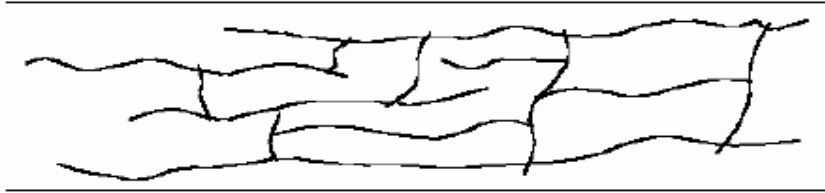
Elastomerler: Elastomerler, termoset polimerler gibi çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşur. Bunlar, çok düşük gerilmelere maruz kaldığı zaman büyük elastik deformasyon yapma yeteneği olan polimerlerdir. Bazı polimerler %500 ve daha fazla uzama yaparlar ve tekrar orijinal şekline dönerler. Çok meşhur olan polimerler ise Kauçuk'tur [2].

Termosetler: Kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşırlar. Termoplastik polimerlerden farklı olarak termoset polimerlerin polimerizasyon süreci geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamazlar. Çizelge 2.2'de en yoğun kullanılan termosetler ve genel özellikleri yer almaktadır [2].

Termoset matrisler, küçük monomer moleküllerini, uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyon sonucu oluşur. Termosetler, polimerizasyonla iki kademede elde edilir. Birincisi malzemeyi ihtiva eden monomerler lineer zincirlerin bir araya getirdiği reaktörde başlarken ikinci polimerizasyon işlemi kalıplama işlemi esnasında sıcaklık ve basınçla reaksiyona girmeyen kısımlar sıvılaşarak molekül zincirleri üç boyutlu yapıya sahip olurlar. Bu reaksiyonun gerçekleşmesi için genellikle katılaştırıcı kullanılır. Katılaştırıcı ilavesi ile önce jel haline gelir ve sonra da katılaşırlar. Bunlar tekrar ısıtılarak yumuşatılamaz. Termoset reçineler izotropiktirler. Termal stabilite, kimyasal direnç, düşük yoğunluk termoset reçinelerin avantajlarıdır. Oda sıcaklığındaki sınırlı çalışma zamanı, katılaşma için geçen uzun fabrikasyon zamanı, kopma esnasındaki düşük uzama dezavantajlarıdır [2,3].

Epoksi ve poliesterler elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemelerdir. Bunların fiziksel ve mekaniksel özellikleri, moleküllerin büyüklüğüne, yoğunluğuna ve çapraz bağın uzunluğuna bağlıdır. Ancak poliesterler cam elyafı iyi ıslatır ve dolgu maddesi kullanılabilir. Bunların sakıncası ise sertleşme sırasında %10 kadar kendini çekme (büzülmesi) göstermesidir. Bu büzülme ise liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olur [2,3].

Termoset malzemeler kür edildikten sonra tekrar eritilemez ve şekil verilemezler. Kür işlemi sırasında molekül zincirleri, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi çapraz bağlanma yaparlar. Bu nedenle moleküller tekrar eritilip şekil verilemez. Çapraz bağlanma yoğunluğu ne kadar fazla ise malzeme o kadar rijit ve ısıl stabilitesi yüksek olur. Poliimidler, plastikler arasında kalıpta şekil verilebilen, ısıl direnci en yüksek polimerlerdir [3].



Şekil 2.8. Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması [3]

Yaygın termoset reçineler; epoksi, poliester ve vinilesterlerdir. Bu malzemeler, tek parça veya iki parça sistemi olabilmektedir ve genelde oda sıcaklığında sıvı formdadır. Bu reçine sistemleri, yüksek sıcaklıklara çıkarılır veya oda sıcaklığında son şekli verilir.

Termoset kompozitleri işlemedeki avantajlar;

1. Başlangıçtaki reçine sistemi sıvı formda olduğundan, termoset kompozitleri işlemesi kolaydır.
2. Lifler, termosetlerle kolay ıslatılabildiğinden, boşluk ve gözenek daha azdır.

3.Termoset kompozitlerin işlenmesinde, termoplastik kompozitlere göre, ısı ve basınç gereksinimi daha azdır. Bu da enerji kazanımı sağlar.

4.Termoset kompozitlerin işlenmesinde, basit ve düşük maliyetli teçhizat kullanılabilir [3].

Termoset kompozit işlemenin dezavantajları;

1.Termoset kompozit işleme, uzun kür zamanları gerektirir ve sonuç olarak termoplastiklere göre düşük üretim oranları elde edilir.

2.Termoset kompozit parçalar, bir kez kür edilir ve katılaştığında, tekrar şekil verilemez.

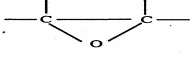
3.Termoset kompozitlerin geri dönüşümü bir sorundur [3].

Çizelge 2.2. Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [2]

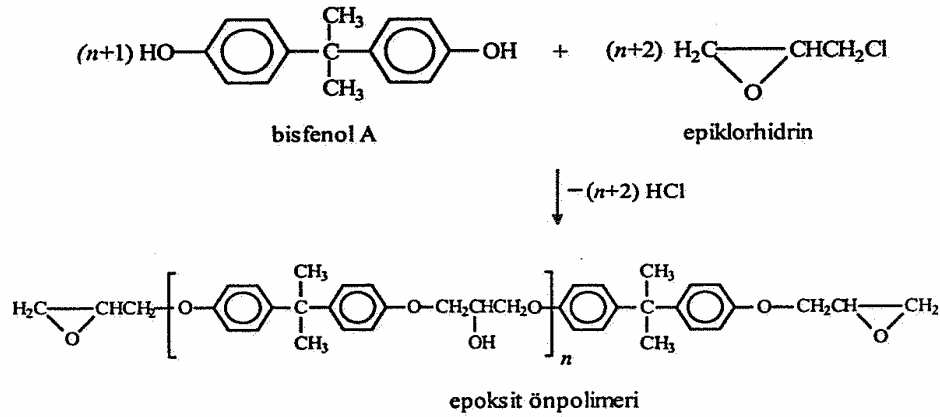
Malzeme	Epoksi	Polyester	Fenolik
Özellikler			
Yoğunluk (g/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik Modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4,2	1,5-2,0
Isıl iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme katsayısı (1/C°)	45-65	55-100	68

2.3. Epoksi (Epoksit) Reçineleri

Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi reçineler, reçine türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Epoksi grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Bu reçineler çeşitli ajanlar varlığında, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek termoset son ürün haline dönüştürülür. Epoksi reçineleri gerçekte polieter yapısındadırlar ve polieterlerin önemli bir grubunu oluştururlar. Epoksit reçinesi adı, monomerde

ve kür edilmeden önceki önpolimerde,  yapısındaki epoksit gruplarının bulunması nedeniyle verilir [3,6].

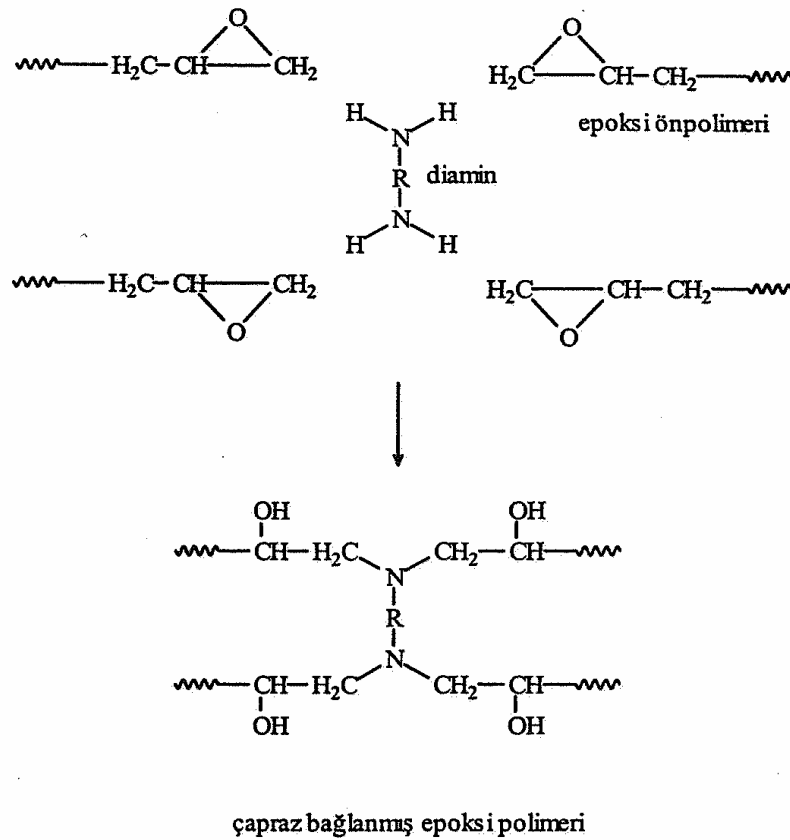
Epiklorhidrin ve bisfenol-A'nın bazik ortamdaki reaksiyonundan, ilk ticari epoksi reçinelerinden olan ve epoksit reçinelerin %95'ini oluşturan Diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA) ve yüksek molekül ağırlıklı türler elde edilir. Epiklorhidrin, propilenden sentezlenir ve sentetik gliserin prosesinin ara ürünüdür. Bisfenol-A ise fenollü aseton ile oluşturulan bir petrol türevidir. DGEBA, epiklorhidrinin bisfenol-A ile sodyum hidroksit varlığında reaksiyonuyla elde edilir. Termoset polimer yapısına iki aşamada geçilir. İlk aşamada fazla epiklorhidrin kullanılarak zincir sonlarında epoksit grupları bulunan düşük mol kütleli bir önpolimer hazırlanır [6].



Şekil 2.9. DGEBA'nın oluşumu [6]

Önpolimerdeki yinelenen birimin (n) büyüklüğü, elde edilecek epoksi polimerinin özelliklerini belirler. Küçük n değerlerinde polimer viskoz bir sıvı iken yinelenen birim sayısı 25 dolayına ulaştığında oda sıcaklığında katı ve serttir. Küçük n sayılı epoksitler üstün yapışma ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle koruyucu kaplama ve yapıştırıcı olarak kullanılırlar. Örneğin, düşük çapraz bağ yoğunluğu esneklik için gereklidir. Yüksek çapraz bağ yoğunluğu mekanik dayanım ve kimyasal direnç sağlar. Ayrıca, artan sıcaklıklarda yüksek sertlik (T_g yükseltmesi gibi) sağlar [6].

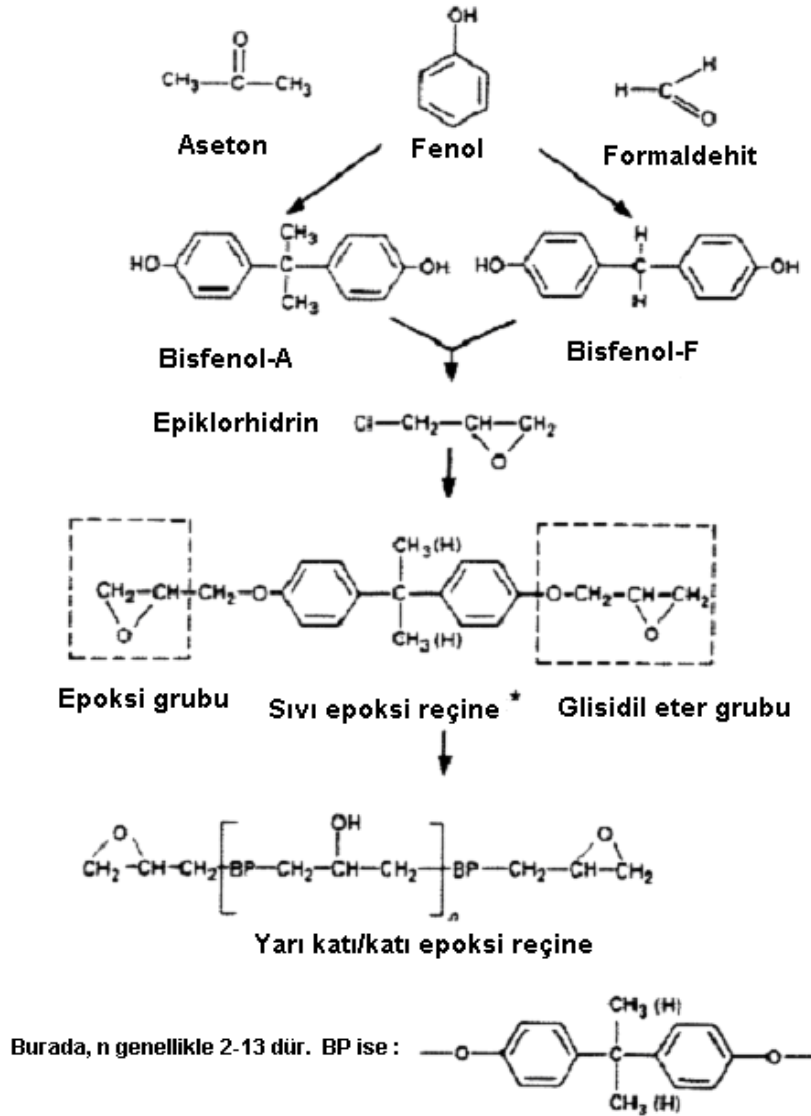
Termoset epoksi eldesinin ikinci aşamasında önpolimer, uygun bir çapraz bağlayıcı ile sertleştirilir. Örneğin, iki ayrı tüpte satılan epoksit yapıştırıcılarının birisinde önpolimer, diğerinde bir diamin vardır. İki madde karıştırıldığında aşağıdaki tepkimeye uygun olarak epoksit grupları üzerinden çapraz bağlanma gerçekleşir ve polimer termoset yapıya geçer. Dietilen triamin, trietilen tetraamin, heksametilen tetraamin, m-fenilen diamin çapraz bağlanmada kullanabilecek diğer aminlerdir [6].



Şekil 2.10. Çapraz bağlanmış epoksi polimeri [6]

Epoksilerin çapraz bağlanma sırasında uçucu madde oluşmaz, çapraz bağlanma sonrası büzülme oranları da (%1-5) düşüktür. Ancak, fiyatları yüksektir ve pişirme zamanları uzundur. Pişirme zamanını azaltmak amacıyla hızlandırıcılar kullanılarak çapraz bağlanma tepkimeleri hızlandırılır. Kullanım

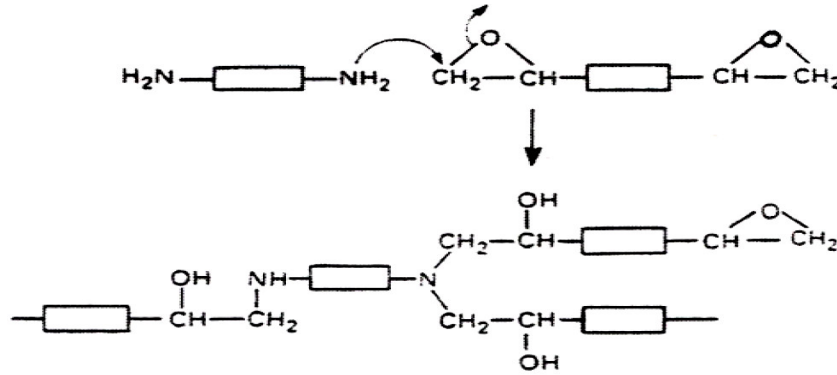
sıcaklıkları polimer özelliklerine bağlı olarak 150°C'ye kadar çıkar [6]. Şekil 2.11'de de epoksi reçinelerin üretimi ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



* DGEBA dır.

Şekil 2.11. Epoksi reçinelerin üretimi [15]

Epoksi reçinelerde kullanılan başlıca sertleştiriciler; lewis bazları, inorganik bazlar, birincil ve ikincil aminler ve amitlerdir. Ayrıca, karboksilik asit anhidritler, dibazik organik asitler, fenoller ve lewis asitleri de asit sertleştiriciler olarak epoksi sistemlerde kullanılmaktadır [16].



Şekil 2.12. Epoksi reçinelerin amin çapraz bağlanması [15]

Proses gereklerini yerine getirmek için uygun sertleştirici ve/veya sertleştirici sistemi seçilerek sertleşme hızları kontrol altında tutulabilir. Genellikle epoksi reçineler, bir anhidrit veya bir amin sertleştirici eklendiğinde sertleşme reaksiyonuna girer. Her sertleştirici farklı bir sertleşme profili gösterir ve son ürüne farklı özellikler katar. Modifiye edilmemiş bisfenol-A reçineleri (diglisidileter bisfenol A-DGEBA) genellikle ıslak yatırma sistemlerinde ısıyla sertleştirmek için kullanılır. Bunlar aminle sertleştirildiklerinde, daimin difenilmetan gibi, 150 °C'nin üstünde ısı defleksiyonu ısıyla mükemmel mekanik ve elektriksel özelliklere sahip olurlar [17,18].

Girdilerin oranı ve özellikleri ayarlanarak, farklı alanlarda kullanılabilecek ürünler hazırlanır. Epoksitler, kimyasallara karşı dirençleri, dayanıklılıkları, esnek oluşları ve iyi yapışma özellikleri nedeniyle yüzey kaplamaları için eşsiz bir polimerdir. Kimyasal korozyona ve aşınmaya karşı yüzeylerin kaplanmasında; yüksek kuvvetler etkisinde kalan yerlerin kaplanmasında; tüp, boru ve endüstriyel tankların astarlanmasında kullanılır. Epoksitler kompozitler için de iyi bir matristir. Epoksilerin %80'ini kaplama, laminat hazırlama ve kompozit yapımında tüketilir [6].

Isı-işlem görmüş epoksilerin dayanımı yüksek, ısı ve kimyasal dirençleri iyidir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Bu özelliklerin yanı sıra sahip olabilecekleri formülasyonların çeşitliliği ve çok yönlü islenebilirlik

özellikleri nedeniyle epoksi termosetler, birçok uygulama alanı bulmuştur. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. Yüzey kaplamaları, endüstriyel döşemeler, cam takviyeli kompozitler ve yapıştırıcılar uygulama alanı olarak sayılabilir. Epoksinin yalıtım özellikleri değişik elektronik uygulamalarda, örneğin, transistör ve baskı devre plakalarında kullanılmalarını sağlar [2,3].

2.4. Karbon Elyafı

Cam elyafının günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbonun elyafı kullanılmaktadır. Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır [5].

Karbon lifi ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3-5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. Karbon elyafları çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafıda grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon elyaf üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır [5]. Karbon elyafları piyasada 2 biçimde bulunmaktadır:

-Sürekli Elyaf: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve önceden reçine emdirilmiş elyaflarda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

-Kırılmış Elyaf: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler [5].

Karbon elyafının üretim süreci:

Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemeden elde edilir;

- Zift
- PAN (Poliakrilonitril)

Karbon, yoğunluğu 2.268 g/cm^3 olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Karbon ve grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiber olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak PAN, Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) olarak kullanılır. Dolayısı ile de üretildikleri maddelere göre isim alırlar. Günümüzde rayon sadece çok düşük modüllü elyaflar için kullanılır. Bu hammadde inert bir atmosferde $1000-3000^\circ\text{C}$ civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler. Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ile 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür [2].

Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. Karbon elyafın gerçek özellikleri üretim metoduna bağlıdır. Endüstriyel olarak karbon elyaf üretim metotları termal oksidasyon ve organik precursor kullanılarak grafitleme işlemleridir [2]. PAN tabanlı karbon elyafları kompozit

malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir. PAN'ın karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir;

1. Oksidasyon: Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300°C'de ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H'nin ayrılmasını daha uçucu olan O'nin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.

2. Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000°C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler;

3. Yüzey iyileştirmesi karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.

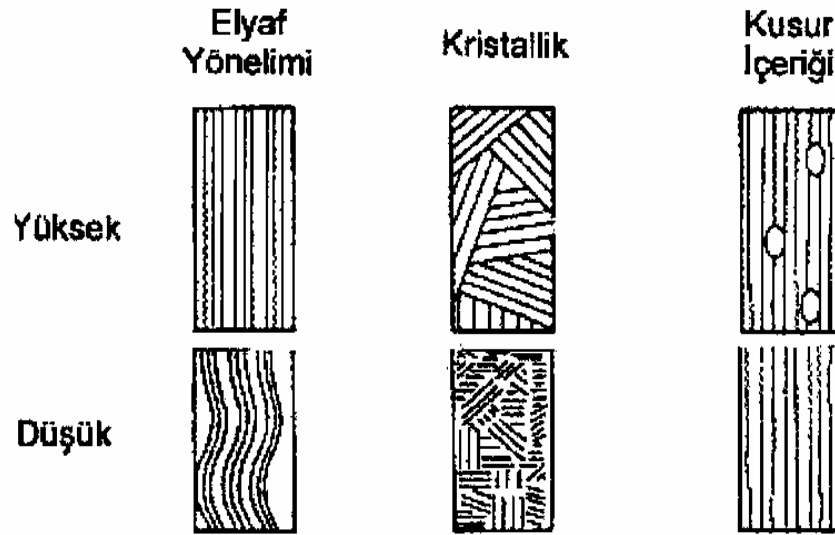
4. Kaplama; Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir ara yüzey görevi görür [5].

Karbon elyafının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek modülü özelliğidir. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir [5].

Karbon lifleri liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir lif türüdür. 1960'lı yılların ikinci yarısından itibaren kullanılmaya başlamış olan bu liflerin, düşük yoğunluğuna karşın çekme dayanımı ve E-modülü yüksektir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen karbon liflerinin özellikleri, üretimindeki son işlemin sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uygulamada 6 ile 10 µm arasında değişen çaptaki liflerin 1000-1500 adetlik demetlerinden

oluşan fitil ve dokumalar kullanılmaktadır. Üstün özelliklerinin yanı sıra son derece pahalı olan karbon lifleri, özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde yararlanılan bir malzeme niteliğindedir. Yüksek maliyeti nedeniyle yapı alanında kullanılmamaktadır [19].

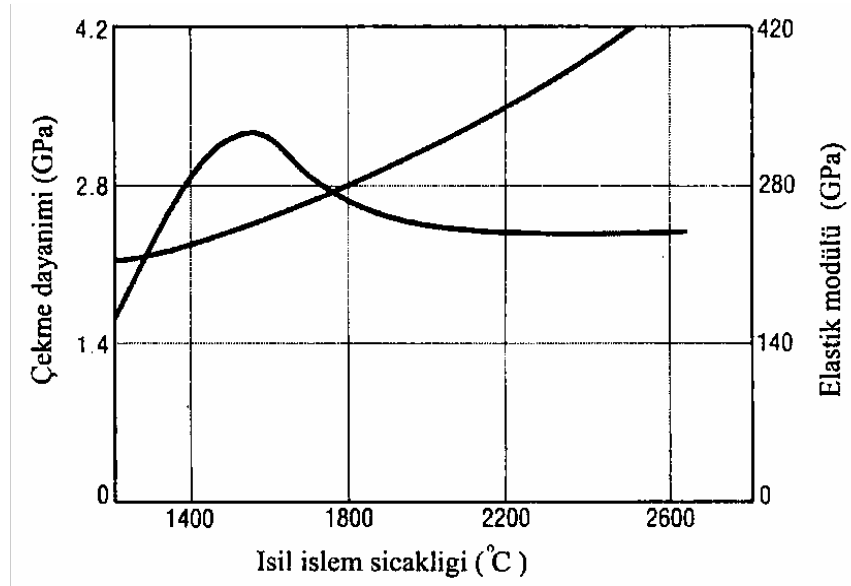
Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğunun yanında yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.



Şekil 2.13. Karbon elyafların temel yapısal özellikleri [2]

Kompozit malzemelerde karbon ve grafit elyaflar, çeşitli şekilde, örneğin, sürekli lifler ve demetler, kırılmış elyaflar, örgü ve dokunmuş elyaflar, öğütülmüş elyaflar olarak kullanılmaktadır. Sürekli elyafların çapları genellikle 8-10 μm ve iplik demeti şeklinde yaklaşık 12-120 000 sayıdan oluşabilmektedir. Örgü şeklindeki elyaflar kompleks şekilli parçaların kalıplanarak üretilmesine daha uygundur.

Şekil 2.14'de tipik bir grafitleme çevirimi ve sıcaklığın çekme dayanımı ve modülü üzerine etkisi gösterilmiştir. Ticari olarak PAN karbon elyafın iki tipi mevcut olup bunlar yüksek elastik modüllü (Tip 1), yüksek dayanım (Tip 2) olanıdır. En yüksek modül 2500-3000°C de üretilir. Ancak, dayanım ince yapı ve çatlakların dağılımı ile ilgilidir. Yüksek sıcaklık matrislerinde kullanmak için elyaflar, metal veya seramik koruyucu filmleri ile de kaplanabilir. Azot atmosferinde kararlı olmasına rağmen 400°C üzerinde havada artan oranda oksitlenir. Ancak uçak frenlerinde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda 1000°C'nin üzerinde karbon elyaflı karbon kompozitler dayanıklı olduklarından karbon elyafların kullanımı hızla artmaktadır [2].



Şekil 2.14. Çekme dayanımı ve elastik modülü üzerine sıcaklığın etkisi [2]

Karbon elyaflar pahalıdır, bu nedenle ileri kompozitleri hazırlanarak fiyatın önemli olmadığı uzay araçları, uçaklar, ileri teknoloji vb alanlarda kullanılırlar. Otomobil endüstrisi açısından karbon takviyeli kompozitlerin fiyatları henüz çelikle rekabet edecek düzeyde değildir. Karbon lifler de, cam lifler gibi yüzeyleri uygun bir polimerle (genelde epoksi ile) kaplanarak kompozit yapımına kadar korunurlar [6].

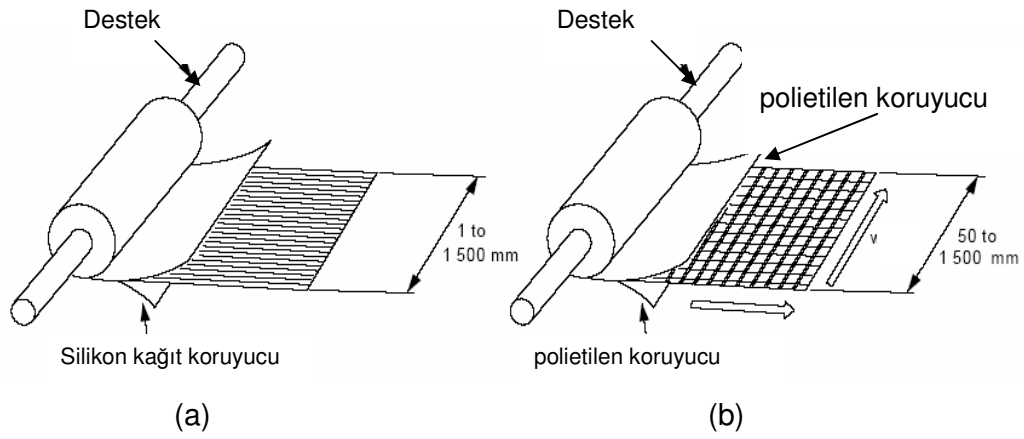
2.5. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden otoklav metodu aşağıda açıklanmıştır.

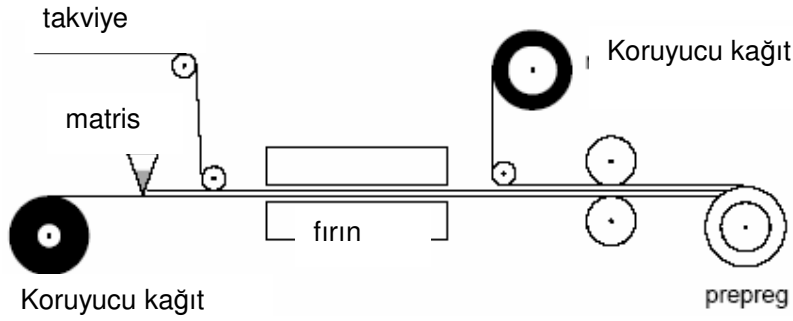
Otoklav metodu (Prepreg metodu)

Pre-empregne (Prepreg): Kuvvetlendirici lifler, yüksek sıcaklık ve basınç altında bir birleştirme işlemine maruz kalmadan önce reçine ile ıslatılarak bu işlemlere hazır hale getirilir. Bu olaya prepreg denir. Önceden reçine emdirilmiş fiberlerdir. Tek yönlü (takviye elemanı tek doğrultuda) formda ve dokuma formunda (takviye elemanı birçok doğrultuda) elde edilebilir. Prepreglerde genelde epoksi reçineler kullanılır. Burada reçine/elyaf oranı çok iyi bir şekilde kontrol edilebildiği bu yöntem uçak sanayiinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Prepregler vakum hatta basınç (7 bar) altında piştiklerinden katlar arası yapışma çok başarılıdır ve boşluk muhteviyatı asgariye indirilmiştir [11,12].

Prepreg metodu el ile yayma metoduna göre çok daha hassas bir metottur. Vakum torbası hazırlanması ve otoklavda (yapısal olmayan elemanlar için fırında) sertleştirme zorunluluğu yüzünden imalat maliyeti daha fazladır. Prepregler, belirli bir raf ömrüne sahip olduklarından kullanım öncesinde dondurularak (-18 derece ve daha aşağısı ortamda genelde 6 ay-1 yıl ömürlüdür) depolanması zorunludur. Ayrıca prepreglerin otoklavda, fırında sertleştirilmeleri öncesi oda sıcaklığında kalış süreleride yaklaşık 24 saatle sınırlıdır. Bu prepregler, bilgisayarla kontrollü lazer veya su jeti ile kesilerek yaprak şeklinde levhalar oluşturulur ve bunlar kalıp içerisine belirli yönde yerleştirilerek istif edilir. Örneğin, 0 °, 90 °, 0 °/90 °, 0°/45 °, 45°/45 ° vb.



Şekil 2.15. Tek yönlü ve dokuma şeklindeki prepreg görünüşü [11]
a) Tek yönlü prepreg, b) Dokuma prepreg



Şekil 2.16. Prepreg üretim şeması [11]

Prepreg, havacılık endüstrisi, tren, enerji, denizcilik endüstrisi, spor araçları gibi birçok yerde kullanım alanına sahiptir.

Bir otoklav sisteminde, farklı malzemelerin kür işlemi için, belirlenmiş bir programa göre basınçlı bir tank içerisinde kompleks kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bir otoklav kür sisteminin ana elemanları; basınçlı bir tank, tank içerisinde gaz akımını sağlayan bir ısı kaynağı, iç basınç sistemi ve operasyon kontrol sistemleridir. Ayrıca kalıpları otoklava yüklemek için, raylı bir araç sistemi gereklidir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.

Otoklav kür işleminden önce, malzemeler kompozit serme katlarına reçine miktarını ve basıncı kontrol altında tutabilmek için uygun olarak yerleştirilir. Kür işlemi süresince sıcaklık, basınç ve malzemeler kontrol edilmelidir. İnce katman, ayırıcı, emici, bariyer, havalandırıcı, baraj ve vakum çantası otoklav kür işleminde malzeme hazırlamada kullanılan malzemelerdir. Malzemeler kirlenmelerden korunmuş olmalı ve kür sıcaklığı ile uyumlu olmalıdır. Şekil 2.17’de basit bir serme konfigürasyonu görülmektedir.

İnce katman :İsteğe bağlı olarak, kompozit laminetlerin üstünde veya altında kullanılırlar. Genellikle dokunmuş naylon, poliester veya camyünü kumaş olurlar [10].

Ayırıcı : Kompozit laminetin ve “ince katman”ın altına veya üstüne yerleştirilir. Florokarbon polimerleri içeren naylonumsu bir malzemedir. Amacı, kür işlemi sırasında uçucu gazların ve fazla reçinenin prepregin yüzeyinden uzaklaştırılıp “emici” ye geçmesini sağlar [10].

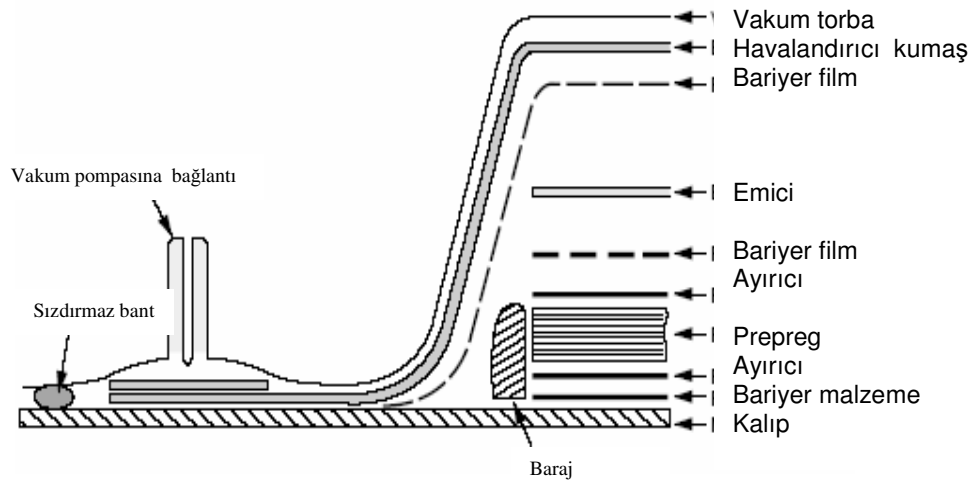
Emici : Kür işlemi sırasında laminetlerden (prepreg) fazla reçineyi emmek üzere cam yünü veya emici başka bir kumaştan yapılmış malzemedir [10].

Bariyer : Emici ve havalandırıcı katları arasında kullanılan, emicinin emdiği malzemenin daha yukarı çıkarak, vakum hattını tıkamaması için konulan, genellikle gözeneksiz veya az gözenekli, yapışmayan türde bir film malzemedir [10].

Havalandırıcı : Bariyer film üzerine yerleştirilen, uygulanan vakumun tüm parça yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağılabilmesi için konulan, camyünü, poliester veya pamuktan elde edilmiş, oldukça gözenekli bir yapıya sahip olan malzemedir [10].

Baraj : Laminetin kenarlarında fazla reçine kaplanmasını engellemek ve vakum çantasının işlem sırasında kenarlarda toparlanmasını önlemek için yerleştirilir [10].

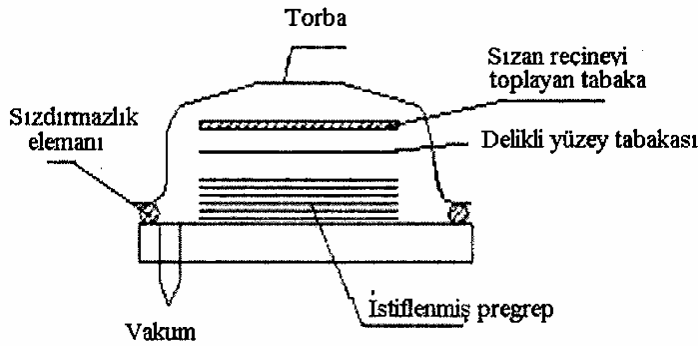
Vakum çantası : Hazırlanan parça üzerine kür işleminden önce ve kür işlemi sırasında basınç uygulamakta kullanılan naylon malzemedir [10].



Şekil 2.17. Basit bir serme konfigürasyonu [11]

Kalıp içerisine levha şeklinde istif edilen elyaf ve matris çiftleri sistemdeki tüm havayı dışarı atmak için vakum torbaya konulur. Bunun içinde delikli yüzey tabakası ve sızan reçineyi toplayan tabakalarda kullanılır. Bunların üzerine naylon örtülür ve kenarlardan sızdırmazlık sağlanır, otoklav yavaşça ısıtılır. Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeye yüksek ısı ve basınç uygulayarak sağlanabilir. Düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir. Otoklav kesin basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam

olarak kontrol edilebilir. Otoklavın ısıtılmasıyla önce reçine erimeğe başlar sonra basınç altında ve sıcaklıkta bir gaz altında sertleşmesi sağlanır. Atmosfer basıncı kalıp içindeki havayı ve sızan reçineyi ve laminetteki boşlukları elimine eder ve daha yüksek camın konsantre olmasını sağlar. Parçanın son bitirme yüzeyini iyileştirir. Sıcak gazın sirkülasyonu düzenli bir sıcaklık sağlar [2]. Bu teknik ekonomik olup vakum altında uygulama sadece basınçlı gaz aralığıyla torba kalıbı üzerine yapılmaktadır. Böyle bir torba kalıplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Torba kalıplama yöntemi şematik görünüşü [2]

Diğer kompozit malzeme üretim yöntemleri; Elle yatırma (hand lay-up), Püskürtme (spray-up), Elyaf sarma (filament winding), Reçine transfer kalıplama RTM/reçine enjeksiyonu, Profil çekme/pultrüzyon (pultrusion), Hazır kalıplama/compression molding (SMC,BMC), Hazır kalıplama pestili/SMC (sheet moulding composites), Hazır kalıplama hamuru/BMC (bulk moulding composites), Preslenebilir takviyeli termoplastik/glass mat reinforced thermoplastics (GMT) vb bir çok üretim yöntemi vardır [5].

2.6. Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni bir çok

sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır [5]. Çay tepsisi, masa, sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri ve araç şarjı atlama sıırıkları, kaynak takımı, tenis raketi, yarış kanoları değişik birleşik malzemelerden yapılan ürünlerdir [5].

• *Uzay ve havacılık sanayisinde:* Birleşik malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlamlık nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Birleşik malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında birleşik malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve keklar elyafı değişik reçinelerle değişik birleşik malzemeler yapımında kullanılmaktadır [5,20].

• *Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisinde:* Birleşik malzemelerin silah üretimi de kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuştur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaş performansını artırıcı niteliktedir. Roket üretiminde birleşik malzemelerin rolü oldukça büyüktür. Örnek olarak M72 de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen keklar ve epoksiden, M77 MLRS'de lüle (nozzle) karbon birleşik malzemesinden yapılmaktadır. Miğfer konusunda keklar ve değişik reçineler kullanılmaktadır. Kurşun geçirmez yeleklerde günümüzde bitişli keklardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçineler imal edilmektedir ve tasarım alternatiflerinin bulunmasıyla git gide artacak ve birçok avantajlarıyla insanlığın hizmetine verilmiş olacaktır [2,5,20].

- Şehircilik:* Bu alanda kompozitler, toplu konut yapımında, çevre güzelleştirme çalışmalarında (heykel, banklar, elektrik direkleri v.s.) kullanılmaktadır. Üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım imkanları sağlamaktadır.

- Ev aletleri:* Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde komple ve karışık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır [20].

- Elektrik ve elektronik sanayi:* Kompozitler, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında kullanılmaktadır.

- Otomotiv sanayi:* Bu alanda kompozitlerden oluşan başlıca ürünler; otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve oto lastikleridir.

- İş makineleri:* İş makinelerinin kapakları ve çalışma kabinleri yapımında da kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı azaltılabilmekte, tek parça üretim mümkün olmaktadır. Ayrıca elektrik izolasyon malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır.

- İnşaat sektörü:* Cephe korumaları, tatil evleri, büfeler, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. Tasarım esnek ve kolay olmakta, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlamaktadır. İzolasyon problemi çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır [20].

- *Tarım sektörü:* Seralar, tahıl toplama siloları, su boruları ve sulama kanalları yapımında kompozitler özel bir öneme sahiptirler. Kompozit malzemelerden yapılan bu örnekler istenirse ışık geçirgenliği, tabiat şartlarına ve korozyona dayanıklılık, düşük yatırım ve kolay montaj gibi avantajlar sağlamaktadır [20].

2.7. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

2.7.1. Termal karakterizasyon

“Termal Analiz”, bir maddenin kontrollü biçimde ısıtılması yada soğutulması sırasındaki fiziksel özellik değişimlerinin sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmesi ve yorumlanmasıdır [21].

Tam bir termal analiz sisteminde maddenin ağırlık kaybı, dönüşüm sıcaklıkları ve enerjileri, boyut değişimleri, viskoelastiklik özellikleri gözlenir. Bu ölçümler kimyasal tepkimelerin ve dinamik özelliklerin aydınlatılması, bileşim analizi, ürün kalite kontrolü açısından faydalı olur. Termal analizin en geniş uygulandığı alanlar arasında seramik malzeme, plastikler, yakıtlar, toprak ve kil endüstrisi sayılabilir [21].

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre ile termal karakterizasyon ise değişimlerin absorplanan veya açığa çıkan ısınsın, sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmesi ve tanımlanması temeline dayanmaktadır. DSC yöntemi ile maddelerin camsı geçiş sıcaklığı, erime, kaynama, kristallenme ve termal bozunma yapıları incelenir. DSC hücresi esas olarak iki adet kalorimetreden oluşur. Bunlardan birine örnek içeren kapsül diğerine referans içeren kapsül yerleştirilir. Değişen sıcaklıkla birlikte her iki kapsüle aktarılan ısı farkı milivolt olarak algılanarak buradan örnek kapsülündeki örneğin aldığı veya verdiği ısı kayıt edilir. Bu ısı farkı organik veya inorganik esaslı herhangi bir malzemedeki

enerji alışverişi ile paralel giden herhangi bir fiziksel veya kimyasal değişimi sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak açıklayabilme olanağı verir.

Bu tür termal analizde de örnek madde ve bir referans maddesi belli bir sıcaklık programı altında kontrollü olarak ısıtılır veya soğutulur. Bu esnada eğer referans maddede fiziksel yada kimyasal bir değişiklik oluyorsa ya enerji açığa çıkacak ya da enerji absoplanacaktır. Dolayısıyla referans madde ve örnek sıcaklıklarını aynı düzeyde tutabilmek için sistem tarafından örnekten ısı alınması veya örneğe ısı verilmesi gerekir. Bu ısı alışverişi, örnek maddenin geçirdiği dönüşümde söz konusu olan enerji değişimi ile aynıdır. İşte, Diferansiyel Taramalı Kalorimetre’de (Differential Scanning Calorimetry) bu enerji dengesi gözlenir ve yorumlanır [21].

Termogravimetrik analiz (TGA)

Bu analiz tekniği bir maddenin sıcaklığındaki değişim sırasında meydana gelen dönüşümlerdeki ağırlık değişimlerini kantitatif olarak verir. Örneğin bir maddenin dehidratasyonu veya bozunması sırasındaki ağırlık değişimlerini zaman veya sıcaklığa bağlı olarak gözlemek olanağı vardır. Ağırlık değişimi yüksek sıcaklıklarda fiziksel veya kimyasal bağların kopması veya oluşumu sonucunda meydana gelir. Bu esnada ortaya çıkacak uçucu maddeler sistemden ayrılacağı için ağırlıkta azalma kaydedilir. TGA verileri çeşitli kimyasal tepkimelerin mekanizması ve termodinamiğini aydınlatılabileceği gibi oluşan ürünler hakkında da fikir verir [21].

Termogravimetrik yöntemden elde edilen bilgiler, DSC yönteminden elde edilen bilgilere oranla daha sınırlı olup, bunun başlıca nedeni sıcaklık değişiminin analitin kütlesinde bir değişim oluşturması gerektiği içindir. Enerji değişimi yaratan dönüşümler (fiziksel veya kimyasal) mutlaka bir ağırlık değişimi yaratmayabilir. Böyle bir değişim prosesinin DSC termogramı alınabileceken, termogravimetrik incelemede hiçbir şey gözlenmeyecektir. Saf bir katı maddenin ergimesi buna örnektir. Ergime sırasında dışarıdan

enerji absorplanır fakat hiçbir ağırlık değişimi olmaz. Ancak bunun aksi doğrudur. Yani genellikle her ağırlık değişim prosesinde mutlaka bir enerji değişimi de olur. Bu esnada absorplanan veya serbest kalan enerji miktarı DSC yoluyla ölçülebilir [22].

Termogravimetrik yöntemlerin uygulamalarının yoğunlaştığı en önemli alan, polimerlerle ilgili çalışmalar olarak gösterilebilir. Termogramlar, hazırlanan çeşitli polimer ürünleri için bozunma mekanizmaları hakkında bilgi verir. Bunlara ek olarak, bozunma şekilleri her bir polimer için karakteristik olduğundan, bunların tanınmalarında da kullanılabilir [22].

2.7.2. Mekanik karakterizasyon

Mekanik özellikler, maddelerin çekme, sıkıştırma gibi dış kuvvetler karşısında gösterdikleri tepkilerin tamamını kapsar. Polimerlerin mekanik özellikleri; kimyasal ve fiziksel yapılarına, işlenme yöntemlerine, kullanım koşulları (sıcaklık gibi) ve sürelerine bağlıdır. Polimerlerden üretilen malzemelerin çekme dayanımı, vurma dayanımı, sıkıştırma dayanımı, sertlik türü mekanik özellikleri, standart koşullarda veya malzemenin kullanılacağı koşullara yaklaştırılmış laboratuvar ortamında yapılan testlerle ölçülür. Test sonuçlarından iki temel bilgi elde edilir; polimerin test yapılan koşullara benzer ortamlarda, test edilen mekanik özellik açısından kullanılıp kullanılmayacağı anlaşılır ve farklı malzemelerin benzer mekanik özellikleri karşılaştırılabilir.

Çekme testi

Malzemeler uygulamada yüklere veya kuvvetlere maruz kalırlar. Uygulanan bu yüklerin malzemedeki kalıcı deformasyona yol açmaması için ya belli bir değerin altında olması ya da bu yüklere dayanıklı uygun bir malzeme kullanılması gerekmektedir.

Çekme testinde numuneye kendi uzunluğu boyunca tek eksen üzerinde kırılana kadar çekme kuvveti uygulanır. Yapılan test neticesinde malzemenin gerilme-gerinim ilişkisi ortaya çıkarılır.

- Çekme Gerilmesi: Çekme gerilmesi, deney esnasında herhangi bir anda deney numunesine uygulanan kuvvetin (yükün) numunenin serbest kısmının kuvvet uygulanmadan önceki enine kesitinin birim alanına düşen kısmıdır.

- Çekme Mukavemeti (σ_{T11}): Çekme mukavemeti, kopma anındaki çekme gerilmesidir. Birimi MPa'dır. Çekme mukavemeti;

$$\sigma_{T11} = \frac{P_R}{b.h} \quad (2.1)$$

Burada;

P_R : kopma anındaki kuvvet, N

b : genişlik, mm

h : kalınlık, mm

- Boyut Değişmeleri (ϵ_{11} ϵ_{22}) (uzama,gerinim) : Boyut değişmesi, numunenin serbest kısmı üzerinde alınan iki referans noktası arasındaki uzaklıkta, çekme kuvveti uygulandıktan sonra meydana gelen değişme miktarının bu referans noktaları arasındaki ilk uzaklığa oranıdır.

ϵ_{11} : Elyaf yönüne paralel olan yönde meydana gelen boyut değişmesidir.

ϵ_{22} : Elyaf yönüne dik olan yönde (levha yüzeyinde) meydana gelen boyut değişmesidir.

-Kırılmada çekme uzaması (gerinim): kırılma noktasında meydana gelen boyut değişimi uzama olarak adlandırılır. Kırılmada çekme uzaması Eş. 2.2'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\epsilon_b = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2.2)$$

Burada;

ϵ_b = kırılmada çekme uzaması

L_o = orijinal ölçüm uzunluğu (numunenin ilk uzunluğu)

L = kuvvet uygulandıktan sonra anlık boy

ΔL = deformasyon sonucu numunenin boyundaki değişim ($L-L_o$)

Yüzde çekme uzaması ise ϵ_b değerinin 100 ile çarpılması ile elde edilir [23].

- Kopma Anında Yüzde Boyut Değişmesi (% A) : Kopma anında yüzde boyut değişmesi, serbest deney numunesi üzerinde alınan iki referans noktası arasındaki aralığın deney numunesine çekme kuvveti uygulanıp koparılmasıyla, bu uzaklıkta meydana gelen artma miktarının, serbest numunedeki uzaklığa oranından bulunan sayıdır. Kopma anında % A olarak boyut değişmesi;

$$\% A = 100 (\epsilon_{11})_R \quad (2.3)$$

$(\epsilon_{11})_R$: Kopma anında, elyaf yönündeki boyut değişmesi

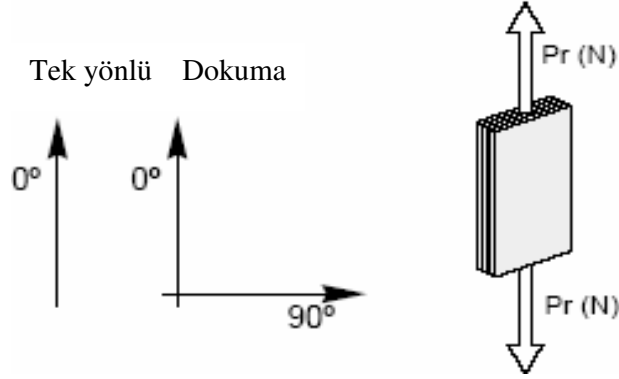
Oldukça düşük gerinim hızı seviyelerinde çekmeye tabi tutulan metallerin büyük bir bölümü için elastik bölgede gerilme-gerinim ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.4)$$

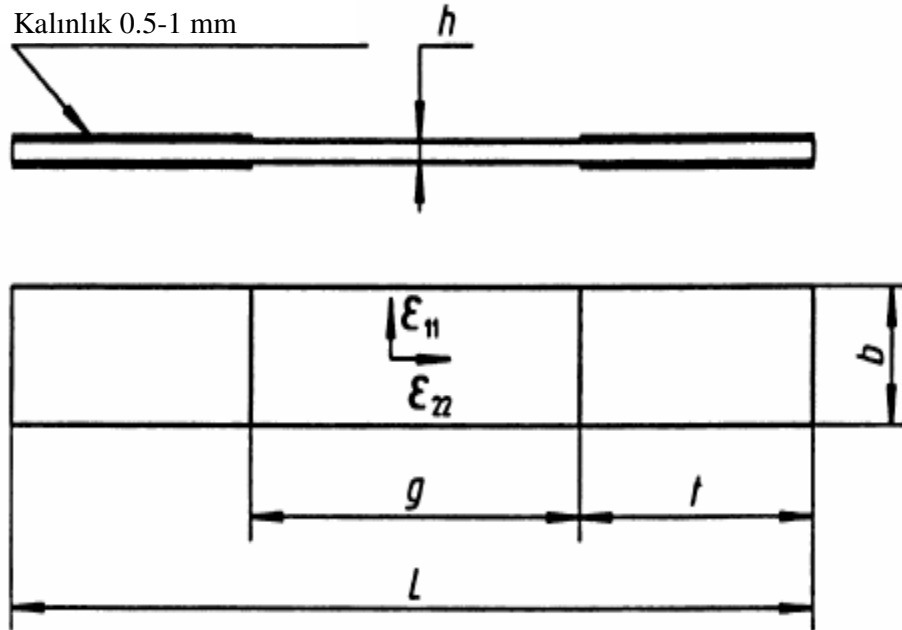
Bu denklem Hooke kanunu olarak, E ise elastisite modülü olarak bilinir. Buradan çekme modülü;

$$E \text{ (MPa)} = \frac{Pr \cdot L}{b \cdot h \cdot \Delta L} \quad (2.5)$$

dir [24].



Şekil 2.19. Çekme testinde uygulanan kuvvet yönü [11]



Şekil 2.20. Çekme testi numunesi [23]

Çizelge 2.3. Çekme testi numune boyutları [23]

Uzunluk (mm)	L	250±1
Genişlik (mm)	b	25±0,5
Kalınlık (mm)	h	2±0,2
Uç desteklerinin uzunluğu (mm)	t	60
Serbest uzunluk (mm)	g	130±1

Sıkıştırma testi

Sıkıştırma kuvveti (basma kuvveti), malzemeye çekme kuvvetinin tersi yönde, malzeme yüzeyleri doğrultusunda uygulanır ve sıkıştırma sonucu malzemenin kuvvet doğrultusundaki boyutu kısalır (hacmi değişir).

-Sıkıştırma gerilimi (σ_c): herhangi belirli bir zamanda numuneye uygulanan sıkıştırma kuvvetinin deney parçasının başlangıç kesit alanına oranıdır. Birimi MPa'dır.

-Sıkıştırma dayanımı (σ_{cM}): numunenin dayandığı maksimum sıkıştırma gerilimidir. Birimi MPa'dır.

$$\sigma_{cM} = \frac{F_{\max}}{bh} \quad (2.6)$$

$F_{\max}$: maksimum yükleme, N

b : numunenin genişliği, mm

h : numunenin kalınlığı, mm

-Sıkıştırma gerinimi (ϵ_c): ölçüm bölgesindeki azalmanın başlangıçtaki ölçüm bölgesine oranı.

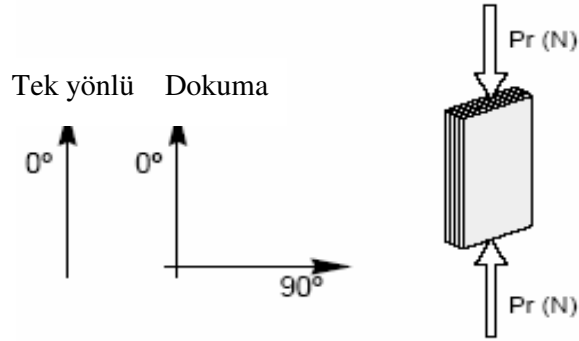
-Kırılmada sıkıştırma uzaması (ϵ_{cM}): Kırılmada sıkıştırma gerilimine karşılık gelen uzama.

-Sıkıştırma elastik modülü (E_c): σ'' ve σ' farkının ε'' ve ε' farkına oranıdır. Birimi MPa'dır.

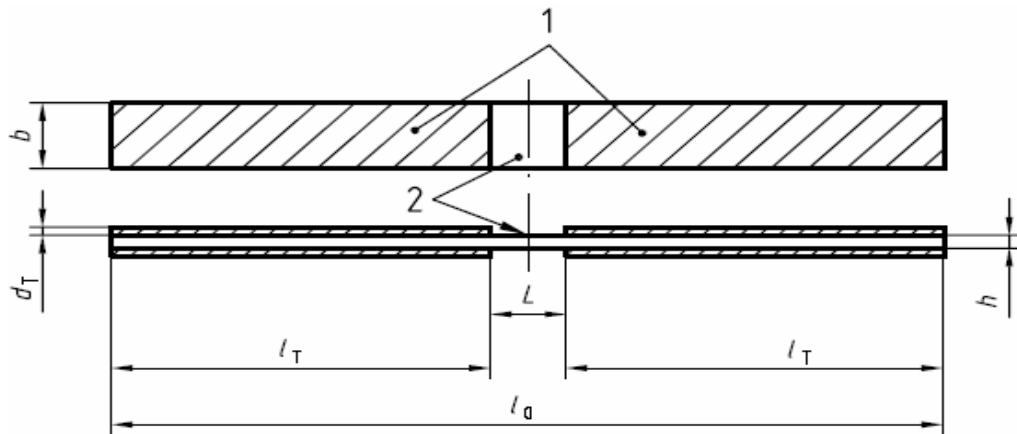
$$E_c = \frac{\sigma''_c - \sigma'_c}{\varepsilon''_c - \varepsilon'_c} \quad (2.7)$$

σ'' , $\varepsilon''=0,0025$ değerine karşılık gelen sıkıştırma gerilimi, MPa

σ' , $\varepsilon'=0,0005$ değerine karşılık gelen sıkıştırma gerilimi, MPa



Şekil 2.21. Sıkıştırma testinde uygulanan kuvvet yönü [11]

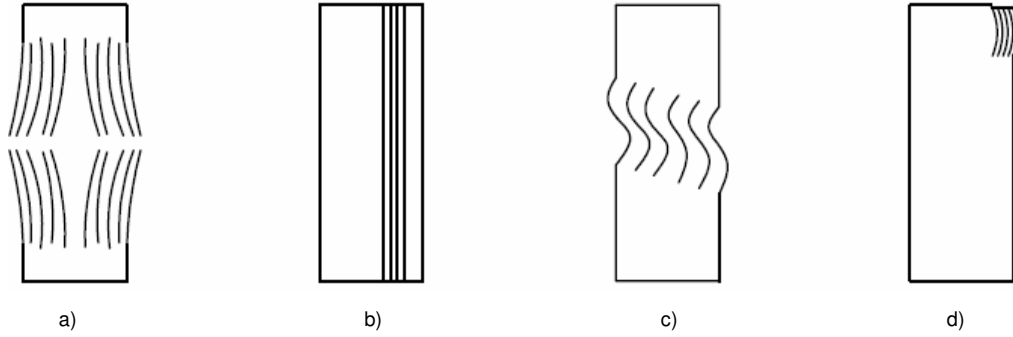


Şekil 2.22. Sıkıştırma testi numunesi [25]

1 Uç destekler
2 Numune

Çizelge 2.4. Sıkıştırma testi numune boyutları [25]

Numune uzunluğu (mm)	l_o	110 ± 1
Kalınlık (mm)	h	$2 \pm 0,2 - 10 \pm 0,2$
Genişlik (mm)	b	$10 \pm 0,5$
Uç destekler arası mesafe (mm)	L	10
Uç destek uzunluğu (mm)	l_t	50
Uç destelerin kalınlığı (mm)	d_t	0,5-2



Şekil 2.23. Tipik hasar modları [25]

a)Tip K (kırılma), b)Tip L (uzunluğuna yarılmaya), c)Tip M (buruşma), d) Tip N (kenar hasarı)

Taşıma testi

Testin amacı malzemenin taşıma dayanımını belirlemek ve deliğin deformasyonuna karşı taşıma gerilimini göstermektir. Bilinen bir gerçek yüksek dayanımlı malzemeler genel olarak yüksek taşıma dayanımı verirken, taşıma dayanımının, malzemenin çekme veya sıkıştırma özelliklerinden hangisiyle açıklanabileceğine dair (tatmin edici) metod bulunmamaktadır [26].

- Taşıma alanı: numunenin kalınlığı ile delik çapının çarpımıdır.
- Taşıma dayanımı: taşıma deliği çapında %4 bozunma olduğu noktada taşıma gerilimidir.
- Taşıma gerilimi: uygulanan kuvvetin (N), taşıma alanına (mm^2) bölümüdür.
- Uç mesafe oranı: taşıma deliğinin merkezinden numunenin yükün uygulanacak olan uç kısmına uzaklığının, delik çapına bölümü.

-Maksimum taşıma gerilimi: numunenin dayandığı maksimum yüklemenin (N), taşıma alanına bölümü.

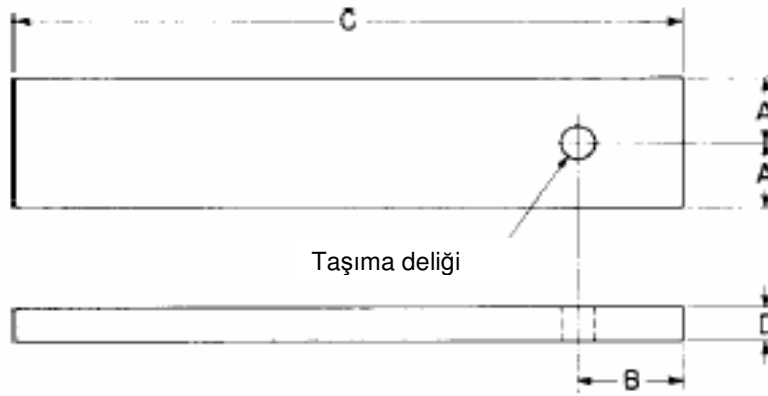
$$S_b = P/(td) \quad (2.8)$$

S_b = taşıma dayanımı, MPa

P = %4 delik deformasyonunda taşıma yüklemesi, N

d = taşıma delik çapı, mm

t = numune kalınlığı, mm [26]



Şekil 2.24. Taşıma testi numune boyutları [26]

Çizelge 2.5. Taşıma testi numune boyutları [26]

A	11,913±0,127 (mm)
B	19,050±0,127(mm)
C	120,6 (mm)
D	3,2 (mm)
Taşıma deliği çapı	3,175 +0,025 -0,000 (mm)
Taşıma iğnesi çapı	3,150+0,000 -0,025 (mm)

Düzlem içi kayma testi

Düzlem içi kayma gerilimi, τ_{12} : Kayma gerilimi numuneyi iki eşit parçaya bölen anlık yükleme ile elde edilir. Birimi MPa'dır [27].

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad (2.9)$$

Burada;

F = ani yük, N

b = numunenin genişliği, mm

h = numunenin kalınlığı, mm

Düzlem içi kayma dayanımı, τ_{12M} : $\gamma_{12} = 0,05$ olduğu zaman testin bitiş zamanında veya bitişinden önce hesaplanan en yüksek kayma gerilmesi. Birimi MPa'dır [27].

$$\tau_{12M} = \frac{F_m}{2bh} \quad (2.10)$$

Burada F_m , bozulma anındaki yük veya bozulmadan önce test $\gamma_{12} = 0,05$ noktasında sonlandırıldığındaki yük miktarı, birimi N'dur.

Kayma gerinimi, γ_{12} : Numunenin paralel ve dikey eksen yönlerinde gerinim miktarlarının toplamıdır. ($\epsilon_x - \epsilon_y$). ϵ_x pozitif olduğu zaman ϵ_y 'in işareti negatiftir.

$$\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y \quad (2.11)$$

Burada;

ϵ_x = numune eksenine paralel yöndeki gerinim,

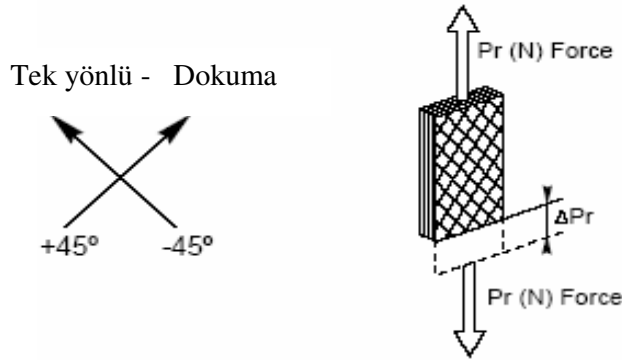
ϵ_y = numune eksenine dik yöndeki gerinim [27].

Kayma modülü, G_{12} : kayma gerilimi farkının ($\tau_{12}'' - \tau_{12}'$), kayma gerinimi farkına ($\gamma_{12}'' = 0,005 - \gamma_{12}' = 0,001$) oranıdır. Birimi MPa'dır.

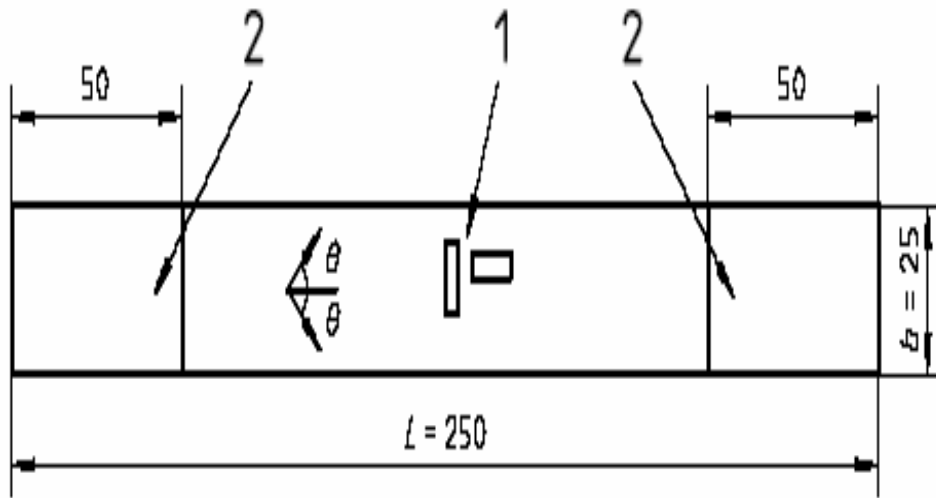
$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad (2.12)$$

τ_{12}' kayma gerilimidir $\gamma_{12}'=0,001$ olduğu zaman;

τ_{12}'' kayma gerilimidir $\gamma_{12}''=0,005$ olduğu zaman.



Şekil 2.25. Düzlem içi kayma testinde uygulanan kuvvet yönü [11]



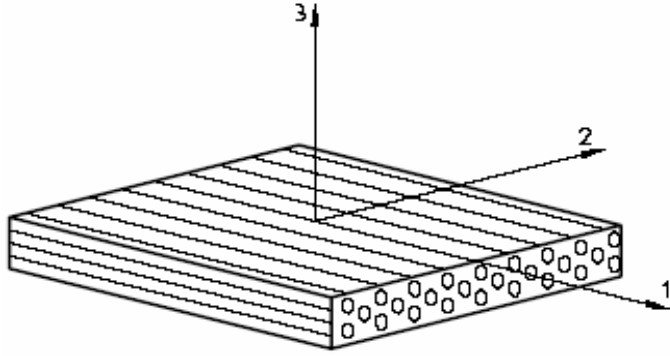
Şekil 2.26. Kayma testi numunesi (Birimler mm olarak verilmiştir) [27]

1 gerinim ölçüsü

2 uç

θ elyaf açısı ($\pm 45^\circ$)

numune kalınlığı $h=2$ mm



Şekil 2.27. Simetri eksenleri gösterilmiş tek yönlü takviyeli plâstik kompozit
“1” işaretli yön 0° veya boyuna (uzunlamasına) yön, “2” işaretli yön ise 90° veya enine yön olarak da tanımlanabilir [27]

2.7.3. Yüzey karakterizasyonu

Kompozit yapının mukavemetinde önemli unsur elyaf ile matris arasındaki bağın yapısıdır. Kompozit malzemelerde kırılma yüzeylerinin incelenmesine dayanarak; takviye sistemi ile matris sistemi ara yüzeyi, matris içindeki partikül dağılımı ve matrisin takviye sistemini ıslatabilirliği hakkında bilgiyi taramalı elektron mikroskopisi yöntemini kullanarak elde edebiliriz.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir [28].

Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger

elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır [28].

Mikroskopta bir seferde 10 mm yüksekliğinde 9 mm çapında 4 adet numune incelenebilmektedir. Mikroskopta yapılacak incelemelerde numuneler genellikle inorganik ve organik olarak iki grupta toplanabilir. Ayrıca inorganik numuneler de metal ve metal-olmayanlar şeklinde iki gruba ayrılabilir. Metal numuneler iletken oldukları için yüzeyleri kaplama yapılmadan incelenebilir. Ancak metal olmayan yalıtkan numunelerin yüzeyleri en fazla 20 nm mertebesinde iletkenliği sağlayan altın veya karbon ile kaplanması gerekmektedir. Karbon kaplama genellikle X-ışınları ile yapılacak analizlerde uygulanır. Yüksek çözünürlüğe ve kontrasta sahip numune görüntüsü elde etmek için, incelenecek numuneler metal olsa bile yüzeylerine altın kaplama işlemi uygulanmaktadır [28].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Shindo ve arkadaşları, cam elyaf takviyeli polimer dokuma tabakaların çekme ve hasar davranışlarını deneysel ve analitik olarak azalan sıcaklıkta incelemiştir. Çekme testleri aşamalı olarak oda sıcaklığında, 77, 20 ve 4 K sıcaklıklarda numunelere uygulanmıştır. Hasar gelişimini belirlemek için çekme testi sırasında akustik (ses dağılım biçimi) emisyon(salıverme, salma) monitörü kullanılmıştır. İlerleyen hasar analizini yapmak için iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanılmıştır. G-11 dokuma-kumaş cam/epoksi tabakaların çekme ve hasar davranışını oda sıcaklığı, 77, 20, ve 4 K sıcaklıklarda araştırılmıştır. Numunenin boy uzunluğu ile çekme özellikleri çok fazla etkilenmemiştir. Numune yüzeyinin hasar davranışı deneysel gözlemleri de içine almıştır [29].

Yılmaz ve Sınmazçelik statik yükleme şartları altında karbon/polifenil sülfid kompozitlerin taşıma performansını araştırmışlardır. Bağlantı şişine karşı duruş dayanımı, bağlanma geometrisi, tabaka yönlenmesi, levha kalınlığı boyunca basınç dağılımı vb. gibi birleşim ve malzeme parametrelerine bağlıdır. Tek yönlü karbon elyaf takviyeli polifenil sülfid (PPS) matris kompozitlerin taşıma performansını araştırmak için, Instron 4411 kullanılarak ASTM D953 standardına göre deneyler yapılmıştır. Şişin yükleme performansı tabakaların elyaf yönlenmesi ve deformasyon özellikleri ile yakından ilgili olduğu görülmüştür. Ayrıca delik merkezinden numunenin ucuna kadar olan mesafe (E) ve plaka genişliği (W) ve iğne çapı (D) gibi geometrik parametreler malzemenin yüklemeye karşı duruş performansını dikkate değer şekilde etkilemiştir. Net çekme ve kesmeye karşı hasar ani kırılğan şekilde fakat taşıma hasar davranışı aşamalı olarak ilerleyen şekilde olduğu görülmüştür. Laminatların elyaf yönlenmesi kompozit malzemelerin yüklemeye karşı performans durumlarını etkilediği sonucuna varılmıştır [30].

Morais ve arkadaşları cam, karbon ve aramid dokumalarla takviyeli kompozitlerin tekrarlanan düşük enerjili darbelere karşı dayanımlarında

tabaka kalınlığının etkisini darbe enerjilerinin iki derecesi için belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki kesin bir enerji derecesinin altında, konu ile ilgili belirlenen en değişken çarpma direnci tabakanın enine kesitidir. Darbe enerji derecesi artırıldığı zaman elyaf özelliklerinin etkili olduğu görülmüştür. Tabaka kalınlığı artması ile cam dokuma takviyeli kompozit darbe direncinde en dik artışı göstermiştir. Bu davranış kullanılan cam dokumanın kaplanan yüksek alanına bağlanmıştır [31].

Mathur, yerel kaynaklardan yapı malzemelerinde kullanılan doğal elyafli kompozitler hakkında bir çalışma yapmıştır. Doğal elyaflar düşük maliyette, yerel olarak bolca bulunabilir ve yenilenebilir kaynaklardan sağlanabilir. Takviye malzemesi olarak kullanılan sisal (liflerinden halat vb yapılan bir bitki) ve hint keneviri elyafların nem absorpsiyonu problemine karşı araştırmalar yapılmıştır. Bu doğal elyaflardan ve doymamış poliestere/epoksi reçinelerden yapılan polimer kompozitlerin performansı çeşitli nem oranlarında ve hava şartlarında değerlendirilmiştir. Tabakalar/paneller, kapılar, çatı kaplama levhaları, panjur ve hamur kalıplama bileşenleri gibi çeşitli kompozit ürünler hazırlanmıştır. Doğal elyaf kompozit paneller/kapı panjurların üretimi için proses bilgisi ticarete katılmıştır. Doğal elyaf kompozitler özellikle tahtadan yapılan malzemelere alternatif olarak artan bir rol oynayarak çok geniş fırsatlar sunmuştur [32].

Knops ve Bögle elyaf/polimer tabakaların aşamalı yıkımı üzerine araştırma yapmışlardır. Kompozitlerde temel olarak bir tabakanın tek katmanlarının elyaf hasarı (FF) ve ara elyaf hasarı (IFF) ayırt edilmelidir. Örneğin basınçlı kaplar gibi birçok uygulamalarda, FF kaçınılmaz olarak tabakalı IFF biçimlerinin toplam hasarına götürür. Bu basınçlı kaplarda proses hasarı aşamalıdır. IFF bir katmanda olduğu zaman bu katın sertliği düşürülür ve tabanın diğer katmanlarına yük transferi orada daha yüksek gerilim ve daha uzak bölgede hasara götürür. Bu tatmin edici olmayan durumu değiştirmek için terkibi bozulma modellerinin ayarı (kalibrasyonu) için deneysel sıkıştırma verileri oluşturulmuştur. Bu veri ve yeni geliştirilen analitik program *Subu*

elyaf/polimer tabakalar için aşamalı hasar prosesi gerçeğe uygun bir şekilde hesaplanabilmektedir. Çalışmada sunulan deneysel verilerle tek yönlü tabakalar için aşamalı hasar prosesi ve IFF ile kompozit yapıların karmaşık deformasyon davranışları Puck modeli ile fevkalade doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Gerilim/gerinim ve tek yönlü katmanlardan oluşan tabakaların hasar analizinde önemli gelişme elde edilmiştir [33].

Sudarisman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon ve silikon karbit elyafların birlikte takviyesiyle oluşan tek yönlü epoksi kompozitlerin sıkıştırma hasarını incelemişlerdir. Test numunelerinin hasarı iki ana gruba ayrılmıştır, boyuna yarık ve elyaf dolaşmaları ile sıkıştırma kesiği ve sıkıştırma buruşması adlarını almıştır. SiC elyaflar ve/veya C elyafları içeren epoksi matristen oluşan tek yönlü elyaf takviyeli polimer kompozitler sıkıştırma yüklemesi altında test edilmiştir. Şu sonuçlar elde edilmiştir; C ve SiC elyafların karışımından oluşan kompozitlerin, sıkıştırma dayanımı, elastik modul veya kırılma çalışmalarında önemli artış not edilmemiştir. SiC elyafın artması ile bu elyafların yüksek yoğunluğundan dolayı özgül sıkıştırma dayanımı ve özgül elastik modülü genel olarak düşmüştür [34].

Kim ve arkadaşları, düşük sıcaklıklarda grafit/epoksi kompozitlerin çekme dayanımını incelemişlerdir. T700/epoksi kompozitin çekme özellikleri, çevresel bir test odasında düşük sıcaklıklarda termo-mekanik yüklemelerden geçirmişlerdir. T700/epoksi tek yönlü laminatlara termo-mekanik çekme yüklemeleri sırasıyla oda sıcaklığından (RT) -50°C'ye, RT'den -100 °C'ye ve RT'den -150 °C'ye (CT) uygulanmıştır. Sonuçlar, termo-mekanik döngü az bir etki yaptığı zaman, sıcaklık düşmesiyle çekme sertliğinin önemli bir şekilde arttığı görülmüştür. CT işleminden sonra dayanımın azalma hızı düşürüldüğü zaman, sıcaklık CT'nin altına düşerken çekme dayanımı düşmüştür. Test sonuçlarının analizi için tabakalı kompozit numunenin RT ve CT her iki sıcaklıkta termal genleşme katsayıları (CTEs) ölçülmüştür ve elyaf ve matris arayüzeyi SEM görüntüleri kullanılarak gözlemlenmiştir. T700/epoksi tek yönlü kompozitlere termomekanik yükleme döngüsünün

etkilerini ve $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığın altına düştüğü zaman sertlik ve dayanımdaki değişiklikler araştırılmıştır. Çekme sertliği sıcaklık azalması ile artma eğilimi göstermiştir ve üç sıcaklık döngüsünden sonra yoğun hassasiyet oluşmuştur. Diğer bir tarafta dayanım düşmüştür. Bu sonuçlar tabakaların CTEs'nin ölçümleri ile araştırılmıştır. Çekme testi ve kırılan numunelerin fotomikrograflardan alınan sonuçlardan T700/epoksi tek yönlü tabakaların benzer sertlik ve dayanım değerleri benzer sonuçlar verme eğilimindedir [35].

Pinho ve arkadaşları tabakalı kompozitlerde çekme ve sıkıştırmada elyaf hasar biçimlerinin kırılma tokluklarını incelemişlerdir. T300/913 karbon-epoksi tabakalı kompozitte elyaf çekme hasarı ve sıkıştırma elyaf dolaşması ile kırılma tokluğu kompakt çekme (CT) ve kompakt sıkıştırma (CC) testleri kullanılarak ölçülmüştür. Numune gerinim alanı test sırasında dijital nokta fotogrametri sistemi kullanılarak izlenmiştir. Testlerden sonra numunelerin hasar durumunu C-scan ve optik ve taramalı elektron mikroskopi yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Elyaf çekme hasarında kritik serbest kalan enerji hızı başlama ve yayılma değerleri 91.6 kJ/m^2 ve 133 kJ/m^2 olarak belirlenmiştir. Elyaf sıkıştırma dolaşması için başlama değeri 79.9 kJ/m^2 elde edilmiştir fakat anlamlı yayılma değerleri elde edilememiştir. Her iki durumda da test sonuçları düşük sapma göstermiştir [36].

Wonderly ve arkadaşları yaptıkları çalışmada karbon elyaf/vinil ester kompozit ve cam elyaf vinil ester kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasını incelemişlerdir. Cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalar iki eksenli cam ve karbon elyaflara vinil esterin vakum infüzyonu ile üretilmiştir. Cam ve karbon elyaf numunelerin dayanıklılığını belirlemek için çekme, sıkıştırma, delik açık çekme ve delik açık sıkıştırma, enine çekme, çentik ve balistik çarpma testleri uygulamışlardır. Karbon elyaf tabakalar, elyafların baskın olduğu yerde çekme yüklemesi altında ve çentik dayanım yükleme şartları altında mekanik olarak yüksek bulunmuştur. Eşit kalınlıktaki laminatlar için karbon elyaf tabakaların dayanımının cam elyaf tabaka dayanımına göre oranı elyaf çekme dayanımları oranına benzer bulunmuştur.

Karbon elyaf numunelerde hasar genel olarak belirli bir bölgede ve cam elyaf numunelere göre dayanım daha fazla dağılmıştır [37].

Yazıcı ve Ülkü yaptıkları çalışmada iki boyutlu rasgele dağılımlı E-cam lifi/poliester matris kompozitlerde yükleme hızının mukavemet üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada iki boyutlu rasgele dağılımlı kısa cam elyafı takviyeli polyester matrisli kompozit plaklarda çekme hızının kompozit mukavemeti üzerine etkileri araştırılmıştır. Bir, iki ve üç tabakalı kompozitler üretilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre çekme hızı arttıkça kompozit mukavemetinde düşme görülmüştür. Ayrıca, tabakalı kompozitin gerilme değerleri tabaka sayısı arttığında yükselse bile, bu tek tabakanın gerilme değerleri ile kıyaslandığında olması gereken değer çok altında çıkmıştır. Yazarların yayınladığı diğer çalışmaları ve devamı niteliğindeki bu çalışmadaki bulgular dikkate alındığında cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerde 2D rasgele dağılımlı takviye durumunda, yükleme hızı ile kompozit mukavemetinin düştüğü ve bu düşüşte lif/matris arabiriminin önemli rol oynadığı anlaşılmıştır. E tipi cam elyafı ve Poliester matrsten oluşan kompozit malzeme için yükleme hızı arttıkça kompozit mukavemetinde bir düşüş beklenmesi gerekir. Burada hem takviye ve hem de matris malzemesinin sert ve kırılgan olmasının etkisi büyüktür. Tek tabakalı yapılarda lif/matris arabirim özellikleri etkin olup yükleme hızının artışı ile kompozit mukavemetinin azalmasının başlıca sebebidir. Tabakalı yapılarda tabakalar arası bölge kompozit mukavemetinin olması gerektiğinden daha düşük değerlerde olmasına neden olur [38].

Yaşar ve Arslan, yaptıkları çalışmada elyaf olarak silan kaplanmış sürekli cam elyaf (E-camı), matris olarak da poliester kullanmak suretiyle sıcak presleme yöntemiyle kompozit üretimi yapılmıştır. Üretilen bu kompozitler kullanılarak elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel doğrultuda ve % 15 elyaf hacim oranında elde edilmiştir. Bu durum, farklı elyaf konumları için aşınma mekanizmalarının farklı olması ile

açıklanabilmiştir. Kayma hızı ve yüzey basınç arttıkça, sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızı azalmıştır. Sürtünme katsayısı farklı elyaf konumları için farklı çıkmıştır. Bunun sebebi sürtünme sırasında oluşan arayüzey özelliklerinin farklılaşmasından kaynaklanmıştır. Elyaf lar dik konumdayken yapılan testlerde numune yüzeyinde aşırı ısınma sonucu kömürleşme meydana gelmiştir. Bu durum karşı yüzeyde polimer filmi oluşmasını engellemiş ve sürtünme katsayısının yüksek ($\mu=0.40$) çıkmasına sebebiyet vermiştir. Bu konumda termal aşınma etkin olmuş ve aşınma hızı yüksek çıkmıştır. Paralel konumda ise sürtünme daha ziyade liflerle karşı yüzey arasında gerçekleşmiştir. Çalışmada uygulanan şartlar altında ($P=0.32-1.4$ MPa ve $V=5-14$ m/s) en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel konumda elde edilmiştir. Bunun nedeni karşı yüzey tarafından çekmeye zorlanan liflerin çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle kolayca kopmamaları ve matristen ayrılmamalarındandır. Antiparalel durumda ise liflerin daha ziyade eğilmeye zorlanmaları sonucunda kırılmakta ve matristen daha kolay ayrılmaktadır. Elyaf lar dik konumda ise yukarıda verilen nedenlerle aşırı gürültü, yüzeyde yanma ve parçalanma gözlenmiştir. En düşük aşınma hızı %15 elyaf hacim oranında bulunmuştur. Bu orandan sonra aşınma hızında artış gözlenmektedir. Çalışılan aralıkta kayma hızı ve yüzey basıncı arttıkça sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızları azalmıştır. Elyaf lar dik konumda termal aşınma mekanizması daha etkin olmuştur [39].

Sheffer ve arkadaşları, örme yapılar ile kuvvetlendirilmiş kompozitlerin darbe dayanımlarını incelemişlerdir. S-camından 1x1 rib, interlock ve milano rib şeklinde örülmüş üç farklı yapı oluşturmuşlardır. Bu örme yapıların her birine epoksi reçine emdirilerek düz kompozit yapılar elde etmişlerdir. Elde edilen kompozitlere mukavemet testleri ve IZOD metoduna göre darbe testleri uygulanmışlardır. Her bir kompozitin ilmek sırası ve ilmek çubuğu yönündeki testlerini yapmışlardır. Testlerde standart düz dokuma cam lifinden kumaş kullanılarak kuvvetlendirilmiş kompozit referans olarak kullanılmıştır. Düz dokuma kumaş ile kuvvetlendirilen kompozitlerin en iyi mukavemet sonuçlarına sahip olduğunu görmüşlerdir. Darbe testlerinde ise, örme

kumaşlarla kuvvetlendirilen kompozitlerin en iyi sonucu verdiğini görmüşlerdir. Milano rib doku ile kuvvetlendirilen kompozitin ilmek sırası yönünde, interlock doku ile kuvvetlendirilen kompozitin ise ilmek çubuğu yönünde en iyi darbe dayanımına sahip olduğunu görmüşlerdir [40].

Chocron ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, aramid ve polietilen esaslı beş farklı kompozitin dinamik mukavemet değerlerini Hopkinson bar yöntemi ile test ederek, numerik analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel ve numerik sonuçlardan Hopkinson bar yönteminin kompozit malzemelerin kuvvet altında uzama oranlarını ölçmede kullanışlı olduğu sonucuna varmışlardır. Dokuma kompozitlerde kopma mukavemetinin yükselmesinin, uzama oranını düşürdüğünü ve polietilen kompozitlerin aramid kompozitlere göre polietilenin özelliklerinden dolayı çok çeşitlilik gösterdiği sonucuna varmışlardır [41].

Lee ve Soutis yaptıkları çalışmada IM7/8552 tek yönlü karbon elyaf epoksi kompozitlerin sıkıştırma dayanımını eksenel yönde numune boyutunun etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Laminat ölçü uzunluğu, genişliği ve kalınlığı, 2 ve 4 olan bir ölçme faktörü ile 10 mm x 10 mm x 2 mm olan temel numune boyutundan arttırılmıştır. Bütün durumlarda numune boyutu arttırıldığı zaman maksimum %45 azalma ile dayanım düşmüştür; eksenel modul değerleri için anlamlı değişiklikler gözlenmemiştir. Optik mikrograflar hasar mekanizması matris parçalanması ve kırılması ile elyaf bükülmelerinin olduğunu göstermiştir. Bütün numunelerde hasar yeri, özellikle kalın olanlarda, tab uç noktalarıdır ve ölçü bölgesi geometrik devamsızlık erken hasarlara neden olmaktadır ve bu nedenle sıkıştırma dayanımı azalmıştır. İki genel yarı eşyönlü çok yönlü (MD) numuneler, biri $[45_n/90_n/-45_n/0_n]_s$ kalıplama katları ve diğer $n=2, 4$ ve 8 sayıları ile $[45/90/-45/0]_n$ s dağıtılan katlar sıkıştırma testine tabi tutulmuştur. Üç farklı ölçü bölgesi (30 mmx30 mm, 60 mmx60 mm ve 120 mmx120 mm) tek yönlü numunelere aynı testler uygulanarak boyut etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Dayanım sonuçları göstermiştir ki dağıtılan katlar arttırıldığı zaman ve 2 mm kalınlıktaki

numuneler karşılaştırıldığı zaman boyut etkisinin olduğu görülmemiştir. Hesaplanan tek yönlü hasar gerilimi (çok yönlü laminat içinde 0° katların) yaklaşık 1710 MPa ile 2 mm kalınlıktaki tek yönlü numunenin ortalama değeri olan 1570 MPa'dan biraz fazladır. Kalın numunelerde (>2 mm) tek yönlü sıkıştırma dayanımı tab sonlarında gerilim konsantrasyonundaki gelişim ile ve elyaf yanlış düzenlenmesi, katlarda dalgalanma ve boşluklar gibi üretimden kaynaklanan hatalar görülebilmektedir [42].

Yokozeki ve arkadaşları tek yönlü ve çok yönlü karbon elyaf takviyeli plastik (CFRP) kompozit laminatların lineer olmayan mekanik davranışları ve sıkıştırma dayanımlarını incelemiştir. Tek yönlü laminatların sıkıştırma davranışları ve dayanımları, yarı-izotropik laminatlarla beraber, T800H/3633 ve T800S/3900-2B kullanılarak ölçülmüştür. 0° tabakanın dayanım kriterine bağlı tahmin edilen sıkıştırma dayanımı deneysel sonuçlar ile uyumuştur. $[45/0/-45/90]_{2S}$ laminatların sıkıştırma dayanımı da ölçülmüştür. Elyaf açılarının yanlış düzenlenmeleri tek yönlü ve yarı-izotropik laminatlarda kontrol edilmiştir. Bütün laminatlarda küçük yanlış düzenlenmeler ($<1^\circ$) gözlenmiştir. Elyaf doğrultusunda lineer olmayan elastik özellikler $[45/0/-45/90]_{2S}$ laminatların tabaka davranışlarında göze çarpan etkilere dönüşmüştür. Yarı-izotropik laminatların sıkıştırma dayanımları 0° tabakanın dayanım kriterine bağlı olarak tahmin edilebilmiştir[43].

Larsson ve Svenson, karbon ve organik liflerden elde edilen hibrit kompozitlerin özelliklerini incelemiştir. Çarpmanın olduğu yüzeyde karbon lifleri kullanmak kaydıyla karbon/polietilen ve karbon/PBO liflerinin %100, 75/25, 50/50, 25/75 ve %100 oranında kullanıldığı kompozitler elde etmişler ve bu kompozitlerin darbe davranışını incelemiştir. Yapılan testler sonucunda 75/25 oranında quasi isotropik karbon lifi /cross ply polietilen liften elde edilen kompozitin baskı mukavemetinin %20 azaldığını ve balistik hız limitinin %82 arttığını gözlemlemiştir [44].

Tanoğlu ve Seyhan E-cam elyaf takviyeli poliester kompozitlerin mekanik ve balistik performansları üzerine bir poliester prefom bağlayıcının etkisini incelemişler. Kullanılan bağlayıcı kompozit panelde hasar yüzdesini azaltmıştır. Cam preformlar, çeşitli konsantrasyonlarda termoplastik poliester bağlayıcı ile kaplanan cam kumaş parçaları üzerine basınç ve sıcaklığın etkisi ile güçlendirilmiştir. Bağlayıcı içeren preformların kabuk dayanımı ölçülmüş ve en yüksek kabuk dayanımı ağırlıkça %9 oranında bağlayıcı içeren preformun olduğu görülmüştür. Bağlayıcının ağırlıkça %3 oranında kullanılmasıyla sırasıyla bükme dayanımı ve bükme tokluğu %15 ve % 40 oranında azalmıştır. E-cam elyaf/poliester kompozit üzerine, 1.1-g FSP kullanarak gerçekleştirilen balistik testler sonucu çarpmadan etkilenen kompozitlerin hasar genişlemesi üzerine bağlayıcı miktarının bazı önemli etkileri olduğu anlaşılmıştır. Bağlayıcı malzemenin kompozit laminalar arası bölge özelliklerini modifiye etme potansiyeline sahip olduğu ve kompozit mekanik ve balistik performans özelliklerini optimize etme potansiyeline sahip olduğu görülmüştür [45].

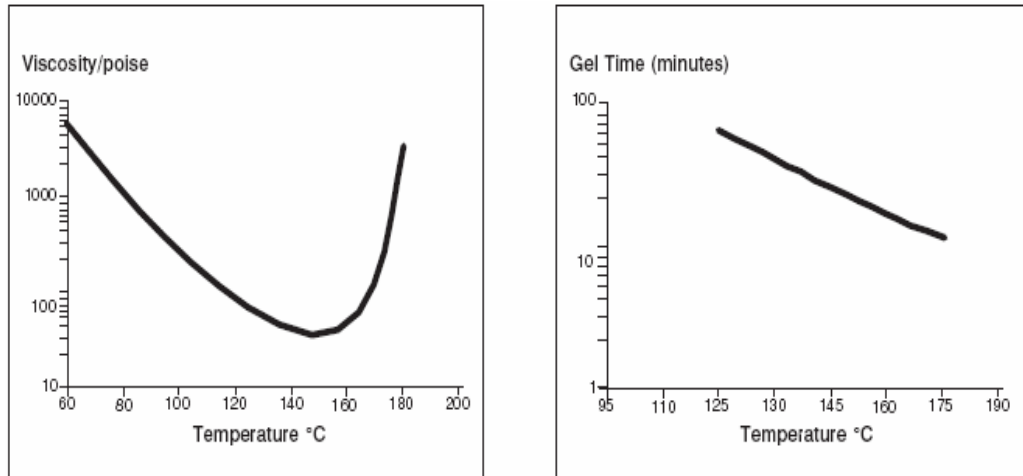
Morye ve arkadaşları, jel eğerme yöntemi ile elde edilmiş polietilen liflerinden elde edilen kompozitlerin balistik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan kompozitleri iki şekilde elde etmişlerdir. Birincisi geleneksel prepreg yöntemi ile diğeri ise eriyik kumaş üzerine serilip sıcak sıkıştırma işlemi ile elde edilmiştir. Bu iki grup kompozit ile farklı lif ve matris düzenleri araştırılmıştır. Sonuçta geleneksel yöntemle elde edilen kompozitler ile sıcak sıkıştırma yöntemiyle elde edilen kompozitlerin balistik performansının aynı olduğunu gözlemlemişlerdir. Fakat iki kompozitin enerji absorblama mekanizmalarının farklı olduğu gözlenmiştir. Sıcak sıkıştırma yöntemi ile elde edilen kompozitlerin çarpma enerjisini liflerin deformasyonu ve laminatın kat yapısının bozulması ile absorbladığını gözlemlemişlerdir. Bilinen prepreg yöntemi ile elde edilen kompozitlerin enerjiyi sadece liflerin deformasyonu ile absorbe ettiği ve arayüz mukavemetinin enerji absorblama mekanizmalarında önemli rol oynadığı sonucuna ulaşmışlardır [46].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler

4.1.1. Pre-empreyne (Prepreg)

Çalışmada prepreg malzeme olarak TUSAŞ Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TAİ)'den temin edilen, HexPly® 8552 epoksi reçine esaslı, Magnamite® AS4 tek yönlü karbon elyaf içeren HexPly® 8552 prepreg kullanıldı. 180°C'de kürleştirilebilen 12K (12000 küçük iplikçikten oluşur), %34 reçine içeren, elyaf yüzeysel ağırlığı 190 g/m², kürleşmiş tabaka kalınlığı 0,184 mm olan bir prepreg çeşitidir. Prepreg'te kullanılan epoksi reçinenin özellikleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Epoksi reçinenin viskozite-sıcaklık ve jelleşme süresi-sıcaklık grafiği

Çizelge 4.1. Epoksi reçinenin bazı özellikleri

Renk	Sarı
Yoğunluk	1,301 g/cm ³
Camsı geçiş sıcaklığı, T _g	200 °C
Çekme dayanımı	121 MPa
Çekme modülü	4670 MPa

Magnamite® AS4 karbon elyafın bazı özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Karbon elyafın bazı özellikleri

Çekme dayanımı	4,278 MPa
Çekme modülü	228 GPa
Uzama	1,87%
Karbon içeriği	94.0 %
Yoğunluğu	1,79 g/cm ³
Spesifik ısınma ısısı 75 °C	0.22 cal/g°C
175 °C	0.27 cal/g°C
Elektriksel direnç, 12K	0.32 ohm/cm

4.1.2. Kalıp ayırıcı

Çalışmada ayırıcı olarak TAl’den temin edilen Frecote ® 44-NC kullanılmıştır.

4.2. Kompozit Numunelerinin Hazırlanışı

Bu çalışmada, %34 reçine içeren tek yönlü karbon elyaf/epoksi reçine prepreg kullanılmıştır. Çalışmanın devamında numune gruplarını anlatmak için Çizelge 4.3’de belirtilen kodlar kullanılacaktır. Numune gruplarının hazırlanmasında, prepreg katları ve elyaf yönlenmesinin değişmesi dışında aynı numune hazırlama yöntemi kullanılmıştır. Kompozit numunelerin hazırlanmasında otoklav yöntemi kullanılmıştır.

Numune Hazırlama Yöntemi: Kullanılacak kalıp temizlenmiştir. Temizlemek için Metil etil keton (MEK) kullanılmıştır. Ayırıcı olarak Frecote ® 44-NC kullanılmıştır. Ayırıcı 0°, 45° ve 90° olarak üç kat sürülüp ve her kat arası sürülen doğrultuda 15 dakika temizlenmiştir. Kalıp ısı tabancası yardımı ile 60°C’a ısıtılmıştır. Prepreg malzeme -18°C’de muhafaza edilmiştir ve kullanımından önce oda sıcaklığında 8 saat bekletilmiştir. Prepreg kesimi bilgisayar ortamında kontrollü bir şekilde otomatik olarak 30x30 cm boyutlarında yapılmıştır. İstenilen konfigürasyonda hazırlanan ilk prepreg el ile serilmiştir. Üzerine genellikle gözeneksiz veya az gözenekli, parçanın

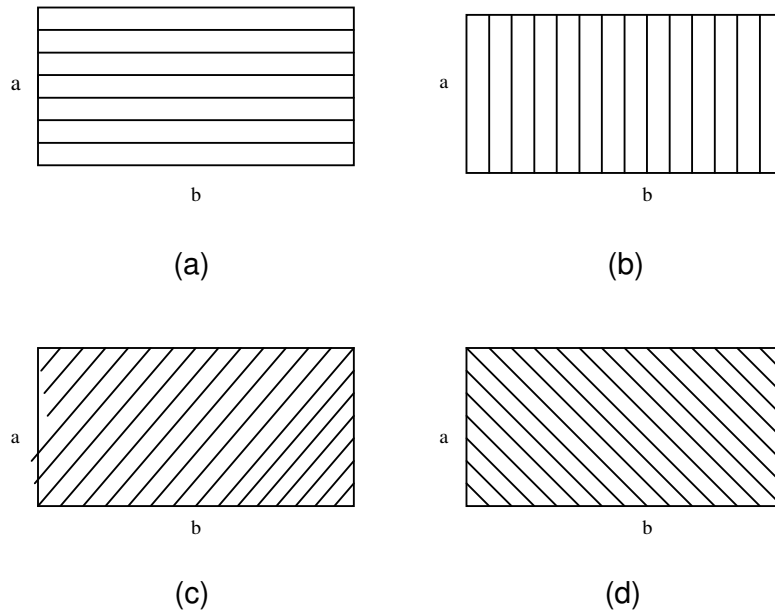
vakum torbasına yapışmamasını sağlamak için yapışmayan türde bir bariyer film serilmiştir. Sonra bariyer film üzerine uygulanan vakumun tüm parça yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağılabilmesi için konulan, cam elyaf ve poliesterden elde edilmiş, oldukça gözenekli bir yapıya sahip olan havalandırıcı konulmuştur. Havalandırıcı üzerine hava yastığı konulmuştur ve hazırlanan parça üzerine vakum torbası örtülmüştür. Vakum torbası bir sızdırmaz bant ile kenarlara tutturulmuştur. Daha sonra vakum torbasının hava yastığı üzerine gelen kısımları kesilmiştir ve 2 m² 'ye bir vakum ağzı (yolu) takılmıştır ve 1 ekstra vakum ağzı ölçüm için kullanılmıştır. Vakuma bağlanmıştır ve 1 atm'de 15 dakika tam vakum uygulanmıştır. Sonra torba açılmıştır ve her üç kat prepreg serildikten sonra aynı işlemler tekrarlanmıştır. Kalıbın kenarına 1 in boşluğa otoklavda ısınma soğuma durumunu ayarlamak için ısılçift tutturulmuştur. Isılçiftin diğer ucu otoklava takılmıştır. Daha sonra torba açılmıştır ve kenarlara otoklava dayanacak başka bir sızdırmaz bant yapıştırılarak torba tekrar kapatılmıştır. Daha sonra otoklava konulmuştur ve vakum kaçırıyor mu kontrol edilmiştir. 2°C/min ısıtma hızı ile sıcaklık 180 °C'a çıkarılmıştır ve basınç 6.9 bar'a yükseltilmiştir. 180 °C'de 2 saat bekletilmiştir ve 3 °C/min hızla soğutma yapılmıştır. Sıcaklık 60 °C'ye düştüğü zaman basınç kaldırılmıştır. Sonra parça çıkarılmıştır. Kalıptan numune çıkarılmıştır ve kenarlardaki çıkıntılar kesilmiştir. Numuneler uygulanacak test boyutuna göre karbon çakı ile kesilmiştir. Uç kısmına askı, destek denilen genellikle epoksi reçine cam elyaftan oluşan kısımlar film yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır ve tekrar torbalama yapılarak tekrar otoklav işlemi tekrarlanmıştır. Çizelge 4.3'de hazırlanan numune grupları, elyaf doğrultuları ve tabaka sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.3. Hazırlanan numune grupları, elyaf yönlenmeleri ve tabaka sayısı

Numune grubu	Yönlendirme	Tabaka sayısı	Serme Konfigürasyonu
E ₀	0°	10	0°
E ₉₀	90°	10	90°
E ₄₄₂	40/40/20	10	0/+45/90/-45/0/0/-45/90/+45/0
E ₂₆₂	20/60/20	10	+45/0/-45/90/+45/-45/90/+45/0/-45
E ₁₄₅	+/-45	10	+/-45
E ₂₄₅	+/-45	12	+/-45

Çizelge 4.3'de belirtilen yönlendirme şekillerinde 40/40/20 ile belirtilen yönlendirme şekli $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ yönlendirme sayılarını ifade eder. Örneğin; 10 tabakalı bir kompozitte 40/40/20 yönlendirmede tabakalardan 4 tanesi 0° , 4 tanesi $\pm 45^\circ$ ve 2 tanesi 90° yönlendirilmiştir. 4 tane $\pm 45^\circ$ 'li yönlendirmeden 2 tanesi $+45^\circ$, 2 tanesi ise -45° 'li yönlendirilmiştir.

Çizelge 4.3'de belirtilen 20/60/20 yönlendirme şeklinde, 10 tabakalı bir kompozit 2 tane 0° , 6 tane $\pm 45^\circ$ ve 2 tane 90° yönlendirmeli katlar içerir.



Şekil 4.2. Elyaf yönlendirme doğrultuları

- a) 0° yönlendirme
- b) 90° yönlendirme
- c) $+45^\circ$ yönlendirme
- d) -45° yönlendirme

Tabakaların yönlendirme doğrultuları hazırlanırken orta tabakadaki yönlendirme doğrusu tekrarlanabilir. Örneğin Çizelge 4.3'de E_{442} numune grubunun serme konfigürasyonu $0/+45/90/-45/0/0/-45/90/+45/0$ şeklindedir. Bu serme şeklinde ortadaki 0° 'li yönlendirme tekrarlanmıştır.

4.3. Kompozit Numunelerin Karakterizasyonu

4.3.1. Mekanik karakterizasyon

Tüm mekanik testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ve her numune grubu için en az 5 numune test edilmiştir ve bunların aritmetik ortalamaları kullanılmıştır. Mekanik testler Instron 8502 (300 kN) test cihazı kullanılarak 60-100 kN yüklemeler doğrultusunda yapılmıştır. Testler sonucunda standart sapma değerleri ise Eş. 4.1'e göre hesaplanmıştır [35].

$$s = \sqrt{\frac{\sum X^2 - n \bar{X}^2}{n - 1}} \quad (4.1)$$

burada;

S= hesaplanan standart sapma, $\bar{X}$ = gözlem setlerinin aritmetik ortalaması,

X = tek gözlemin değeri, n = gözlem sayısı

Çekme testi

Çekme testleri, EN 2597 (Karbon Elyaf Takviyeli Plastikler-Tek Yönlü Laminatlar-Dikey Çekme Testi)'ne uygun olarak yapılmıştır.

Düzlem içi kayma testi

Düzlem içi kayma testleri, EN ISO 14128 (Plastik kompozitler-elyaf takviyeli- düzlem içi kayma gerilmesi/kayma gerilmesi cevabı tayini-düzlem içi kayma modülü ve kayma mukavemeti dahil- $\pm 45^\circ$ lik gerilme deneyi metodu)'ne uygun olarak yapılmıştır.

Taşıma testi

Taşıma testleri, ASTM D953-02 (Plastiklerin taşıma dayanımı için standart test metodu) 'ne uygun olarak yapılmıştır.

Sıkıştırma testi

Sıkıştırma testleri, EN 2850 (Havacılık serisi, karbon elyaf termoset reçineli tek yönlü laminatlar, elyaf doğrultusunda sıkıştırma testi)'ne uygun olarak yapılmıştır.

4.3.2. Termal karakterizasyon

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

DSC analizleri için SETARAM SETSYS Evolution 1760 analiz cihazı kullanılmıştır. Analiz azot atmosferinde 35°C'den 900°C'ye kadar 10°C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen termogramlara dayanarak numune gruplarının termal özellikleri belirlenmiştir.

Termogravimetrik analiz (TGA)

TGA analizleri için SETARAM SETSYS Evolution 1760 analiz cihazı kullanılmıştır. Analiz azot atmosferinde 35°C'den 900°C'ye kadar 10°C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen termogramlara dayanarak numune gruplarının termal özellikleri belirlenmiştir.

4.3.3. Yüzey karakterizasyonu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Deney numunelerinin mekanik testleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeyleri iletken yüzey elde etmek ve daha iyi görüntü alabilmek için altınla kaplanarak JEOL 6060 LV Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak çeşitli büyütme oranlarında tek yönlü karbon elyaf/epoksi reçine kompozitlerde ara yüzeyi ve aralarındaki etkileşim incelenmiştir.

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Çekme- Düzlem İçi Kayma-Taşıma Testi

Bölüm 4.3.1’de anlatılan mekanik testlere tabi tutulan numune gruplarının ortalama çekme dayanımı ve çekme modülü değerleri, düzlem içi kayma dayanımı ve modül değeri, taşıma dayanımı ve modül değerleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilmiştir. Sütun grafiklerin göstergelerinde Çizelge 4.3’de belirtilen numune grupları kodlamaları kullanılmıştır.

Çekme testi sonucunda, Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi, tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçine prepreglerden eşit tabaka sayısında farklı yönlendirmelerle hazırlanan numune gruplarından en yüksek çekme dayanımı ve çekme modülü değerini 0° yönlendirmeli E_0 numune grubu vermiştir. E_0 numune grubunun çekme dayanımı 1713,48 MPa ve çekme modülü değeri 127,12 GPa olarak bulunmuştur. En düşük çekme dayanımı değerini ise 65,02 MPa çekme dayanımı ve 10,43 GPa çekme modülü değeri ile 90° yönlendirmeli E_{90} numune grubu vermiştir. Aynı zamanda diğer yönlendirme şekillerinde de 0° ’li yönlendirme oranı arttıkça dayanım artmaktadır. Bunun nedeni olarak elyaf doğrultusunda çekmeye zorlanan numunenin elyafların çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle kolayca kopmamaları buna karşılık ters yönde yapılan çekme yüklemesinde elyafların eğilmeye zorlanmaları sonucunda matristen kolayca ayrılmış olmaları düşünülmüştür.

Taşıma testi sonucunda, Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi $0/+45/90/-45/0/0/-45/90/+45/0$ yönlendirmeli E_{442} ve $+45/0/-45/90/+45/-45/90/+45/0/-45$ yönlendirmeli E_{262} numune gruplarından taşıma dayanımı 1010,46 MPa ve taşıma modülü 105,17 GPa değeri ile E_{262} numune grubu E_{442} numune grubuna göre daha yüksek taşıma değerleri vermiştir. Bu sonuçtan görülmüştür ki 0° yönlendirmeli kat sayısı azaldıkça taşıma dayanımı ve taşıma modülü değerleri artmıştır. Bunun nedeni olarak taşıma testinde 0°

yönlendirmeli numunede delik merkezinden numunenin uç kısmına kadar olan mesafede yükü karşılayan epoksi reçine olup bu nedenle numunenin çabuk hasara uğradığı düşünülmüştür.

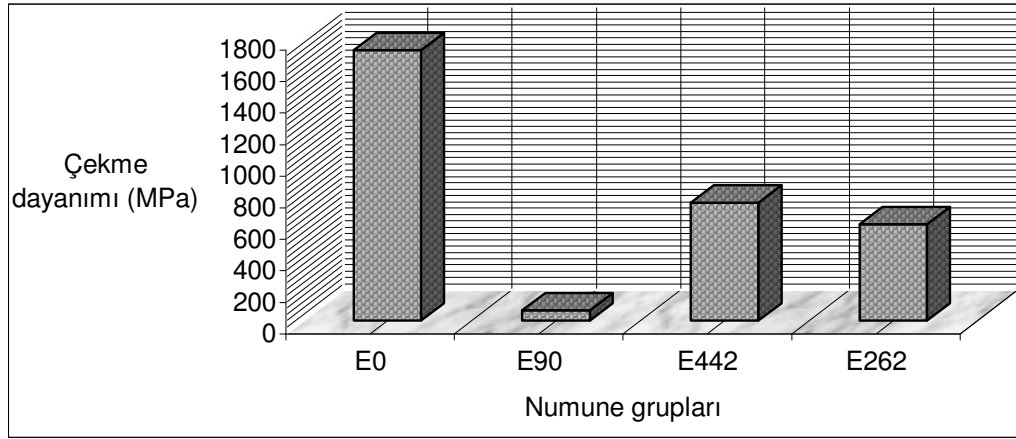
Düzlem içi kayma testi yapılan on kat prepregten oluşan $\pm 45^\circ$ yönlendirmeli E1₄₅ ve 12 kat prepregten oluşan $\pm 45^\circ$ yönlendirmeli E2₄₅ numune gruplarından, E1₄₅, 75,20 MPa düzlem içi kayma dayanımı ve 5,00 MPa düzlem içi kayma modülü, E2₄₅ numune numune grubu ise 78,31MPa düzlem içi kayma dayanımı ve 5,23 MPa düzlem içi kayma modülü değeri vermiştir.

Çizelge 5.1. Numune gruplarının çekme testi-taşıma testi değerleri

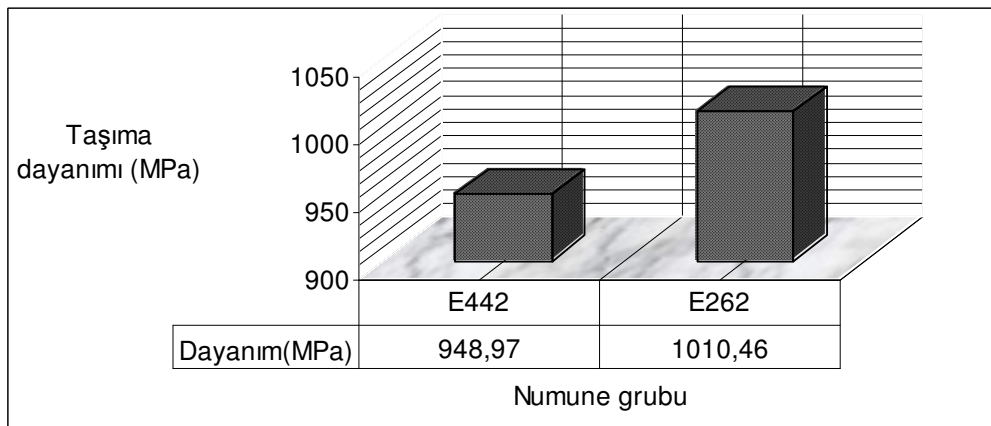
Uygulanan test	Numune grubu	Dayanım(MPa)	Modül(GPa)
Çekme testi	E ₀	1713,48±6,31	127,12±2,46
Çekme testi	E ₉₀	65,02±2,56	10,43±0,58
Çekme testi	E ₄₄₂	747,92±7,45	90,41±0,59
Çekme testi	E ₂₆₂	610,23±1,42	68,11±2,57
Taşıma	E ₄₄₂	948,97±2,13	99,89±5,32
Taşıma	E ₂₆₂	1010,46±5,50	105,17±8,44

Çizelge 5.2. Numune gruplarının düzlem içi kayma testi değerleri

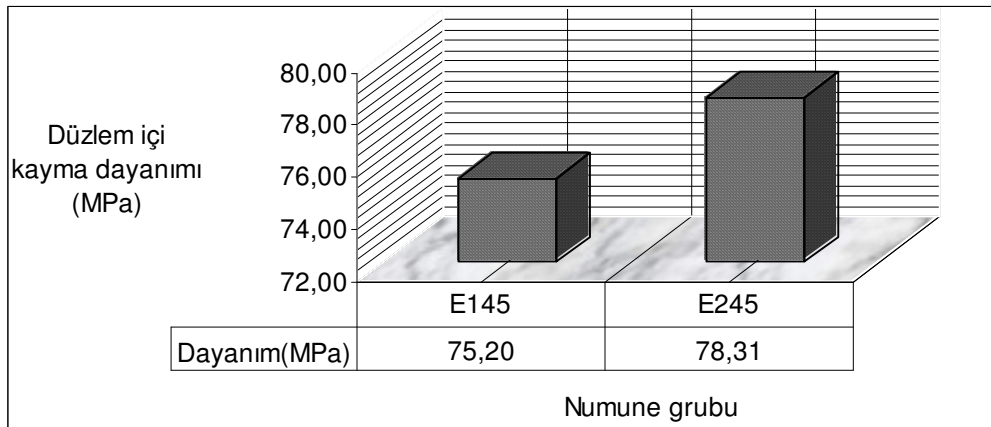
Uygulanan test	Numune grubu	Dayanım(MPa)	Modül(MPa)
Düzlem içi kayma	E1 ₄₅	75,20±0,59	5,00±0,02
Düzlem içi kayma	E2 ₄₅	78,31±2,09	5,23±0,83



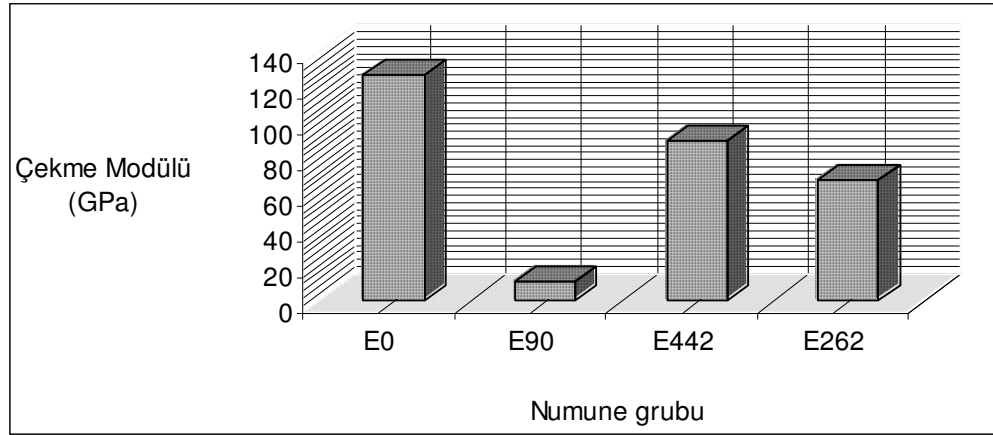
Şekil 5.1. Numunelerin çekme dayanımı değerleri (MPa)



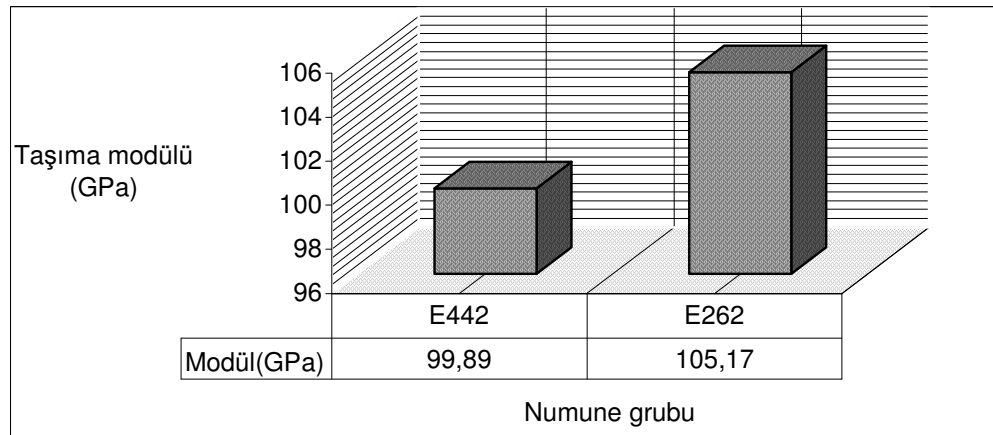
Şekil 5.2. Numunelerin taşıma dayanımı değerleri (MPa)



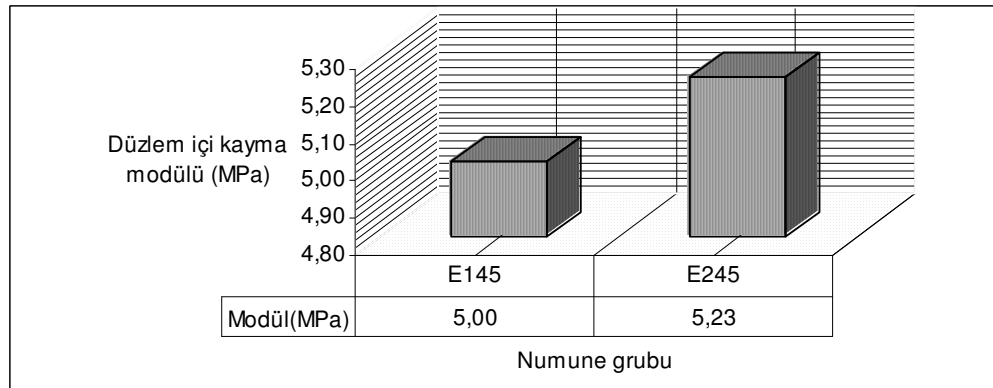
Şekil 5.3. Numunelerin düzlem içi kayma dayanımı değerleri (MPa)



Şekil 5.4. Numunelerin çekme modülü değerleri (GPa)



Şekil 5.5. Numunelerin taşıma modülü değerleri (GPa)



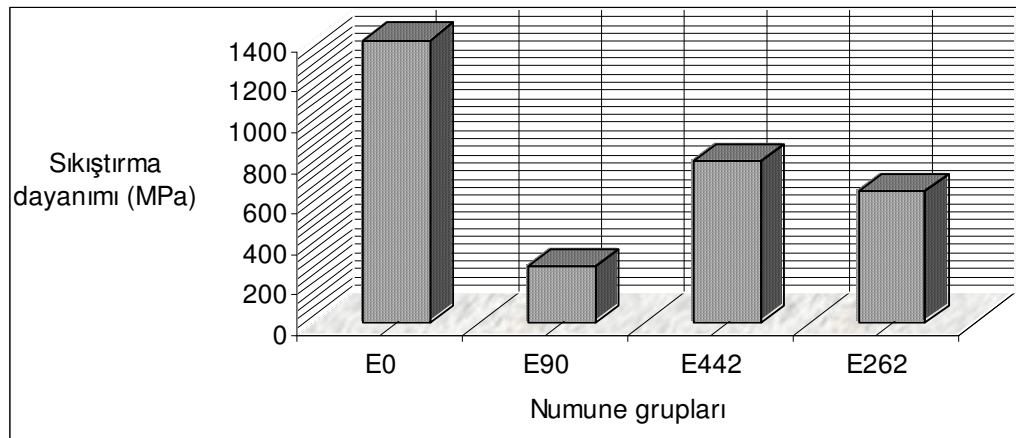
Şekil 5.6. Numunelerin düzlem içi kayma modülü değerleri (MPa)

5.2. Sıkıştırma testi

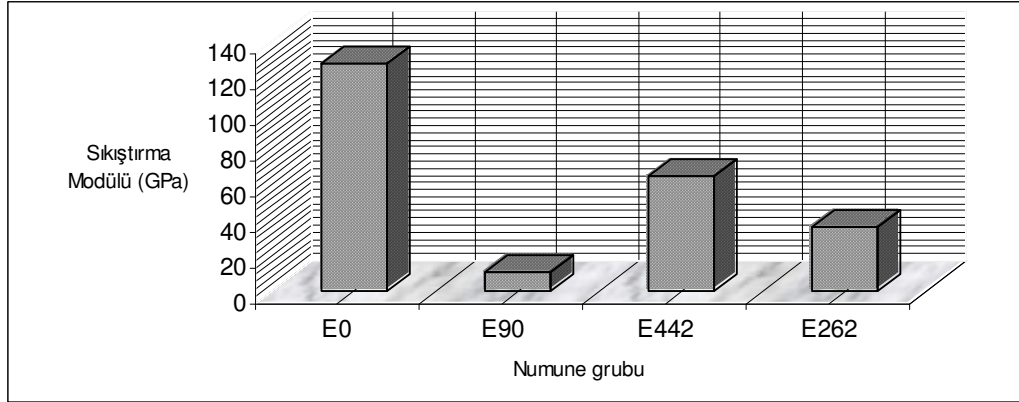
Tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçine prepreglerden eşit tabaka sayısında farklı yönlendirmelerle hazırlanan numune gruplarına Bölüm 4.3.1'de anlatılan mekanik testlerden sıkıştırma testi uygulanmış ve sıkıştırma testi sonuçları Çizelge 5.3'de verilmiştir. Sıkıştırma testi sonuçlarında en yüksek sıkıştırma dayanımı ve modül değerini 0° yönlendirmeli E_0 numune grubu vermiştir. E_0 numune grubunun sıkıştırma dayanımı 1394,42 MPa ve sıkıştırma modülü 127,33 GPa olarak bulunmuştur. Yönlendirmelerde kullanılan prepreg katlarında 0° yönlendirmeli kat sayısı arttıkça sıkıştırma dayanımının arttığı görülmüştür. Sütun grafiklerin göstergelerinde Çizelge 4.3'de belirtilen numune grupları kodlamaları kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Numune gruplarının sıkıştırma dayanımı ve sıkıştırma modülü değerleri

Numune grubu	Yönlendirme	Sıkıştırma Dayanımı(MPa)	SıkıştırmaModülü(GPa)
E_0	0°	1394,42 $\pm$ 5,25	127,33 $\pm$ 2,01
E_{90}	90°	281,61 $\pm$ 1,08	10,01 $\pm$ 0,2
E_{442}	40/40/20	798,82 $\pm$ 3,11	63,74 $\pm$ 1,17
E_{262}	20/60/20	647,45 $\pm$ 1,59	35,52 $\pm$ 0,85



Şekil 5.7. Numunelerin sıkıştırma dayanımı değerleri (MPa)



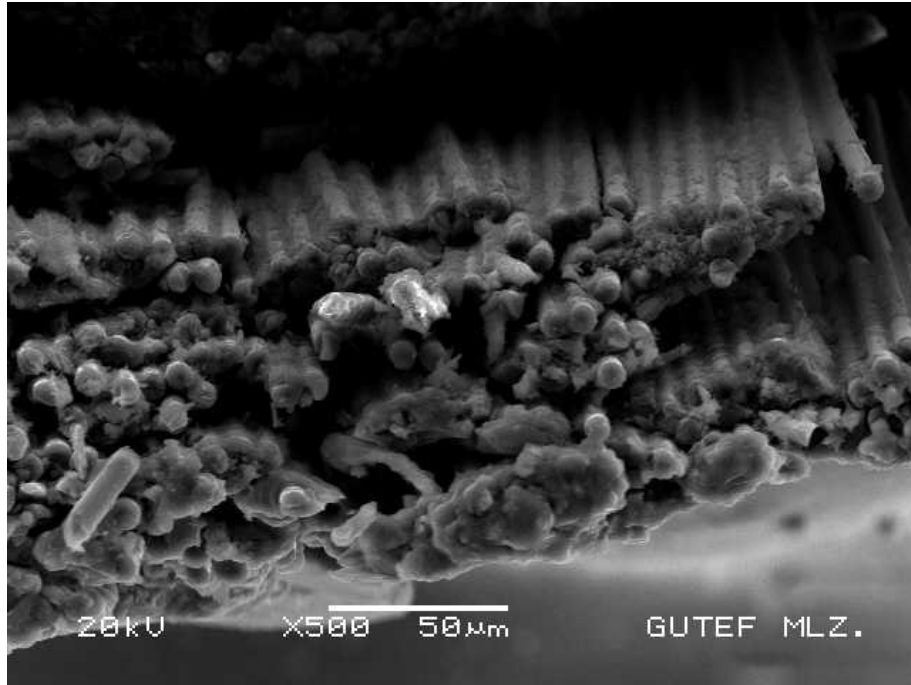
Şekil 5.8. Numunelerin sıkıştırma modülü değerleri (GPa)

5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

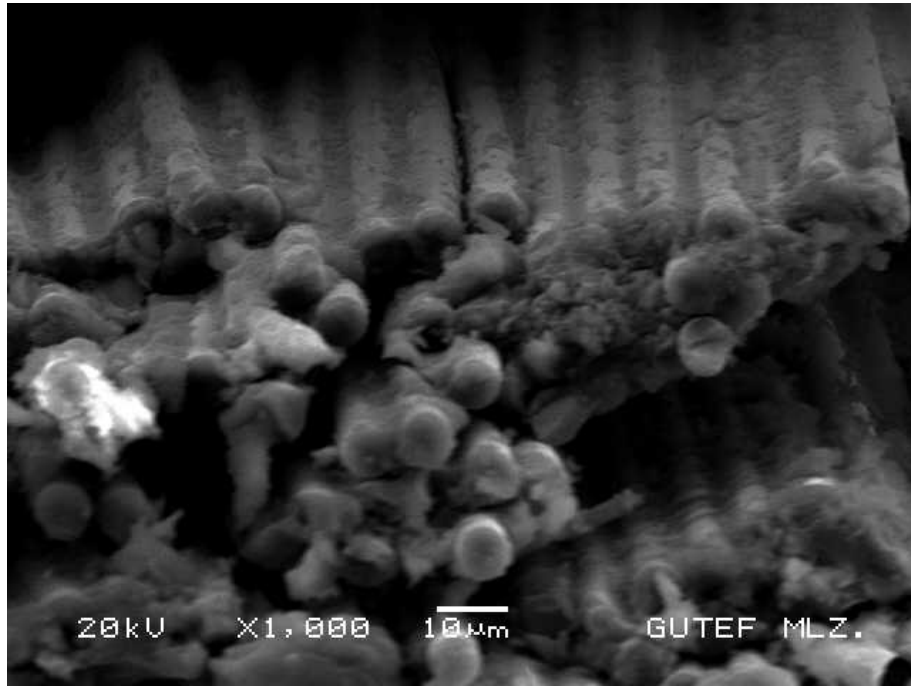
Bölüm 4.2’de anlatılan yöntemle hazırlanan deney numunelerinin Bölüm 4.3.1’de anlatıldığı gibi mekanik teste tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeylerinin analizi Bölüm 4.3.3’de anlatılan şekilde yüzey karakterizasyonu testine tabi tutulmuştur.

SEM mikrograflarından matris sitemi olan epoksi reçinenin, takviye sistemi olan tek yönlü karbon elyafları ıslatabilirliğinin ve ara yüzey yapışmalarının başarılı olduğu düşünülmüştür. Mikrograflarda elyaf doğrultuları açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, yönlendirmelerde karbon elyaf oranlarının arttığı doğrultuda birim alana düşen elyaf miktarının arttığı ve karbon elyafların düzenli dağılım gösterdikleri de açıkça görülmüştür.

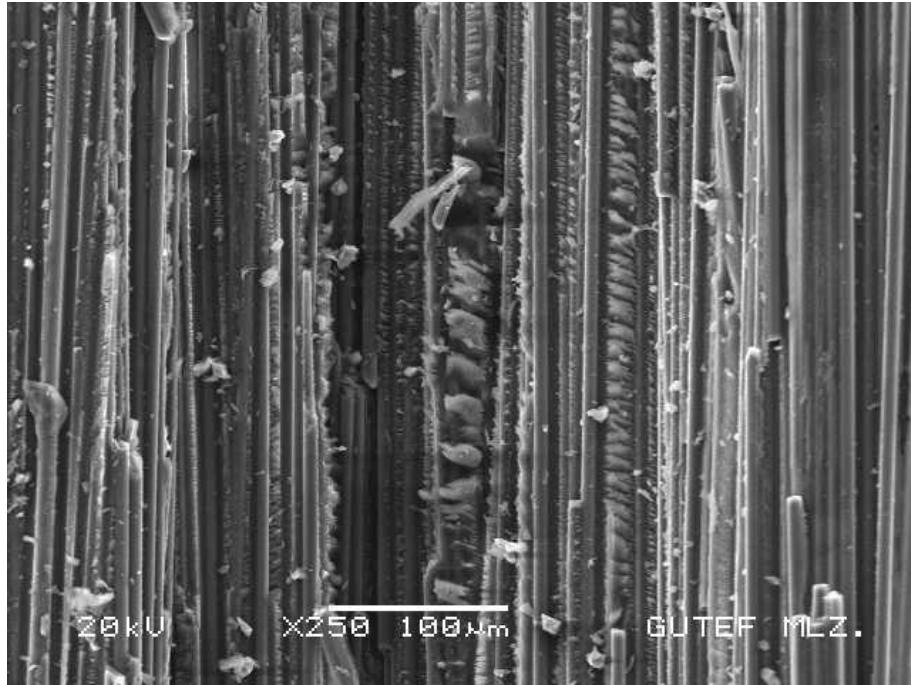
Kırılma yüzeylerinin ayrılması sırasında matristen elyaf üzerinde kalıcı plastik deformasyon yapışması olduğu görülüyor bu da yüksek ara yüzey bağına sahip olduklarını desteklemiştir. Elyaf ve matrisin aynı kırılma düzleminde görüldüğü gevrek tarzda kırılmanın gözlemlendiği E_0 numune grubunun diğer numunelere göre daha iyi mekanik dayanım sonucu vermesini destekliyor.



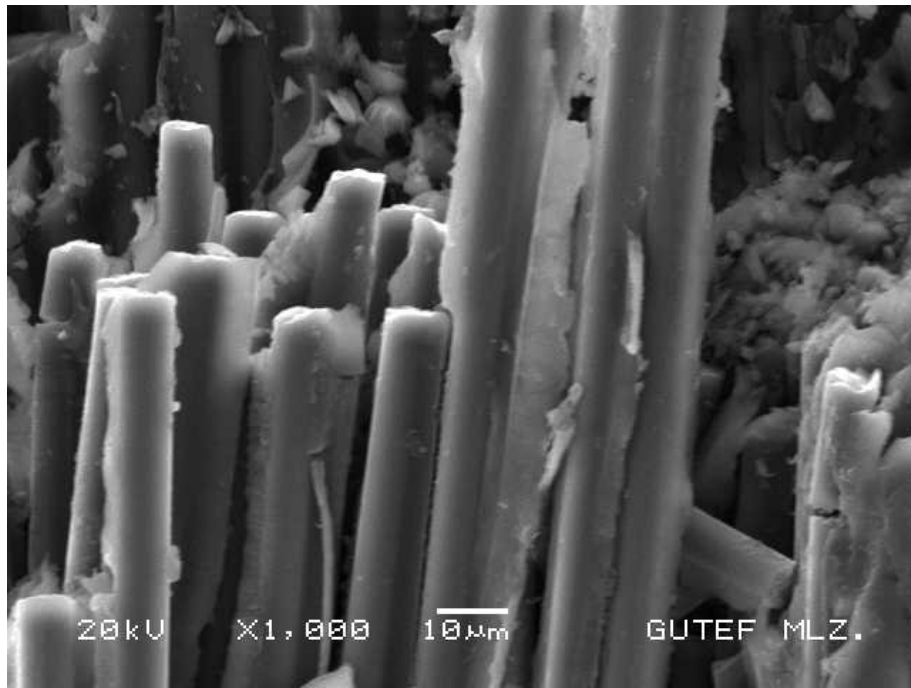
Resim 5.1. E₀ numune grubunun X500 büyütmede SEM mikrografı



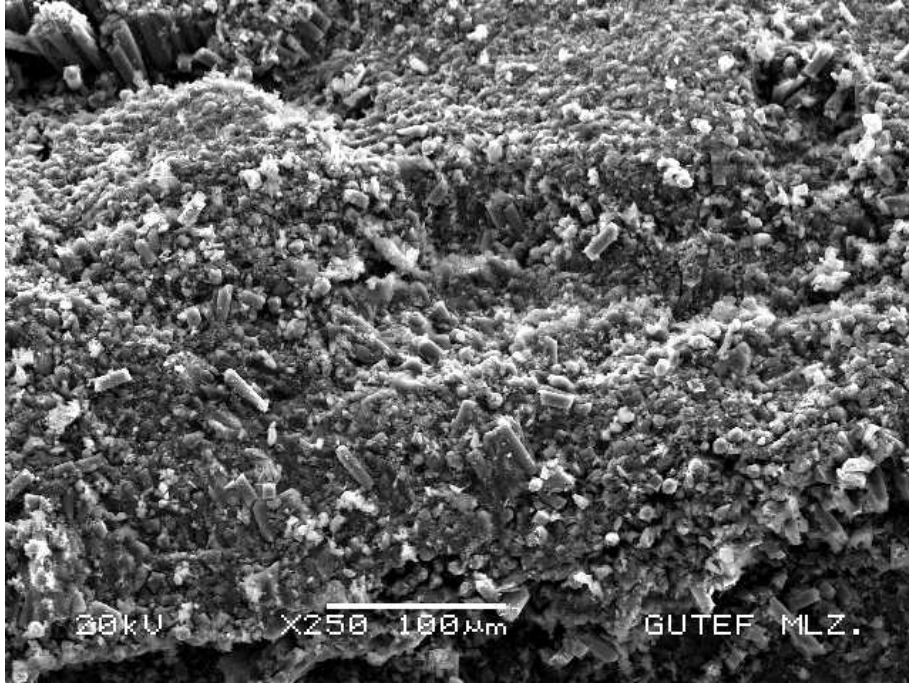
Resim 5.2. E₀ numune grubunun X1000 büyütmede SEM mikrografı



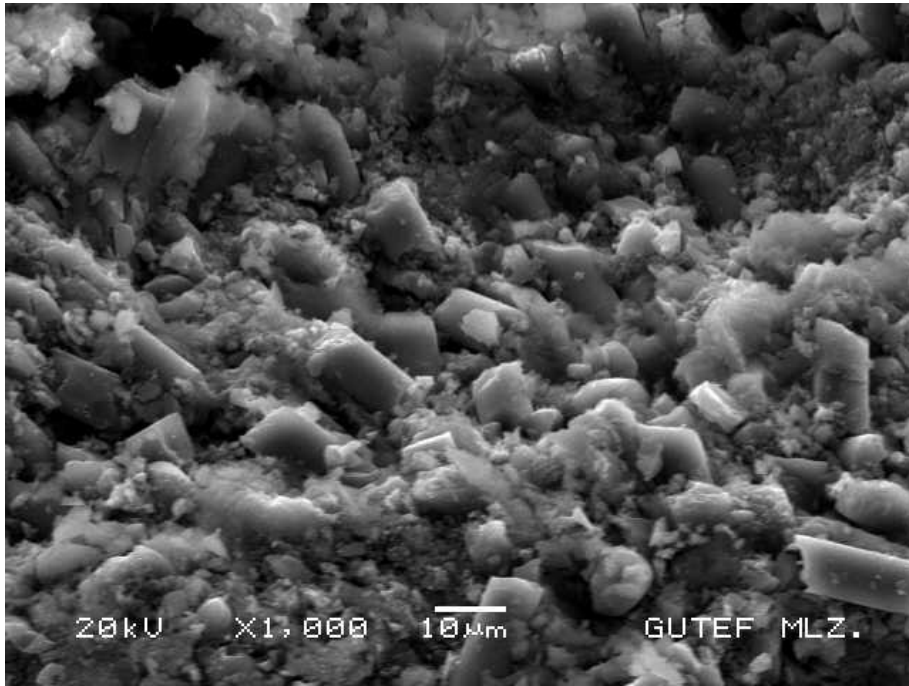
Resim 5.3. E₉₀ numune grubunun X250 büyütmede SEM mikrografi



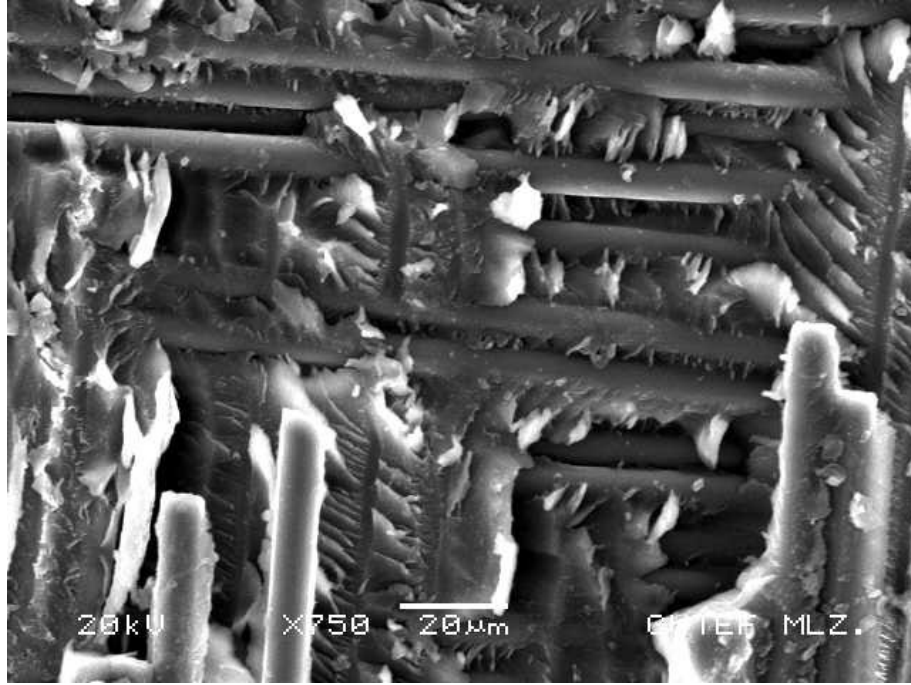
Resim 5.4. E₉₀ numune grubunun X1000 büyütmede SEM mikrografi



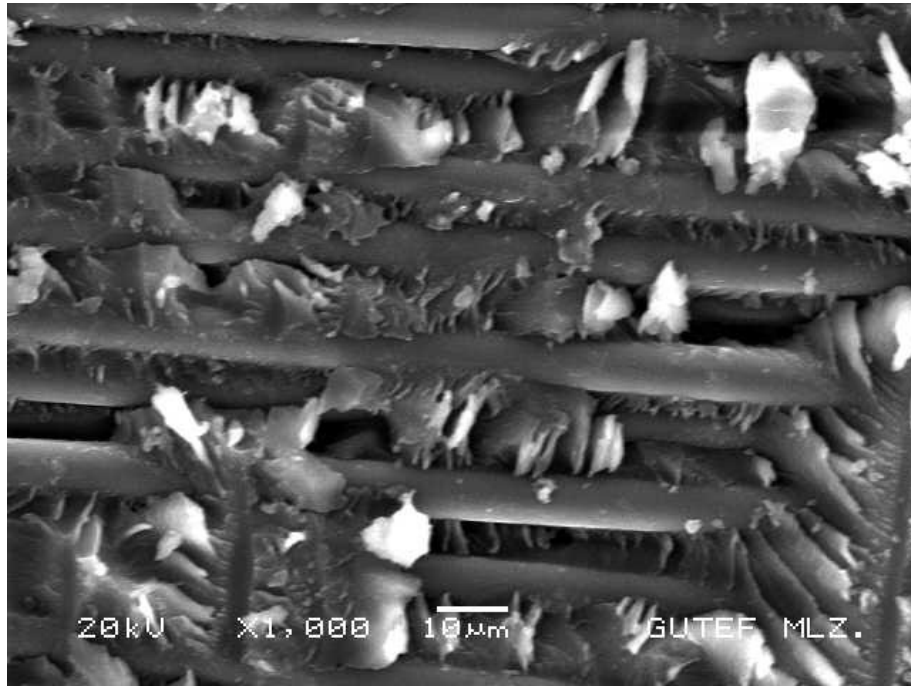
Resim 5.5. E₄₅ numune grubunun X250 büyütmede SEM mikrografi



Resim 5.6. E₄₅ numune grubunun X1000 büyütmede SEM mikrografi



Resim 5.7. E₄₄₂ numune grubunun X750 büyütmede SEM mikrografı

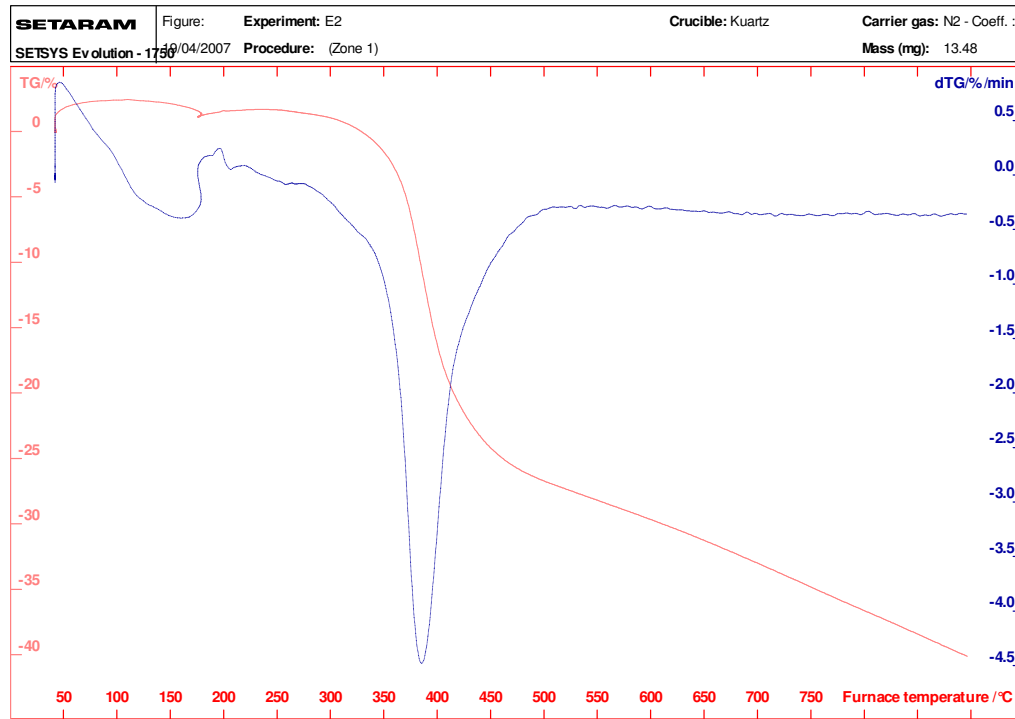


Resim 5.8. E₄₄₂ numune grubunun X1000 büyütmede SEM mikrografı

5.4. Termal Testler

Bölüm 4.2’de anlatılan yöntemle hazırlanan numune gruplarından alınan örnekler Bölüm 4.3.3’de belirtildiği gibi termal karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur. Üretici firmadan elde edilen bilgiye göre epoksi reçinenin camı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri 200°C ’dir. Karbon elyaf-epoksi reçineli prepreglerden hazırlanan kompozit numunelerin termal etki karşısında ne şekilde etkilendiği incelenmiştir.

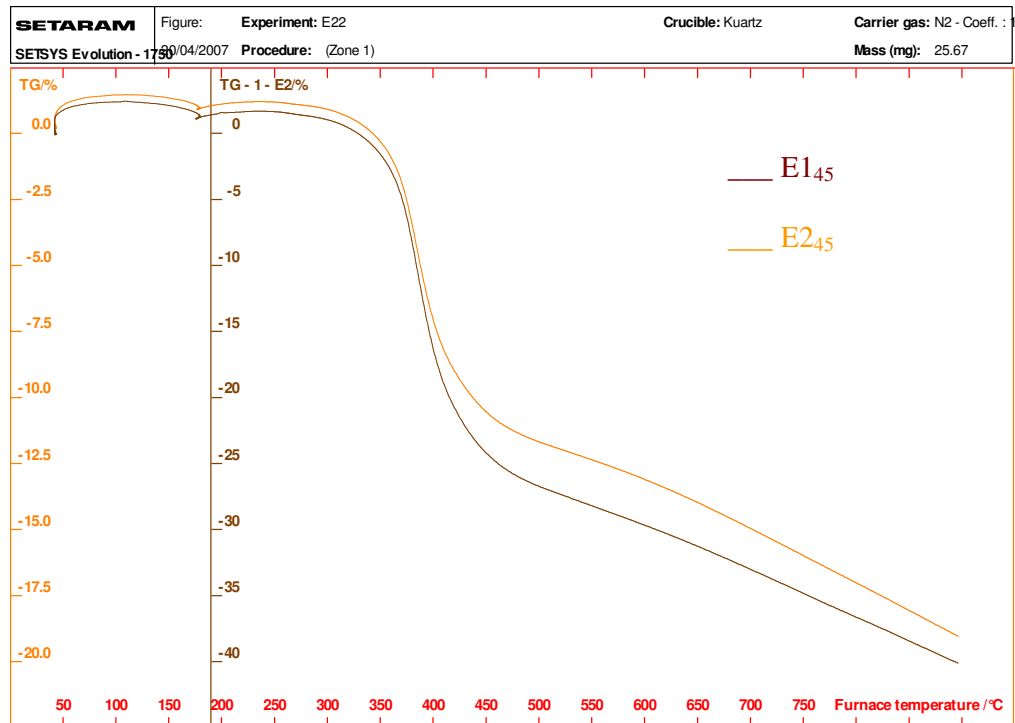
TGA termogramları incelendiği zaman E1₄₅ numune grubu için bozunma sıcaklığı değeri 384.57°C ve E2₄₅ numune grubu için bozunma sıcaklığı değeri 385.49°C olarak bulunmuştur. Yaklaşık 1°C ’lik farkın ölçüm esnasında çok küçük numune boyutu kullanılması veya cihazdan kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Genel olarak epoksi reçinelerin bozunma sıcaklığı değeri yaklaşık $300\text{--}350^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Karbon elyaf ilavesi epoksi malzemenin termal dayanımını arttırmıştır.



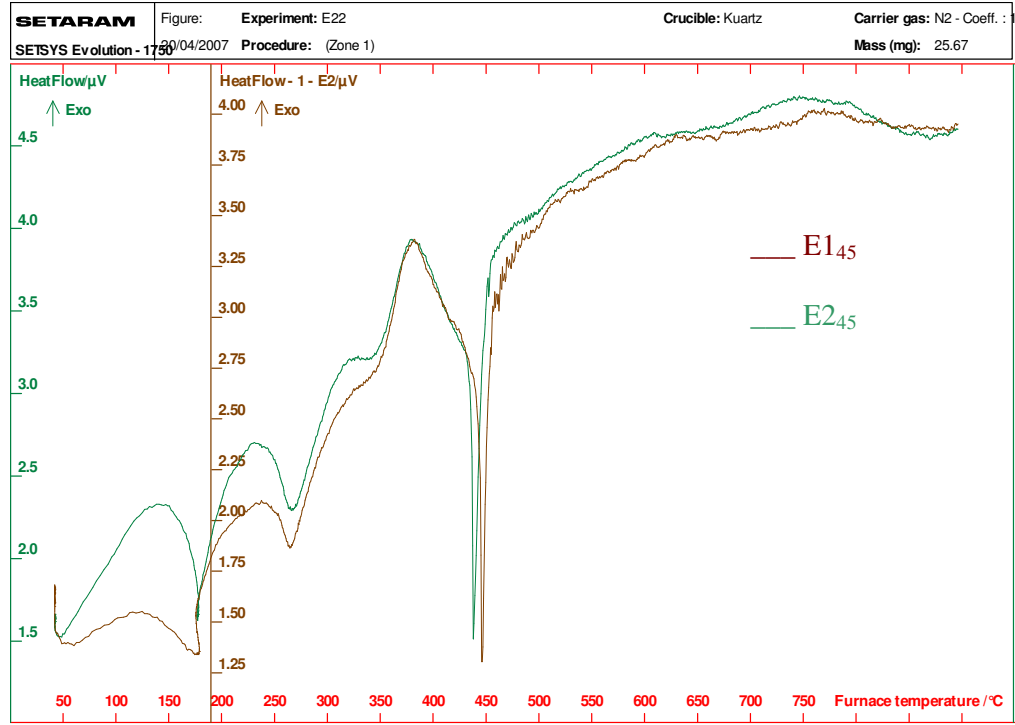
Şekil 5.9. E1₄₅ numune grubunun TGA ve türev termogramı



Şekil 5.10. E2₄₅ numune grubunun TGA ve türev termogramı



Şekil 5.11. E1₄₅ ve E2₄₅ numune grubunun TGA termogramı



Şekil 5.12. E1₄₅ ve E2₄₅ numune gruplarının DSC termogramları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompozit malzeme, temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla bileşenin karışımından veya birleşmesinden oluşan bir malzeme sistemidir. Son yıllarda elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Polimerler yapıları gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdır ve onların avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir. Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar sağlam, olabildiğince hafif, yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklı ve ekonomik malzeme üretimidir. Polimer kompozit malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlamlık nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır. Birleşik malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır.

Bu doğrultuda, özellikle havacılık sanayinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonunun yapılması bu çalışmada hedeflenmiştir. Çalışmada, tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçine prepreglerden oluşan kompozit malzemeler üretilerek, elyaf yatırma açısının tabakalı epoksi kompozit malzemeler üzerindeki etkileri çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, HexPly® 8552 epoksi reçine esaslı, Magnamite® AS4 karbon elyaf içeren, HexPly® 8552 tek yönlü karbon elyaf-epoksi prepreg kullanılmıştır. Kompozit malzemeler otoklav yöntemiyle hazırlanmıştır.

Hazırlanan kompozit malzemelerin karakterizasyonu aşamasında; mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme, sıkıştırma, taşıma ve düzlem içi kayma

testi, termal özelliklerin belirlenmesi için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA), kırılma yüzeylerinin karakterizasyonunda taramalı elektron mikroskobu (SEM) uygulanmıştır.

Yapılan mekanik karakterizasyon çalışmaları sonunda, elyaf yönlenmelerinin kompozitin mekanik dayanımında oldukça etkili olduğu görülmüştür. Çekme testi sonucunda, tek yönlü karbon elyaf-epoksi reçine prepreglerden eşit tabaka sayısında farklı yönlendirmelerle hazırlanan numune gruplarından en yüksek çekme dayanımı ve çekme modülü değerini, çekme dayanımı 1713,48 MPa ve çekme modülü değeri 127,12 GPa değerleri ile 0° yönlendirmeli numune grubu vermiştir. En düşük çekme dayanımı değerini ise 65,02 MPa çekme dayanımı ve 10,43 GPa çekme modülü değeri ile 90° yönlendirmeli numune grubu vermiştir. Aynı zamanda çok yönlü numunelerde 0°'li yönlendirme oranı arttıkça dayanım artmaktadır. Bunun nedeni olarak elyaf doğrultusunda çekmeye zorlanan numunenin elyafların çekme mukavemetinin fazla olması nedeniyle kolayca kopmamaları buna karşılık ters yönde yapılan çekme yüklemesinde elyafların eğilmeye zorlanmaları sonucunda matrinden kolayca ayrılmış olmaları düşünülmüştür. Yaşar ve Arslan [39] cam elyaf poliestere kompozitlerde elyaf doğrultusunun uygulanan yük karşısında etkili olduğunu görmüşlerdir. Uygulanan yüke paralel konumdaki elyaf yönlenmesinde çekmeye karşı dayanımın fazla olduğunu ve en iyi aşınma dayanımını paralel konumda elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Taşıma testi sonucunda 0°'li yönlendirme oranı azaldıkça taşıma dayanımı artmıştır. 0/+45/90/-45/0/0/-45/90/+45/0 yönlendirmeli numune grubunun taşıma dayanımı değeri 948,97 MPa ve taşıma modülü 99,89 GPa bulunurken ve +45/0/-45/90/+45/-45/90/+45/0/-45 yönlendirmeli numune grubunun taşıma dayanımı 1010,46 MPa ve taşıma modülü 105,17 GPa elde edilmiştir. Bu sonuçtan görülmüştür ki 0° yönlendirmeli kat sayısı azaldıkça taşıma dayanımı ve taşıma modülü değerleri artmıştır. Bunun nedeni olarak taşıma testinde 0° yönlendirmeli numunede delik merkezinden numunenin uç kısmına kadar olan mesafede yükü karşılayan epoksi reçine olup bu nedenle

numunenin çabuk hasara uğradığı düşünülmüştür. Yılmaz ve Sınmazçelik [30] karbon/polifenil sülfid kompozitlerin taşıma performansını araştırmışlar ve tabakaların elyaf yönlenmesinin, kompozit malzemelerin yüklemeye karşı performans durumlarını etkilediği bununla beraber delik merkezinden numunenin ucuna kadar olan mesafe, plaka genişliği ve iğne çapı gibi geometrik parametrelerinde malzemenin taşıma performanslarını dikkate değer şekilde etkilediği görülmüştür.

Düzlem içi kayma testinde $\pm 45^\circ$ yönlendirmeli numunelerde 10 tabakalı kompozit malzemenin düzlem içi kayma değeri 75,20 MPa, düzlem içi kayma modülü 5,00 MPa olarak bulunmuştur. Sıkıştırma testi sonuçlarında en yüksek sıkıştırma dayanımı ve modül değerini, sıkıştırma dayanımı 1394,42 MPa ve sıkıştırma modülü 127,33 GPa değerleri ile 0° yönlendirmeli numune grubu vermiştir. Çok yönlü numunelerde prepreg katlarında 0° yönlendirmeli kat sayısı arttıkça sıkıştırma dayanımının arttığı görülmüştür. Sudarisman ve arkadaşları [34] çalışmalarında karbon ve silikon karbit elyafların birlikte takviyesiyle oluşan tek yönlü epoksi kompozitlerin sıkıştırma testi sonucunda C ve SiC elyafların karışımından oluşan kompozitlerin, sıkıştırma dayanımı, elastik modul veya kırılma değerlerinde önemli artış not edilmemiştir. Lee ve Soutis [42] tek yönlü karbon elyaf epoksi kompozitlerde eksenel yönde numune boyutunda yapılan değişikliklerin sıkıştırma dayanımını incelemişler ve numune boyutu arttırıldığı zaman maksimum %45 azalma ile dayanım düşmüştür; eksenel modül değerleri için anlamlı değişiklikler gözlenmemiştir.

TGA termogramları incelendiği zaman karbon elyaf epoksi kompozitin bozunma sıcaklığı değeri yaklaşık 385°C olarak bulunmuştur. Genel olarak epoksi reçinelerin bozunma sıcaklığı değeri yaklaşık $300\text{-}350^\circ\text{C}$ civarındadır. Karbon elyaf ilavesi epoksi malzemenin termal dayanımını arttırmıştır. DSC termogramlarında bu sonucu destekler niteliktedir.

SEM mikrograflarından matris sitemi olan epoksi reçinenin, takviye sistemi olan tek yönlü karbon elyafları ıslatabilirliğinin ve ara yüzey yapışmalarının

başarılı olduğu düşünülmüştür. Mikrograflarda elyaf doğrultuları açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, yönlendirmelerde karbon elyaf oranlarının arttığı doğrutuda birim alana düşen elyaf miktarının arttığı ve karbon elyafların düzenli dağılım gösterdikleri de açıkça görülmüştür. Kırılma yüzeylerinin ayrılması sırasında matrinden elyaf üzerinde kalıcı plastik deformasyon yapışması olduğu görülmüştür ki bu da yüksek ara yüzey bağına sahip olduklarını desteklemiştir.

KAYNAKLAR

1. Ersoy, H.Y., "Kompozit Malzeme", **Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. ve Tic. Ltd. Şti.**, İstanbul, 11-15, 95-105, 110-116 (2001).
2. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", **Gazi Kitabevi**, Ankara, 1-16, 37-41, 65-68, 79-88 (2000).
3. Ersoy, M.S., "Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş, 1-3, 5-8, 13-18 (2005).
4. İnternet: T.C Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. <http://web.deu.edu.tr/ansys/tezler/3.pdf> (2006).
5. internet: Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler.http://www.hho.edu.tr/huten/2003_2004%20SEMINER%20INTERNET/UGUR%20ER/UGUR%20ER%5BWORD%5D.pdf (2006).
6. Saçak, M., "Polimer Kimyası", **Gazi Kitabevi**, Ankara, 85-89, 221-224, 275-297, 393-397 (2002).
7. Olcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., "Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metodlarının etkisinin incelenmesi", **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesi**, Bursa, 7(1):94-96 (2002).
8. İnternet: Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı. <http://ekutup.dpt.gov.tr/-imalatsa/kimya/oik602.pdf> (2006).
9. Jones, M. J., "Mechanics of Composite Materials", **Mc Graw-Hill Book Company**, New York, 125-136 (2003).
10. Ozaydın, M. B., "Kompozit malzemelerin balistik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-18 (1999) .
11. Prepreg Technolgy, **Hexcel Corporation**, March (2005).
12. Temiz, S., "Balistik kumaşlar ve test yöntemleri üzerine bir araştırma", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 1-34 (2005).
13. Bilişik, A.K., "Balistik kumaşlarda yapı özellik ilişkileri", **Tekstil ve Konfeksiyon**, 4:220-222 (1997).

14. İnternet: Arş. Gör. M. Emin DENİZ, Kompozit Malzemeler. http://eng.-harran.edu.tr/~emin/kompozit_malzemeler.htm (2006).
15. Hurley, S. A., "The Use of Epoxy, Polyester and Similar Reactive Polymers in Construction Volume 3 Materials Technology", **CIRIA Project Report 79, London**, 29-36 (2002).
16. Arıkan, A., "Flexibility Improvement of Short Glass Fiber Reinforced Epoxy", Yüksek Lisans Tezi, **ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-6, 9-10 (2001).
17. Lubin, G., "Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites", **Van Nostrand Reinhold Company**, New York, 143-181, 46-84 (1969).
18. Goodman, S. H., "Hanbook of Thermoset Plastics 2nd ed.", **Noyes Publications**, New Jersey, 193-268, (1998).
19. Aran, A., "Elyaf takviyeli karma malzemeler", Tc İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, **İTÜ Rektörlük Ofset Atölyesi**, 1420:95 (1990).
20. İnternet: Bölüm Bir, Kompozit Malzemeler. http://www.obitet.gazi.edu.tr/~obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf (2006).
21. Toğrul, T., "İnstrümental Analiz", Editör, **Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü**, 101-117 (1995).
22. Skoog, D.A., Holler, F.J., Nieman, T.A., "Principles of Instrumental Analysis 5th ed.", **Saunders College Publishing**, London, 798-808, 546-553 (1998).
23. European Standard, "EN 2597 Aerospace series-Carbon fibre reinforced plastics-Unidirectional laminates-Tensile test perpendicular to the fibre direction", **British Standard Aerospace Series**, BSI, London, 2-10 (1998).
24. İnternet: Metallerin Temel Mekanik Özellikleri. <http://www.etu.edu.tr/~onderefe/courses/muh100/bolum10.ppt#3> (2006).
25. International Standard, "ISO 14126 Fibre-reinforced plastic composites-Determination of compressive properties in the in-plane direction", **ISO**, First Edition, 1-8 (1999).
26. American Society for Testing and Materials, "D953-02 Standard Test Method for Bearing Strength of Plastics", 1993 Annual Book of ASTM Standarts Plastics (1), **ASTM International**, Philadelphia, 1-6 (2002).

27. European Standard,” EN ISO 14129 Fibre- reinforced plastic composites- Determination of the inplane shear stress/shear strain response including the inplane shear modulus and strength, by <+> 45 tension test method”, **British Standard Aerospace Series**, BSI, Switzerland, 1-8 (1997).
28. İnternet: Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM). <http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/sem.htm> (2006).
29. Shindo , Y., Takano, S., Narita, F., Horiguchi, K., “Tensile and damage behaviour of plain weave glass/epoxy composites at crycogenic temperatures”, **Fusion Engineering and Design**, 81: 2479-2483 (2006).
30. Yılmaz, T., Sınmazçelik, T., “Investigation of load bearing performances of pin connected carbon/polyphenylene sulphide composites under static loading conditions”, **Material and Design**, 28:520-527 (2007).
31. Morais, W.A., Monteiro, S.N.,d’Almeida, J.R.M.,”Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts”, **Composite Structures**, 70:223-228 (2005).
32. Mathur, V.K., “Composite materials from local resources”, **Construction and Building Materials**, 20:470-477 (2006).
33. Knops, M., Bölge, C., “Gradual failure in fibre/polymer laminates”, **Composites Science and Technology**, 66:616-625 (2006).
34. Sudarisman, Davies, I.J., Hamada, H., “Comporessive failure of unidirectional hybrid fibre-reinforced epoxy composites containing carbon and silicon carbide fibres “, **Composites**, 38:1070-1074 (2007).
35. Kim, M.G., Kang, S.G., Kim, C.G., Kong, C.W., “Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures”, **Composite Structures**, 79:84-89 (2007).
36. Pinho, S.T., Robinson, P., Iannucci, L., “Fracture toughness of the tensile and compressive fibre failure modes in laminated composites”, **Composites Science and Technology**, 66:2069-2079 (2006).
37. Wonderly, C., Grenestedt, J., Fernlund, G., Cetus, E., “Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites”, **Composites: Part B**, xx:1-10 (2005).
38. Yazıcı, M., Ülkü, S., “İki boyutlu rasgele dağılı e-cam lifi/polyester matris kompozitlerde yükleme hızının mukavemet üzerine etkisinin incelenmesi”, **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 8-1:53-57 (2003).

39. Yaşar, İ., Arslan, F., "Sürekli cam elyaf takvişyeli poliestre matrisli kompozitlerde elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisi", **Turk J Engin Environ Sci**, 24:181-191(2000).
40. Sheffer, E., Dotan, A. & YOSEF, M.B., "Impact resistance of knitted reinforced composite materials", **5 th International Textile Conference**, xxx:xxx-xxx (2005).
41. Chocron, I.S., Rodríguez, J., and Sánchez-Gálvez, V., "Dynamic Tensile Testing of Aramid and Polyethylene Fiber Composites", **International Journal of Impact Engineering**, 19-2:135-146 (1997).
42. Lee, J., Soutis, C., "A study on the compressive strength of thick carbon fibre-epoxy laminates", **Composites Science and Technology**, xxx: xxx-xxx (2007).
43. Yokozeki, T., Ogasawara, T., Ishikawa, T., "Nonlinear behavior and compressive strength of unidirectional and multidirectional carbon fiber composite laminates", **Composites: Part A**, 37:2069–2079 (2006).
44. Larsson, F.&Svensson, L., "Carbon, polyethylene and PBO fibre composites for structural lightweight armour", **Composites:Part A**, 33:221-231(2001).
45. Tanoğlu, M., Seyhan, A.T., "Investigating the effects of a polyester performing binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites", **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 23:1-8 (2003).
46. Morye, S.S., Hine, P.J., Duckett, R.A., Carr, D.J. & Ward, I.M., "A comparison of the properties of hot compacted gel-spun polyethylene fibre composites with conventional gel-spun polyethylene fibre composites ", **Composites: Part A**, 30:649-660 (1998).

EKLER

EK-1. Çekme testi standardı

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN 2597

July 1998

200 60200-02

Descripteur: Aircraft industry; reinforced plastic; laminates; carbon fibres; tests; tensile tests; designation

English version

Aerospace series — Carbon fibre reinforced plastics — Unidirectional laminates — Tensile test perpendicular to the fibre direction

Série aérospatiale — Plastiques renforcés de fibres de carbone — Stratifiés unidirectionnels — Essai de traction perpendiculairement à la direction des fibres

Luft- und Raumfahrt — Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe — Unidirektionale Laminats — Zugversuch senkrecht zur Faserrichtung

This European Standard was approved by CEN on 18 May 1998.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Ireland, Iceland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.

CEN

European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalization
Europäisches Komitee für Normung

Central Secretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brussels

© 1998 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members.

Ref. No. EN 2597:1998 E

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2697:1998

Foreword

This European Standard has been prepared by the European Association of Aerospace Manufacturers (AEOMA).

After inquiries and votes carried out in accordance with the rules of this Association, this Standard has received the approval of the National Associations and the Official Services of the member countries of AEOMA, prior to its presentation to CEN.

This European Standard shall be given the status of a national standard, either by publication of an identical text or by endorsement, at the latest by January 1999, and conflicting national standards shall be withdrawn at the latest by January 1999.

According to the CEN/CENELEC Internal Regulations, the national standards organizations of the following countries are bound to implement this European Standard: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom.

Contents

	Page
Foreword	2
1 Scope	3
2 Normative references	3
3 Definitions	3
4 Principle	4
5 Apparatus	4
6 Specimens	4
7 Procedure	5
8 Expression of results	6
9 Designation	7
10 Test report	8
Annex A (normative) Form, dimensions of specimen, test assembly	9
Figure 1 — Curvature	5
Figure 2 — Load/strain recording	6
Figure A.1 — Specimen type A	9
Figure A.2 — Specimen type B	9
Figure A.3 — Position of the specimen in the jaws	10
Table A.1	10

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

1 Scope

This standard specifies the method of determination of the ultimate tensile strength, tensile modulus and, if required, the Poisson's ratio and elongation at failure in tension of carbon fibre reinforced plastics in the form of unidirectional laminates.

This method is only applicable to specimens the axis of which is perpendicular to the direction of the fibres.

2 Normative references

This European Standard incorporates by dated or undated reference provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this European Standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

EN 2489, Aerospace series — Fibre reinforced plastics — Determination of the action of test fluids.

EN 2505, Aerospace series — Preparation of carbon fibre reinforced resin panels for test purposes¹⁾.

EN 2743, Aerospace series — Reinforced plastics — Standard procedures for conditioning prior to testing¹⁾.

EN 2744, Aerospace series — Non-metallic materials — Preferred test temperatures.

EN 2825, Aerospace series — Fibre reinforced plastics — Test method for the determination of the effect of exposure to humid atmosphere on physical and mechanical characteristics¹⁾.

3 Definitions

For the purpose of this standard, the following definitions apply:

3.1

tensile stress

tensile load experienced by the specimen at any moment during the test, per initial unit cross sectional area within the free length

3.2

ultimate tensile strength (σ_{T22})

tensile stress at the moment failure occurs

3.3

strains (ϵ_{11} and ϵ_{22})

change in the distance between reference points in the specimen free length, produced by a tensile load and expressed with respect to the initial distance between these points

ϵ_{11} is the strain measured parallel to the fibre direction

ϵ_{22} is the strain measured perpendicular to the fibre direction (in the plane of the laminate)

3.4

percentage strain to failure (α_{22})

increase in the distance between reference points in the specimen free length, produced by a tensile load and expressed as a percentage of the initial distance between these points and measured at the moment of failure

3.5

secant modulus between $F_R/10$ and $F_R/2$ (E_{T22})

on the strain/stress diagram (stress and strain being parallel to the loading axis) the secant modulus is the slope of the straight line passing through:

- the point corresponding to a stress calculated from $F_R/2$;
- the point corresponding to a stress calculated from $F_R/10$.

F_R is the load at failure of the specimen

¹⁾ Published as AECMA Recommendation at the date of publication of this standard

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

3.6

poisson's ratio (ν_{22})

absolute value of the ratio of the difference in strain ϵ_{22} to the difference in strain ϵ_{33} , measured between $F_{22}/10$ and $F_{22}/2$ (see Figure 2)

4 Principle

The method consists of the measurement of the longitudinal and, if required, the lateral strains in the material, in relation to the load applied, during a tensile test carried out at a constant speed until failure occurs.

Two types of specimen (A and B) may be used which give significantly different results as far as mean values and scatter are concerned.

It shall be specified on which type of specimen the result was obtained.

5 Apparatus

5.1 Micrometer with 6 mm diameter flat faces and accurate to $\pm 0,01$ mm.

5.2 Testing machine, accurate to ± 1 % in the load range used.

5.3 A means of recording strains, in relation to the load (extensometer or strain gauges), accurate to ± 1 % in the strain range used. The instrument shall not mark the specimen in a way which may cause premature failures.

5.4 If necessary, regulated heated cabinet for tests at temperatures other than ambient, according to EN 2744.

5.5 Thermocouple and recorder for tests at temperatures other than ambient.

6 Specimens

The specimens shall be taken from panels prepared according to EN 2596.

These panels shall have a curvature lower than the following limit:

$$\frac{f}{h} \leq 0,002$$

where

f is the curvature, in millimetres;

h is the reference length, in millimetres.

6.1 Form and dimensions

See Annex A.

6.2 Number

Minimum of ten

NOTE This number is necessary due to the high scatter in test results specific to this test.

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

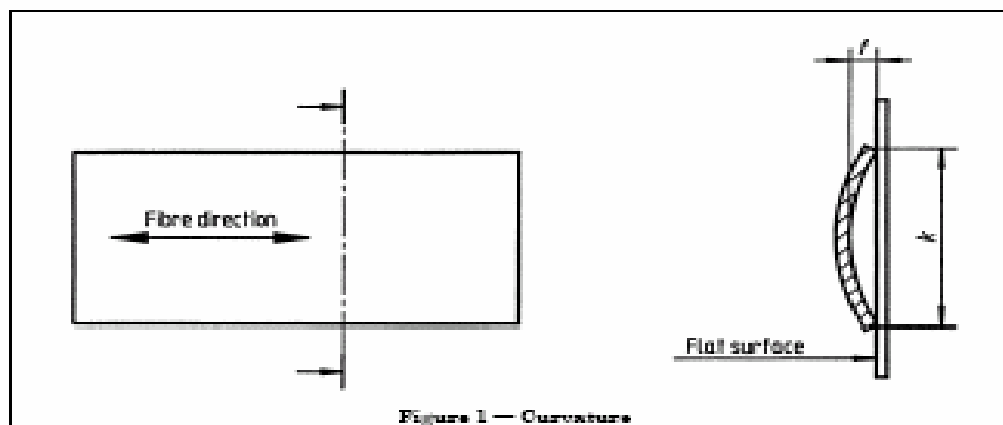


Figure 1 — Curvature

7 Procedure

7.1 Conditioning

- EN 2743 for tests in the initial state;
- EN 2489 for tests after immersion;
- EN 2825 for tests after exposure to humid atmosphere.

7.2 Specimen measurement

7.2.1 Type A specimens

Measure the width b to $\pm 0,01$ mm at the free length (see Annex A).

Make three measurements of the thickness to $\pm 0,01$ mm across the width of the free length.

h is the arithmetic mean of these three measurements.

7.2.2 Type B specimens

Measure the width to $\pm 0,01$ mm in the centre of the specimen and at two opposite points located 50 mm from the centre.

b is the arithmetic mean of these three measurements.

Measure the thickness to $\pm 0,01$ mm in the centre of the specimen and at two opposite points on the specimen axis and located 50 mm from the centre.

h is the arithmetic mean of these three measurements.

7.3 Tests

7.3.1 Tests at temperatures other than ambient

The period separating the conditioning and start of the test shall conform to the following conditions:

- for specimens which have not been aged or subjected to immersion, the exposure time at the test temperature shall be established by preliminary tests;
- for specimens subjected to immersion, see EN 2489;
- for humidity aged specimens, see EN 2825.

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

7.8.2 General requirements

7.8.2.1 The specimen shall be aligned in the test machine jaws so as to avoid the introduction of any bending loads.

7.8.2.2 The specimen shall be positioned in the jaws according to Figure A.5.

7.8.2.3 The load shall be applied at a constant rate of jaw separation of 0,5 mm/min.

7.8.2.4 Record the strain ϵ_{22} and, if necessary, the strain ϵ_{11} using the extensometer or strain gauges as a function of load.

7.8.2.5 Record the load at failure F_R and, if necessary, the strain at failure $(\epsilon_{22})_R$.

8 Expression of results

8.1 Ultimate tensile strength σ_{T22} (MPa)

$$\sigma_{T22} = \frac{F_R}{b \cdot h}$$

where:

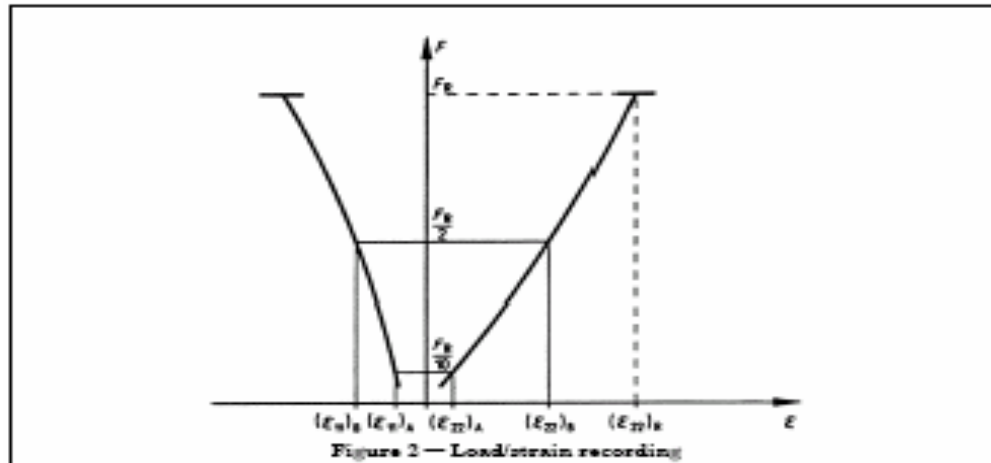
F_R is the load at failure, in Newtons;

b is the width, in millimetres;

h is the thickness, in millimetres.

8.2 Secant modulus E_{T22} (MPa) between $F_R/10$ and $F_R/2$

Determine the strains from the load/strain recording (Figure 2).



EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

$$E_{T22} = \frac{0,4 F_R}{b \cdot b [(e_{22})_R - (e_{22})_A]}$$

where:

F_R is the load at failure, in Newtons;

b is the width, in millimetres;

h is the thickness, in millimetres;

$(e_{22})_A$ is the strain perpendicular to the fibre direction corresponding to $F_R/10$;

$(e_{22})_R$ is the strain perpendicular to the fibre direction corresponding to $F_R/2$.

8.3 Poisson's ratio ν_{21}

$$\nu_{21} = \left| \frac{(e_{11})_R - (e_{11})_A}{(e_{11})_R - (e_{11})_A} \right|$$

where:

$(e_{22})_A$ is the strain perpendicular to the fibre direction corresponding to $F_R/10$;

$(e_{22})_R$ is the strain perpendicular to the fibre direction corresponding to $F_R/2$;

$(e_{11})_A$ is the strain parallel to the fibre direction corresponding to $F_R/10$;

$(e_{11})_R$ is the strain parallel to the fibre direction corresponding to $F_R/2$.

8.4 Percentage strain to failure α_{22}

$$\alpha_{22} = 100(e_{22})_R$$

where:

$(e_{22})_R$ is the strain to failure perpendicular to the fibre direction.

8.5 Validity

Failure shall occur within the free length of the specimen.

If the specimen breaks under the end tabs and the load continues to rise, ignore this first failure and continue the test until failure occurs within the free length.

9 Designation

EXAMPLE:

Number of this standard _____ EN2597B
 Type of specimen (see annex A) _____

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

 EN 2597:1998

10 Test report

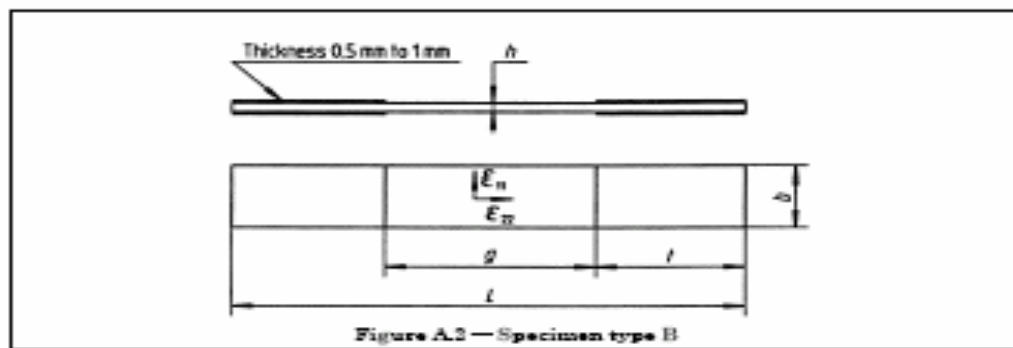
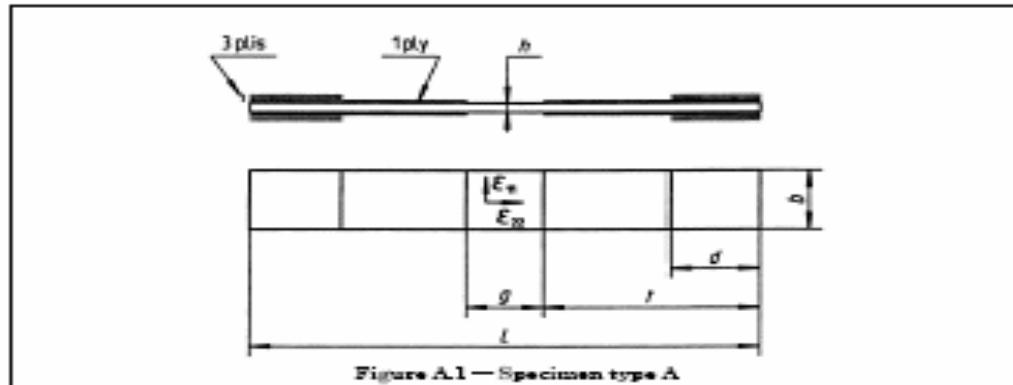
It shall include the following:

- designation (see 9);
- all data ensuring the traceability of the material (trade mark, identification marking, date of receipt, batch number, etc.);
- all information regarding specimen preparation;
- specimen dimensions;
- test conditions;
- exposure time at the test temperature;
- load/strain recording;
- ultimate tensile strength (σ_{T20}) and mode of failure;
- method of strain measurement (extensometer or strain gauges);
- secant modulus (E_{T20}) between $F_R/10$ and $F_R/2$;
- Poisson's ratio (ν_2) (if required);
- percentage strain to failure (α_{20});
- individual values, arithmetic mean and standard deviation;
- any incident which may have affected the results.

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

Annex A (normative)
Form, dimensions of specimen, test assembly



EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

EN 2597:1998

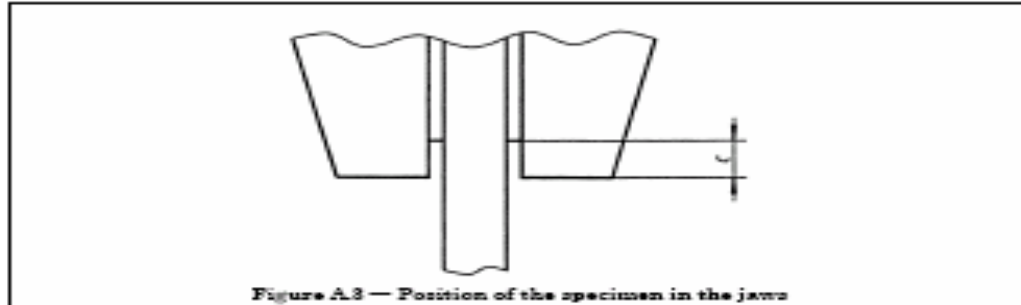


Table A.1

Dimensions in millimetres			
	Symbol	Type A	Type B
Length	L	250 ± 1	250 ± 1
Width	b	25 ± 0,5	25 ± 0,5
Thickness ^a	h	2 ± 0,2	2 ± 0,2
Length of end tabs ^b	t	120	50
Free length	g	10 ± 1	150 ± 1
Projection of jaws	c	≥ 7	≥ 7
Gripped length	d	50 ± 1	t

^a If the ply thickness causes any uncertainty regarding the number of plies necessary to obtain a laminate of the required thickness, this number of plies shall be specified in the Material standard.

^b Specimens shall be provided with end tabs of glass-epoxy laminate (ply thickness 0,2 mm to 0,3 mm) the reinforcing fibres of which are arranged at 45° to the longitudinal axis. The end tabs shall be bonded using an adhesive compatible with the test conditions, the theoretical characteristics of the end tabs and those of the Material.

EK-1. (Devam) Çekme testi standardı

BS EN
2597:1998

BSI
389 Chiswick High Road
London
W4 4AL

BSI — British Standards Institution

BSI is the independent national body responsible for preparing British Standards. It presents the UK view on standards in Europe and at the international level. It is incorporated by Royal Charter.

Revisions

British Standards are updated by amendment or revision. Users of British Standards should make sure that they possess the latest amendments or editions.

It is the constant aim of BSI to improve the quality of our products and services. We would be grateful if anyone finding an inaccuracy or ambiguity while using this British Standard would inform the Secretary of the technical committee responsible, the identity of which can be found on the inside front cover. Tel: 020 8996 9000. Fax: 020 8996 7400.

BSI offers members an individual updating service called PLUS which ensures that subscribers automatically receive the latest editions of standards.

Buying standards

Orders for all BSI, international and foreign standards publications should be addressed to Customer Services. Tel: 020 8996 9001. Fax: 020 8996 7001.

In response to orders for international standards, it is BSI policy to supply the BSI implementation of those that have been published as British Standards, unless otherwise requested.

Information on standards

BSI provides a wide range of information on national, European and international standards through its Library and its Technical Help to Exporters Service. Various BSI electronic information services are also available which give details on all its products and services. Contact the Information Centre. Tel: 020 8996 7111. Fax: 020 8996 7048.

Subscribing members of BSI are kept up to date with standards developments and receive substantial discounts on the purchase price of standards. For details of these and other benefits contact Membership Administration. Tel: 020 8996 7002. Fax: 020 8996 7001.

Copyright

Copyright subsists in all BSI publications. BSI also holds the copyright, in the UK, of the publications of the international standardisation bodies. Except as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act 1988 no extract may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means – electronic, photocopying, recording or otherwise – without prior written permission from BSI.

This does not preclude the free use, in the course of implementing the standard, of necessary details such as symbols, and size, type or grade designations. If these details are to be used for any other purpose than implementation then the prior written permission of BSI must be obtained.

If permission is granted, the terms may include royalty payments or a licensing agreement. Details and advice can be obtained from the Copyright Manager. Tel: 020 8996 7070.

EK-2. Düzlem içi kayma testi standardı



TÜRK STANDARDI
TURKISH STANDARD

TS EN ISO 14129

Nisan 1999

ICS 83.120; 83.140.20

**PLASTİK KOMPOZİTLER - ELYAF TAKVİYELİ - DÜZLEM
İÇİ KAYMA GERİLMESİ/KAYMA GERİLMESİ CEVABI
TAYİNİ- DÜZLEM İÇİ KAYMA MODÜLÜ VE KAYMA
MUKAVEMETRİ DAHİL $\pm 45^\circ$ 'LİK GERİLME DENEYİ
METODU**

Fibre- reinforced plastic composites- Determination of the in-
plane shear stress/shear strain response including the in-
plane shear modulus and strength, by $\pm 45^\circ$ tension test
method

TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ
Necatibey Caddesi No.112 Bakanlıklar/ANKARA

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE
EUROPÄISCHE NORM

EN ISO 14129

December 1997

ICS 83.130; 83.140.20

Descriptors: see ISO document

English version

Fibre-reinforced plastic composites - Determination of the in-plane shear stress/shear strain response, including the in-plane shear modulus and strength, by the $\pm 45^\circ$ tension test method (ISO 14129:1997)

Composites plastiques renforcés de fibres - Détermination de la réponse contrainte-déformation en cisaillement plan, module et résistance compris, par essai de traction à $\pm 45^\circ$ (ISO 14129:1997)

Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45° -Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungs-Kurve, des Schubmoduls und der Schubfestigkeit in der Lagenebene (ISO 14129:1997)

This European Standard was approved by CEN on 23 November 1997.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the Central Secretariat or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the Central Secretariat has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Central Secretariat: rue de Stassart, 35 B-1050 Brussels

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

Page 2
EN ISO 14129:1997

Foreword

The text of the International Standard ISO 14129:1997 has been prepared by Technical Committee ISO/TC 61 "Plastics" in collaboration with Technical Committee CEN/TC 249 "Plastics", the secretariat of which is held by IBN.

This European Standard shall be given the status of a national standard, either by publication of an identical text or by endorsement, at the latest by June 1998, and conflicting national standards shall be withdrawn at the latest by June 1998.

According to the CEN/CENELEC Internal Regulations, the national standards organizations of the following countries are bound to implement this European Standard: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Portugal, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom.

Endorsement notice

The text of the International Standard ISO 14129:1997 was approved by CEN as a European Standard without any modification.

NOTE: Normative references to International Standards are listed in annex ZA (normative)

Page 3
EN ISO 14129:1997

Annex ZA (normative) Normative references to international publications with their relevant European publications

This European Standard incorporates by dated or undated reference, provisions from other publications. These normative references are cited at the appropriate places in the text and the publications are listed hereafter. For dated references, subsequent amendments to or revisions of any of these publications apply to this European Standard only when incorporated in it by amendment or revision. For undated references the latest edition of the publication referred to applies.

<u>Publication</u>	<u>Year</u>	<u>Title</u>	<u>EN</u>	<u>Year</u>
ISO 291	1997	Plastics - Standard atmospheres for conditioning and testing	EN ISO 291	1997
ISO 2818	1994	Plastics - Preparation of test specimens by machining	EN ISO 2818	1996

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

INTERNATIONAL STANDARD

ISO
14129

First edition
1997-12-15

**Fibre-reinforced plastic composites —
Determination of the in-plane shear stress/
shear strain response, including the
in-plane shear modulus and strength,
by the $\pm 45^\circ$ tension test method**

*Composites plastiques renforcés de fibres — Détermination de la réponse
contrainte-déformation en cisaillement plan, module et résistance compris,
par essai de traction à $\pm 45^\circ$*



Reference number
ISO 14129:1997(E)

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

ISO 14128:1987(E)

Contents	Page
1 Scope	1
2 Normative references	1
3 Principle	2
4 Definitions	2
5 Apparatus	2
6 Test specimens	4
7 Number of test specimens	4
8 Conditioning	5
9 Procedure	5
10 Calculation and expression of results	6
11 Precision	7
12 Test report	7
Annex	
A. Specimen preparation	8

© ISO 1987

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland
Internet: central@iso.ch
X.400: cncb; pm400net; priso; orisooc; iso-central

Printed in Switzerland

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

© ISO

ISO 14128:1997(E)

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

International Standard ISO 14128 was prepared by Technical Committee ISO/TC 61, *Plastics*, Subcommittee SC 13, *Composites and reinforcement fibres*.

Annex A forms an integral part of this International Standard.

ISO 14128:1997(E)

© ISO

Introduction

This International Standard covers all current and future fibre-reinforced plastic composites which fall in the required manner. Harmonisation with the new tensile standard, ISO 527-5:1997, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*, has been achieved where relevant (e.g. document format, specimen size and related strains for modulus measurement).

The test is acceptable for modulus but there is concern over its use for the ultimate shear strength for high shear-elongation materials due to the high strain at failure with only a small further increase in load, fibre rotation and associated temperature rise. Therefore, the stress at a maximum shear strain of 5 % or less is used as the failure criterion. This failure criterion is also used in ASTM D 3518 (1995).

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

INTERNATIONAL STANDARD • ISO

ISO 14128:1997(E)

Fibre-reinforced plastic composites — Determination of the in-plane shear stress/shear strain response, including the in-plane shear modulus and strength, by the $\pm 45^\circ$ tension test method

1 Scope

1.1 This International Standard specifies a procedure for determining the in-plane shear stress/shear strain response, including the in-plane shear modulus and shear strength, of fibre-reinforced plastic composites by the $\pm 45^\circ$ tension test method.

1.2 The method is suitable for use with thermoset and thermoplastic matrix laminates made from unidirectional layers and/or fabrics including unidirectional fabrics, with the fibres oriented at $\pm 45^\circ$ to the specimen axis, where the lay-up is symmetrical and balanced about the specimen mid-plane.

NOTE — The method is not suitable for coarse fabrics.

1.3 As the test has been shown to be sensitive to the number and distribution of layers, comparisons should be undertaken using the same number of layers, which must be well distributed.

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 291:1997, *Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing*.

ISO 1268:1974, *Plastics — Preparation of glass fibre reinforced, resin bonded, low-pressure laminated plates or panels for test purposes*.¹⁾

ISO 3602:1980, *Statistical interpretation of test results — Estimation of the mean — Confidence interval*.

ISO 2818:1994, *Plastics — Preparation of test specimens by machining*.

ISO 5893:1993, *Rubber and plastics test equipment — Tensile, flexural and compression types (constant rate of traverse) — Description*.

1) Under revision.

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

ISO 14128:1987(E)

© ISO

3 Principle

A test specimen consisting of a strip of rectangular cross-section with the fibres oriented at $\pm 45^\circ$ to the specimen axis is loaded in tension. To determine the shear modulus the strains parallel and perpendicular to the specimen axis are measured. The test is terminated at $\gamma_{12} = 0,05$ if failure (excluding premature failure at or within the grip) has not occurred.

NOTE — Although this test method can establish shear stress/shear strain response well into the nonlinear region, the ultimate stress and strain values so obtained should be evaluated with the following caution. The material in the gauge section of this specimen is not in a state of pure shear, so normal stress components are present, even in the rotated ply coordinate system. It has been established that when a $\pm 45^\circ$ laminate is loaded in tension, normal stress components, though small, generally decrease the calculated ultimate stress and strain values of the material below the actual capability of the material, thus resulting in lower values of ultimate strength and strain than those obtained by more ideal methods, such as the tube torsion test.

4 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply:

4.1 in-plane shear stress, τ_{12} : The shear stress obtained by dividing the instantaneous load by twice the specimen cross-sectional area.

It is expressed in megapascals (MPa).

4.2 in-plane shear strength, τ_{12M} : The maximum in the shear stress prior to or at termination of the test at $\gamma_{12} = 0,05$.

It is expressed in megapascals (MPa).

4.3 shear strain, γ_{12} : The sum total of strain in the direction parallel and perpendicular to the specimen axis, i.e. $(\epsilon_x - \epsilon_y)$.

NOTE — ϵ_y has a negative sign when ϵ_x is positive.

4.4 in-plane shear (chord) modulus, G_{12} : The shear stress difference $(\tau_{12}'' - \tau_{12}')/2$ divided by the corresponding shear strain difference $(\gamma_{12}'' = 0,005 - \gamma_{12}' = 0,001)$ [see 10.3, equation (3)].

It is expressed in megapascals (MPa).

4.6 specimen coordinate axes: For the specimen shown in figure 1, the direction parallel to the specimen longitudinal axis is the "x" direction and the direction perpendicular to it is the "y" direction. The fibres are oriented at $\pm 45^\circ$ to these directions. The coordinate axes for a unidirectional reinforced composite material plate element are shown in figure 2.

5 Apparatus

5.1 Test machine

5.1.1 General

The machine shall conform to ISO 5893 as appropriate to the requirements given in 5.1.2 and 5.1.3.

5.1.2 Speed of testing

The speed of testing ν shall be kept constant in accordance with ISO 5893.

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

© ISO

ISO 14128:1997(E)

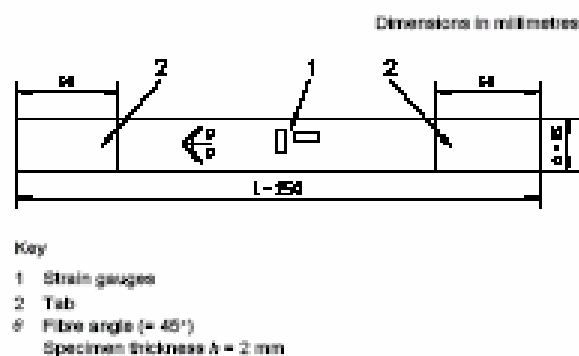


Figure 1 — Fibre-reinforced plastic composite specimen showing fibre axes

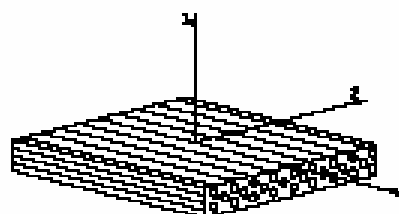


Figure 2 — Unidirectional reinforced composite plate element showing symmetry axes

5.1.3 Load indicator

The load indicator shall be such that the error in the indicated force is less than $\pm 1\%$ of the full-scale reading (see ISO 5883).

5.2 Strain measurement

The procedure requires the strain to be measured both parallel and perpendicular to the specimen axis. Strain gauges, applied as in figure 2, or extensometers shall be accurate to $\pm 1\%$ of the full scale. The gauges, surface preparation and bonding agents shall be chosen to give adequate performance on the subject materials, and suitable strain-recording equipment shall be employed.

5.3 Micrometer, or equivalent, capable of reading to 0,01 mm or less, and suitable for measuring the thickness h and width b of the test specimen.

The micrometer shall have contact faces appropriate to the surface being measured (i.e. flat faces for flat, polished surfaces and hemispherical faces for irregular surfaces).

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

ISO 14128:1997(E)

© ISO

6 Test specimens

6.1 Shape and dimensions

The specimen shall have a width of $25 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ and a length of 250 mm. Unless otherwise specified, the thickness shall be $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. The longitudinal edges of individual specimens shall be parallel to within 0,2 mm. The dimensions of the specimen are shown in figure 1.

For materials made with layers thicker than 0,125 mm, the laminate shall consist of 16 layers.

6.2 Preparation of specimens

6.2.1 General

A panel shall be prepared in accordance with ISO 1268 or another specified/agreed procedure with the required balanced and symmetrical $\pm 45^\circ$ fibre orientation.

Cut individual specimens or groups of specimens to the required size. Some parameters for machining are specified in ISO 2818. Further guidance on cutting specimens is given in annex A.

6.2.2 End tab material

Providing failure does not occur at or within the grip, unbonded tabs or no tabs may be used. If tabs are used, they shall be constructed from a cross-ply or fabric laminate made of glass-fibre/resin, or from the material under test, with the fibre axes of the fabric set at $\pm 45^\circ$ to the specimen axis. The tab material thickness shall be between 0,5 mm and 2 mm, with a tab angle of 90° (i.e. not tapered).

6.2.3 Application of end tabs

Bonded end tabs, if used, shall be applied to the specimen with a high-elongation adhesive, as shown in annex A.

NOTE — A similar procedure can be used for individual specimens or for a group of specimens.

6.2.4 Machining the specimens

The test specimens shall be cut with their axis at 45° to the fibre directions.

6.3 Checking the test specimens

The specimens shall be flat and free of twist. The surfaces and edges shall be free from scratches, pits, sink marks and flashes. The specimens shall be checked for conformity to these requirements by visual observation against straight-edges, squares and flat plates, and by measuring with micrometer callipers. Specimens showing measurable or observable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the required size and shape before testing.

7 Number of test specimens

7.1 At least five test specimens shall be tested. The number of measurements may be more than five if greater precision of the mean value is required.

It is possible to evaluate this by means of the confidence interval (95 % probability, see ISO 2602).

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

© ISO

ISO 14128:1997(E)

7.2 The results from test specimens that rupture at or inside the grips or end tabs shall be discarded and new specimens tested in their place.

8 Conditioning

Where applicable, condition the test specimens as specified in the standard for the material under test. In the absence of such information, select the most appropriate conditions from ISO 291, unless agreed otherwise by the interested parties.

9 Procedure

9.1 Test atmosphere

Where applicable, test the specimen as specified in the standard for the material under test. In the absence of such information, select the most appropriate conditions from ISO 291, unless agreed otherwise by the interested parties (e.g. for testing at elevated or reduced temperatures).

9.2 Measurement of specimen dimensions

Measure, at the mid-point of each test specimen, the width of the specimen to the nearest 0,1 mm and the thickness to the nearest 0,02 mm.

9.3 Specimen strain measurement

Apply extensometers or strain gauges along and perpendicular to the specimen axis (see figure 2) to measure the longitudinal (ϵ_L) and transverse (ϵ_T) strains, respectively.

9.4 Speed of testing

Where applicable, set the speed of testing as given in the standard for the material being tested. In the absence of this information, the speed of testing v shall be 2 mm/min.

9.5 Data collection

Monitor the load and both of the strain values throughout the test.

9.6 Test termination

Terminate the test at $\gamma_{12} = 0,05$ if failure has not occurred.

9.7 Maximum load

Record the failure load or the load at $\gamma_{12} = 0,05$.

9.8 Mode of failure

Check and record the mode of failure (see also 7.2).

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

ISO 14128:1987(E)

© ISO

10 Calculation and expression of results

10.1 Calculate the in-plane shear stress τ_{12} , expressed in megapascals, using the following equation:

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh} \quad \dots (1)$$

where

- F is the instantaneous load, in newtons;
- b is the width, in millimetres, of the test specimen;
- h is the thickness, in millimetres, of the test specimen.

10.2 Calculate the in-plane shear strength τ_{12M} , expressed in megapascals, using the following equation:

$$\tau_{12M} = \frac{F_M}{2bh} \quad \dots (2)$$

where F_M is the load, in newtons, at failure, or at $\gamma_{12} = 0,05$ if the test was terminated prior to failure.

10.3 Calculate the shear strain γ_{12} using the following equation:

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad \dots (3)$$

where

- ε_x is the strain in the direction parallel to the specimen axis;
- ε_y is the strain in the direction perpendicular to the specimen axis.

10.4 Calculate the in-plane shear (chord) modulus G_{12} , expressed in megapascals, using the following equation (see figure 3):

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'} \quad \dots (4)$$

where

- τ_{12}' is the shear stress at a shear strain $\gamma_{12}' = 0,001$;
- τ_{12}'' is the shear stress at a shear strain $\gamma_{12}'' = 0,005$.

10.5 Calculate the arithmetic mean of the individual determinations and, if required, the standard deviation and the 95 % confidence interval of the mean value using the procedure given in ISO 2502.

10.6 Calculate the stresses and the modulus to three significant figures.

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

© ISO

ISO 14128:1997(E)

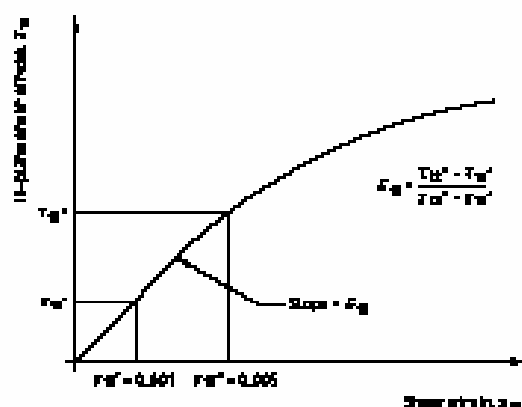


Figure 3 — Shear stress/shear strain diagram

11 Precision

The precision of this test method is not known because interlaboratory data are not available. When interlaboratory data are obtained, a precision statement will be added at the following revision. This method may not be suitable for use in specifications or in the case of disputed results as long as these data are not available.

12 Test report

The test report shall include the following information:

- a reference to this International Standard (i.e. ISO 14128);
- all details necessary for complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code number, form and previous history, where these are known;
- the accuracy grading of the test machine (see ISO 5893);
- the method of preparing the test specimens;
- the dimensions of the test specimens;
- the number of specimens tested;
- the test conditions and the conditioning procedures, if applicable;
- the type of strain measurement used;
- the individual determinations, including shear stress/shear strain diagrams, if required;
- the mean values of the individual determinations;
- the standard deviations and the 95 % confidence intervals of the mean values, if required;
- the type(s) of failure obtained;
- a statement as to whether any test specimens were rejected and, if so, the reasons;
- any operation not specified in this International Standard, as well as any incident likely to have affected the results;
- the date of the test.

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

ISO 14128:1987(E)

© ISO

Annex A (normative)

Specimen preparation

A.1 Machining the specimens

In all cases, take the following precautions:

- Avoid working under conditions that would create a large build-up of heat in the test specimen; it is recommended that a coolant is used. If a liquid coolant is used, dry the test specimens immediately after machining.
- Check that all cut surfaces of the test specimen are free from machining defects.

A.2 Attachment of end tabs

A recommended method is as follows:

Cut out from the material under test a sheet having the length of the intended test specimens and of a width suitable for the number of specimens required. To form the end tabs, cut rectangular strips of the required width and length.

Attach the strips as follows (see figure A.1):

- a) If required, rub with fine abrasive paper or lightly blast with suitable grit all surfaces to which adhesive will be applied.
- b) Remove any dust and clean these surfaces with a suitable solvent.
- c) For bonding, use a high-elongation adhesive system, strictly following the manufacturer's instructions.

NOTE — It is recommended that a film adhesive with a thin carrier be used. The adhesive should preferably have a shear strength greater than 30 MPa. It is desirable that the adhesive used be flexible in nature with an elongation at break greater than that of the material under test.

- d) Keep the assembled parts at the pressure and temperature recommended by the adhesive manufacturer for the time recommended by the manufacturer.
- e) Superpose the strips at the ends, parallel with each other and normal to the length direction of the specimens.
- f) The sheets together with the strips constituting the end tabs are the test blanks ready for cutting into test specimens.

EK-2. (Devam) Düzlem içi kayma testi standardı

© ISO

ISO 14128:1997(E)

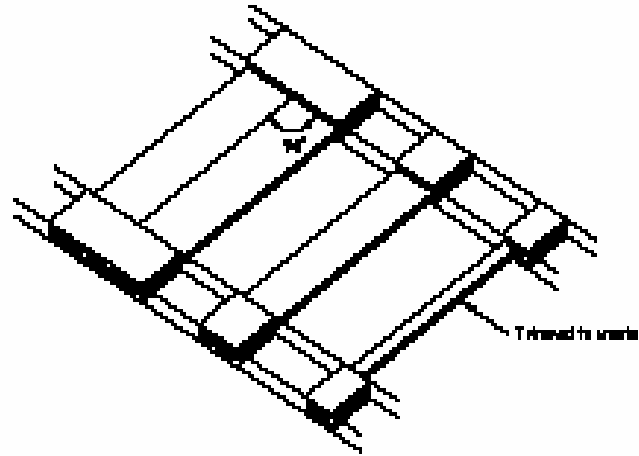


Figure A.1 — Tabbed panel for specimen preparation

EK-3. Taşıma testi standardı



Designation: D 883 – 02

Standard Test Method for Bearing Strength of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 883; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (²) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the bearing strength of rigid plastics in either sheet or molded form. Procedure A is applicable for tension loading and Procedure B for compression loading.

1.2 Test data obtained by this test method is relevant and appropriate for use in engineering design.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

Note 1—There is no known ISO equivalent to this standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing²

D 883 Terminology Relating to Plastics³

D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁴

D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁵

D 4805 Terminology of Plastic Standards⁶

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁷

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁸

3. Terminology

3.1 **Definitions**—For definitions of technical terms pertaining to plastics used in this test method, see Terminology D 883 or Terminology D 4805.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:⁹

3.2.1 **bearing area**—the diameter of the hole multiplied by the thickness of the specimen.

3.2.2 **bearing strength**—the bearing stress at which the bearing hole is deformed 4 % of its diameter.

3.2.3 **bearing stress**—the applied load in newtons (or pounds-force) divided by the bearing area in mm²(or in²).

3.2.4 **edge distance ratio**—the distance from the center of the bearing hole to the edge of the specimen in the direction of the principal stress, divided by the diameter of the hole.

3.2.5 **maximum bearing stress**—the maximum load in newtons (or pounds-force) sustained by the specimen, divided by the bearing area.

4. Significance and Use

4.1 This bearing strength test for plastics is intended to apply in the specification of various thermoplastic or thermosetting products in sheet form where rivets, bolts, or similar fastenings are to be used in joining members or sections. It also is intended to apply whenever sheet materials of the classes indicated are required to sustain edgewise loads that are applied by means of pins or rods of circular cross section which pierce the sheet perpendicular to the surface.

4.2 The purpose of the test is to determine the bearing strength of the material and to show the bearing stress versus the deformation of the hole. The allowable deformation of the hole in the material should be such as to produce no looseness of joints.

4.3 While it is a known fact that higher strength materials will generally give higher bearing strengths, there is no satisfactory method by which bearing strength may be estimated from tensile or compressive properties of the material.

4.4 Before proceeding with this test method, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions or testing parameters or combination thereof covered in the relevant ASTM materials specification shall take precedence over those in this test method. If there are no relevant ASTM material specifications then the default conditions apply.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.19 on Mechanical Properties. Current edition approved April 10, 2002. Published June 2002. Originally published as D 883 – 48 T. Last previous edition D 883 – 95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁶ Attention is also directed to Terminology E 6.

EK-3. (Devam) Taşıma testi standardı



5. Apparatus

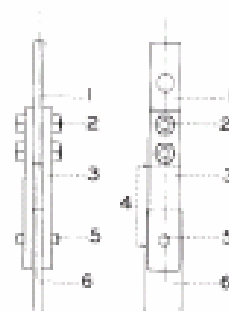
5.1 *Testing Machine*—A properly calibrated universal testing machine that can be operated at a speed of 1.3 ± 0.3 mm (0.05 $\pm$ 0.01 in.)/min, except that in cases of certain types of material it may be necessary to operate at a slower speed. The percentage of error of the testing machine shall be no more than ± 1 % of the applied load as determined in accordance with Practices E 4.

5.2 *Tension Loading Fixture*—A three-plate fixture of hardened steel similar to that shown in Fig. 1.

5.3 *Extension Indicator*—A suitable instrument reading in 0.0025 mm (0.0001 in.) for indicating the movement of the free end of the specimen with relation to the bearing pin in the tension loading fixture. A dial gage fitted with accessories for this purpose is shown in Fig. 2.

5.4 *Compression Loading Fixture*—A type of support with a suitable bearing pin similar to Fig. 3.

5.5 *Compression Indicator*—A suitable instrument reading to 0.0025 mm (0.0001 in.) for indicating the movement of the free end of the specimen with relation to the bearing pin in the compression loading fixture. A suggested dial gage assembly for this purpose is shown in Fig. 4.



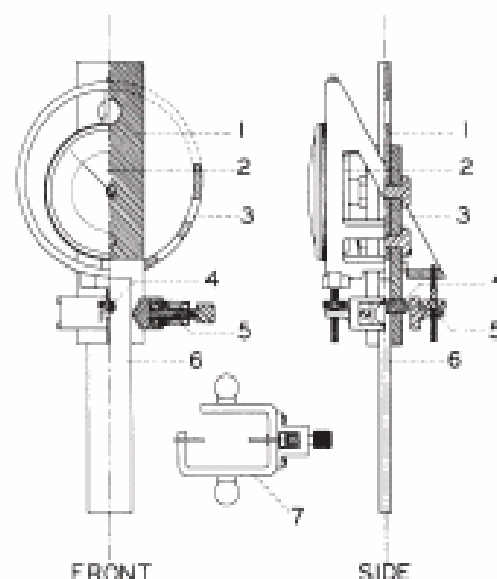
- 1—Hardened spacer plate.
2—0.3-mm (1/64 in.) steel bolts in reamed holes.
3—Hardened side plate.
4—Extensioner pins.
5—Hardened steel pin in reamed hole.
6—Test specimen.

Note—Critical dimensions are as follows:

Type	Bearing Hole Diameter, mm (in.)	Bearing Pin Diameter, mm (in.)	Thickness of Spacer Plate, mm ^a (in.)
I	3.175 ± 0.025 +0.000 −0.000	3.150 ± 0.000 +0.005 −0.005	3.2
	(0.125 ± 0.0010) +0.0000 −0.0000	(0.124 ± 0.0000) +0.0000 −0.0000	(1/4)
II	6.350 ± 0.025 +0.000 −0.000	6.325 ± 0.000 +0.005 −0.005	6.5
	(0.250 ± 0.0010) +0.0000 −0.0000	(0.249 ± 0.0000) +0.0000 −0.0000	(1/4)

^a The spacer plate shall be shimmed to a thickness of 0.025 to 0.125 mm (0.001 to 0.005 in.) greater than the specimen under test.

FIG. 1 Steel Tension Loading Fixture



- 1—Spacer plate.
2—Dial gage.
3—Double foot ring mounted on spindle of dial gage.
4—Bearing pin.
5—Yoke mounted on specimen.
6—Test specimen.
7—Plan view of yoke.

FIG. 2 Tension Loading Assembly

6. Test Specimens

6.1 The test specimens shall conform to the dimensions shown in Fig. 5. A size of test specimen shall be chosen that most nearly conforms to production requirements of the material and the type of loading under consideration. The thicker specimens with the larger bearing hole are likely to give the more precise results, although it is advantageous to use the thinner specimens with the smaller bearing hole in testing certain relatively brittle plastics because they are less likely to fail prematurely. The specimen may be machined from sheet or molded to finished size. The bearing hole shall be located as shown in Fig. 5. It shall be drilled undersized and reamed to size as indicated. The hole shall be clean and smooth with sharp edges but not polished. It is suggested that the reaming operation be done in the drill press by hand without the use of a jig.

7. Number of Test Specimens

7.1 At least five specimens shall be tested for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 Ten specimens, five perpendicular to and five parallel with the principal axis of anisotropy, shall be tested for each sample in case of anisotropic materials.

EK-3. (Devam) Taşıma testi standardı

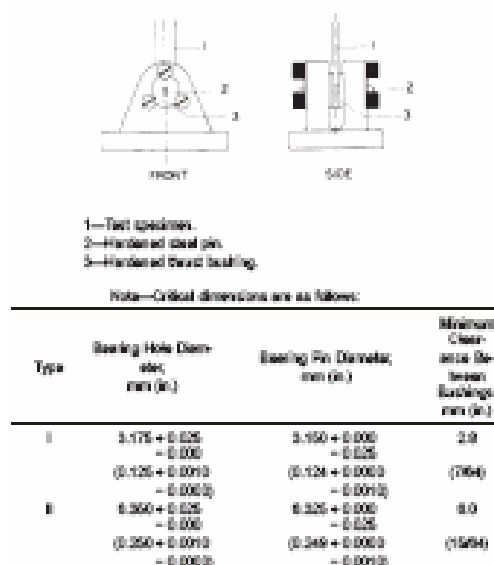


FIG. 3 Steel Compression Loading Fixture

7.3 Specimens that break at some obvious flaw shall be discarded and retests made, unless such flaws constitute a variable the effect of which is being studied.

8. Conditioning

8.1 **Conditioning**—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 638, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

8.2 **Test Conditions**—Conduct tests at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

9. Measurement of Dimensions

9.1 Measure the width and thickness of the conditioned test specimen to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at the bearing hole. Also measure the diameter of the bearing hole and the distance from the center of the bearing hole to the edge of the specimen in the direction of the principal stress to the nearest 0.025 mm (0.001 in.).

10. Speed of Testing

10.1 The mean rate of crosshead travel in the testing of specimens shall not exceed 1.3 ± 0.3 mm (0.05 ± 0.01 in./min). In any case the crosshead movement shall be slow enough so that deflection gage readings can be made accurately.

11. Procedure

11.1 The choice of either Procedure A for tension loading (11.2) or Procedure B for compression loading (11.3) is optional, but it should be recognized that Procedure B gives higher bearing strength values than Procedure A on the same material. Test specimens according to both Procedures A and B if a complete specification of bearing strength is required.

11.2 **Procedure A for Tension Loading**—Mount the specimen to be tested in the tension loading fixture and attach a deformation indicator. If a dial gage (Fig. 2) is used, adjust the yoke so that contact is made with the specimen at the level indicated in Fig. 1. Exception is taken in the case of those thermoplastic materials which exhibit extended plastic flow. Such specimens tend to “neck down” in the region of the bearing hole, and it is necessary to mount the yoke 12.7 mm (½ in.) below the normal position indicated in Fig. 1, so that it will not slip during test.

11.3 **Procedure B for Compression Loading**—Mount the specimen to be tested in the compression loading fixture and load through a flat, hardened compression plate. Adjust the clearance between the thrust bushings of the loading fixture such that their contact with the specimen is sufficient to support it in a vertical position without binding. Clamp the hardwood cheek blocks in place and attach the deformation indicator (see Fig. 4).

11.4 **Details Common to Procedures A and B**—Take care in aligning the long axis of the specimen with the center line of the testing fixture. Load the specimen at the prescribed rate of crosshead travel and take deformation readings. In case autographic recording is not available, record the load sustained by the specimen for every 0.0127-mm (0.0005-in.) deformation up to a total deformation of 4 % of the bearing hole diameter. Continue the test until maximum load is sustained and the corresponding deformation of the bearing hole is recorded.

12. Calculation

12.1 Plot the load - deflection curve for each specimen.

12.2 Use a template, as described in the Appendix, to determine the load at 4 % hole deformation.

12.3 Calculate the bearing strength as follows:

$$S_b = P/d \quad (1)$$

where:

S_b = bearing strength, MPa (or psi),
 P = bearing load at 4 % hole deformation, N (or lbf),
 d = bearing hole diameter, mm (or in.), and
 t = specimen thickness, mm (or in.).

12.4 Calculate the arithmetic mean of the observations and report the result to three significant figures.

12.5 Calculate the standard deviation of each set of observations and record to two significant figures.

13. Report

13.1 Report the following information:

13.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code number, form, principal dimensions, and previous history.

13.1.2 Direction of cutting and loading specimens.

EK-3. (Devam) Taşıma testi standardı

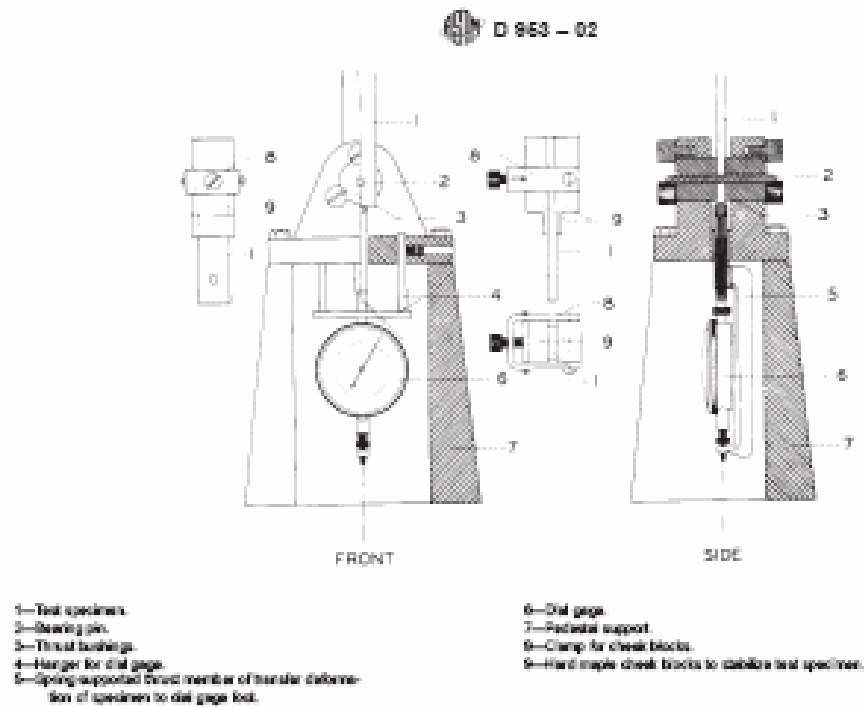
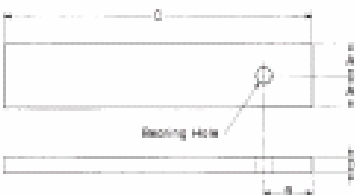


FIG. 4 Compression Loading Assembly



Type	Dimensions, mm ^a (in.)				Round Hole
	A	B	C	D	to
I	11.913 ± 0.127 (0.469 ± 0.006)	19.050 ± 0.127 (0.750 ± 0.006)	130.8 (5.15)	5.2 (0.2)	3.200 ± 0.025 (0.126 ± 0.001)
II	11.913 ± 0.127 (0.469 ± 0.006)	19.050 ± 0.127 (0.750 ± 0.006)	130.8 (5.15)	6.4 (0.25)	3.200 ± 0.025 (0.126 ± 0.001)

^a All fractional dimensions shall be held to ±0.43 mm (±0.016 in.) tolerance.

Edge distance ratio = B/hole diameter
FIG. 5 Dimensions of Bearing Strength Test Specimens

13.1.3 Conditioning procedure and environmental conditions under which the tests were conducted,

13.1.4 Length, width, and thickness of specimen, in millimetres (or inches),

13.1.5 Diameter of bearing hole, in millimetres (or inches),

13.1.6 Edge distance ratio,

13.1.7 Mean rate of crosshead motion in millimetres (or inches) per minute,

EK-3. (Devam) Taşıma testi standardı



13.1.8 Bearing strength in Megapascals (or pounds-force per square inch), stating whether Procedure A for tension loading or Procedure B for compression loading was used,

13.1.9 Maximum bearing stress in Megapascals (or pounds-force per square inch), stating whether Procedure A or Procedure B was used, and

13.1.10 The test method number and published/revision date.

14. Precision and Bias

14.1 Attempts to develop a comprehensive interlaboratory precision and bias statement for this test method have not been successful because of the small number of laboratories using this test method. However, limited precision data from one laboratory on one material utilizing a single operator, a single

apparatus, on a single day and replicate runs of the material has been provided as follows: Determinations were made on two sets of ten individual specimens to provide two test results. The coefficient of variation of the two test results averaged 4.9 % with a difference of 0.3 % between results.

14.2 There are no recognized standards to estimate the bias of this test method. Anyone wishing to participate in the development of precision and bias data should contact the chairman, Subcommittee D20.10 (Section D20.10.01), ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959.

15. Keywords

15.1 bearing strength; compression strength; plastics

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. DETERMINATION OF BEARING LOAD

XI.1 Bearing strength has been defined as the bearing stress at which the bearing hole is deformed a given percentage (4 %) of the hole diameter, and is by definition, sensitive to zero load errors. The following procedure for determining bearing strength has been found to eliminate this ambiguity. It is insensitive to zero load errors, and as a result improves the precision of the bearing strength measurements.

XI.2 The method is best illustrated by Fig. XI.1. Given the bearing load - deflection curve, *ABC*, the tangent is determined at a point, *B*, such that when the tangent is projected through the point, *O*, on the zero load axis, the distance between *O* and *D* shall be equal to 4 % of the bearing hole diameter.

XI.3 A template to facilitate the determination of point *B* on the curve is shown in Fig. XI.2. It is designed to fit the

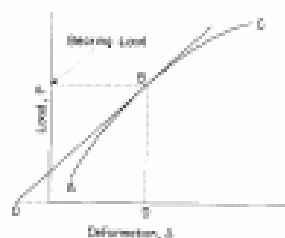


FIG. XI.1 Illustration of Method of Determining Bearing Strength from Bearing Load-Deformation Curve

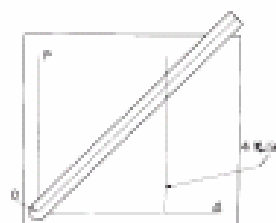


FIG. XI.2 Template for Determining Point *B* on Bearing Load-Deformation Curve

coordinate paper upon which the load-deformation curve is drawn in such a way that a "4 % line" on the template is established at a distance from the origin, *O*, equal to 4 % of the bearing hole diameter. It consists of a thin rigid sheet of transparent plastic upon which the rectangular coordinates are ruled. A strip of transparent plastic is mounted on the sheet so as to rotate about point *O*. The strip is provided with a reference center line passing through the point of rotation.

XI.4 In practice, the deformation axis of the template is superimposed on the zero load axis of the load-deformation curve. This can best be done with the aid of a drawing board and a parallel straightedge. The template is then slid to right or left while in superposition until the rotating arm can be made tangent to the load-deformation curve at its intersection with the 4 % line. The intersection is the point *B* on the curve in Fig. XI.1; *B* is projected horizontally to the load axis and the bearing load is read.

EK-4. Sıkıştırma Testi Standardı

**INTERNATIONAL
STANDARD****ISO
14126**

First edition
1999-09-01

**Fibre-reinforced plastic composites —
Determination of compressive properties in
the in-plane direction**

*Composites plastiques renforcés de fibres — Détermination des
caractéristiques en compression dans le plan*



Reference number
ISO 14126:1999(E)

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

ISO 14128:1999(E)

Contents

1 Scope	1
2 Normative references	2
3 Definitions	2
4 Principle	3
5 Apparatus	3
5.1 Test machine	3
5.1.1 General	3
5.1.2 Speed of testing	4
5.1.3 Indication of load	4
5.2 Strain measurement	4
5.3 Micrometer	4
5.4 Loading fixtures	4
5.4.1 General	4
5.4.2 Method 1: shear loading	4
5.4.3 Method 2: end loading	4
6 Test specimens	4
6.1 Shape and dimensions	4
6.1.1 Type A specimen	4
6.1.2 Type B specimen	5
6.2 Preparation	5
6.2.1 General	5
6.2.2 End-tab material	5
6.2.3 Application of end tabs	5
6.2.4 Machining the specimens	6
6.3 Checking	6
7 Number of test specimens	6
8 Conditioning	6
9 Procedure	6
10 Expression of results	7
11 Precision	8
12 Test report	8
Annex A (normative) Specimen preparation	12
Annex B (informative) Compression fixtures for method 1	14
Annex C (informative) Compression fixtures for method 2	16
Annex D (informative) Euler buckling criteria	17
Bibliography	18

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

Introduction

This standard is based on ISO 8515, with the scope extended to include all fibre-reinforced plastic composites, such as more recent composites based on carbon and aramid fibres, but retains the test conditions relevant for glass-fibre-reinforced systems. Other source documents consulted include ASTM D 3410 (buckling criteria, larger specimen width and longer gauge length), ASTM D 695 (modified version in SACMA SRM1), prEN 2850, CRAG 400, DIN 65380 and JIS K 7076 (see bibliography).

Several different types of jig, different materials and different specimen sizes are covered by these source documents. The table below presents examples, the specimen sizes being given as overall length $\times$ gauge length $\times$ width $\times$ thickness, in millimetres.

ISO 8515 (GRP)	Celanese type 110 $\times$ 13 $\times$ 6,4 $\times$ 2	End block 120 $\times$ 20 $\times$ 10 $\times$ (3 to 10)	
prEN 2850 (CFRP)	Celanese type 110 $\times$ 10 $\times$ 10 $\times$ 2	ASTM D 695 80 $\times$ 5 $\times$ 12,5 $\times$ 2	Revision includes a machined specimen with co-cured tabs.
JIS K 7076 (CFRP)	ASTM D 695 78 $\times$ 8 $\times$ 12,5 $\times$ 2	Celanese 134 $\times$ 8 $\times$ 6,5 $\times$ 2	ITTRI 108 $\times$ 8 $\times$ (6 to 12,5) $\times$ (1 to 2)
ASTM D 3410 (all fibres)	Celanese 140 $\times$ 12 $\times$ 6 $\times$ variable (equations/tables give required thickness for modulus, expected strength and gauge length)	ITTRI 140 $\times$ (25 to 12) $\times$ (12 or 25) $\times$ variable	
DIN 65380 (all fibres)	Celanese 112 $\times$ 8 $\times$ 6,35 $\times$ 2	ITTRI 112 $\times$ 8 $\times$ 6,35 $\times$ 2	
CRAG 400 (all fibres)	Celanese 110 $\times$ 10 $\times$ 10 $\times$ 2		
SACMA SRM1 (all fibres)	ASTM D 695 (modified) 80,8 $\times$ 12,7 $\times$ 4,8 $\times$ [1 (unidir.) or 3 (fabric)]		

These test methods use aspect ratios (height/thickness and height/width) for the gauge area covering a range of values, which appears undesirable in a test known to be susceptible to buckling failures. Also, new support jigs are still being developed. This International Standard harmonizes and rationalizes the current situation by:

- concentrating on the quality of the test by limiting the maximum bending-buckling strain allowable at failure (i.e. 10 % as recommended by ASTM — see also 5 % level in prEN 2850), so that it is possible to justify an axial-load analysis;
- allowing any design of jig to be used that meets this above requirement, using two methods of loading (i.e. shear and end loaded);
- standardizing on two specimen designs, one principally for unidirectional material and one for other materials (the chosen specimen can be used with either loading method);
- adding an informative note as annex D, which was proposed by ASTM for harmonization purposes, and is taken from ASTM D 3410 (in a modified form).

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

INTERNATIONAL STANDARD © ISO

ISO 14128:1998(E)

Fibre-reinforced plastic composites — Determination of compressive properties in the in-plane direction

1 Scope

1.1 This International Standard specifies two methods for determining compressive properties, in directions parallel to the plane of lamination, of fibre-reinforced plastic composites.

1.2 The compressive properties are of interest for specifications and quality-control purposes.

1.3 Two loading methods and two types of specimen are described. They are:

- Method 1: provides shear loading of the specimen (gauge length unsupported).
- Method 2: provides end loading, or mixed loading, of the specimen (gauge length unsupported).

NOTE For tabbed specimens end-loaded using method 2, some load is transferred into the specimen gauge length by shear through the tabs.

- Type A specimen: rectangular cross-section, fixed thickness, end-tabbed.
- Type B specimen: rectangular cross-section, range of thicknesses, untabbed or end-tabbed (two sizes available).

Any combination of test method and specimen may be used, provided that the requirements of subclause 9.8 are satisfied and that the specimen is representative of the material under test. These alternative test conditions will not necessarily give the same result.

The type A specimen is the preferred specimen for unidirectionally reinforced materials tested in the fibre direction. For other materials, the type A or B specimen may be used. The type B2 specimen is preferred for mat, fabric and other multidirectionally reinforced materials.

1.4 The methods are suitable for fibre-reinforced thermoplastic and thermosetting plastic composites.

Unreinforced and particle-filled plastics, as well as those reinforced with short fibres (less than 1 mm in length), are covered by ISO 604 (see bibliography).

1.6 The methods are performed using specimens which may be machined from a test panel made in accordance with ISO 1268 or equivalent methods, or from finished or semi-finished products.

1.8 The methods specify required dimensions for the specimen. Tests which are carried out on specimens of other dimensions, or on specimens which are prepared under different conditions, may produce results which are not comparable. Other factors, such as the speed of testing, the support fixture used and the condition of the specimens, can influence the results. Consequently, when comparative data are required, these factors must be carefully controlled and recorded.

1.7 Fibre-reinforced plastics are usually anisotropic. It is therefore often useful to cut test specimens in at least the two main directions of anisotropy, or in directions previously specified (for example a lengthwise direction associated with the production process).

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of ISO and IEC maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 291:1997, *Plastics — Standard atmospheres for conditioning and testing*.

ISO 527-1:1993, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles*.

ISO 527-4:1997, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*.

ISO 1268:1974, *Plastics — Preparation of glass fibre reinforced, resin bonded, low-pressure laminated plates or panels for test purposes* (under revision).

ISO 2602:1980, *Statistical interpretation of test results — Estimation of the mean — Confidence interval*.

ISO 3534-1:1993, *Statistics — Vocabulary and symbols — Part 1: Probability and general statistical terms*.

ISO 5893:1993, *Rubber and plastics test equipment — Tensile, flexural and compression types (constant rate of traverse) — Description*.

ISO 9353:1991, *Glass-reinforced plastics — Preparation of plates with unidirectional reinforcements by bag moulding*.

3 Definitions

For the purpose of this International Standard, the following definitions apply:

3.1

compressive stress

σ_c

the compressive force experienced by the test specimen at any particular moment divided by the initial cross-sectional area of the parallel-sided portion of the specimen

It is expressed in megapascals.

3.2

compressive strength

compressive failure stress

σ_{cM}

the maximum compressive stress sustained by the specimen

It is expressed in megapascals.

3.3

compressive strain

ϵ_c

the ratio of the decrease in the distance between the gauge marks on the parallel-sided portion of the test specimen (due to a compressive force) to the initial distance between the gauge marks

It is expressed as a dimensionless ratio or in percent.

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

3.4

compressive failure strain

ϵ_{cm}

the longitudinal compressive strain at the compressive failure stress

It is expressed as a dimensionless ratio or in percent.

3.6

modulus of elasticity in compression

chord modulus

E_c

the stress difference (σ' minus σ'') divided by the corresponding strain difference (ϵ' (= 0,0025) minus ϵ'' (= 0,0005)) (see subclause 10.2)

It is expressed in megapascals.

3.8

specimen coordinate axes

the coordinate axes for the material with the fibres preferentially aligned in one direction (see Figure 1)

The direction parallel to the fibre axes is defined as the "1"-direction and the direction perpendicular to the fibre axes the "2"-direction. For other materials, the "1"-direction is normally defined in terms of a feature associated with the production process, such as the long direction for a continuous-sheet process. The "2"-direction is again perpendicular to the "1" direction.

Results for specimens cut parallel to the "1"-direction are identified by the subscript "11" (e.g. E_{c11}). Similarly, results for specimens cut parallel to the "2"-direction are identified by the subscript "22" (e.g. E_{c22}).

NOTE The "1"-direction is also referred to as the O° or longitudinal direction, and the "2"-direction as the 90° or transverse direction. More generally, the X, Y and Z (through-thickness) coordinate system for any material can be equated to the "1"-, "2"- and "3"-directions.

4 Principle

An axial force is applied to the unsupported length of a rectangular specimen held in a loading fixture, while the applied load and strain in this area are monitored. The test method concentrates on the quality of the axial deformation experienced by the specimen. Any loading fixture can be used, provided specimen failure occurs below a 10 % bending strain in the specimen.

The compressive load is applied to the material

- either by shear through end tabs (method 1);
- or by direct end loading of the specimen (method 2).

Method 2 using a tabbed specimen results in load introduction into the test area by a combination of direct compression and shear through the tabs.

NOTE It is important to realize that the test results obtained by these two methods are not necessarily comparable.

5 Apparatus

5.1 Test machine

5.1.1 General

The machine shall conform to ISO 5893 as appropriate to the requirements given in 5.1.2 and 5.1.3.

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

6.1.2 Speed of testing

The test machine shall be capable of maintaining the required speed of testing (see 9.5).

6.1.3 Indication of load

The error for the indicated load shall not exceed $\pm 1\%$.

6.2 Strain measurement

Strain shall be determined by means of either strain gauges or suitable extensometers. Strain shall be measured on both faces of the specimens. Strain gauge elements shall be not more than 3 mm in length. The error for the indicated strain shall not exceed $\pm 1\%$ for type A and B1 specimens. The gauges, the surface preparation and the bonding agents used shall be chosen to give adequate performance with the materials being tested, and suitable strain-recording equipment shall be employed.

6.3 Micrometer

A micrometer, or equivalent, reading to less than or equal to 0,01 mm shall be used to determine the thickness h and width b of the test specimen.

The micrometer shall have faces appropriate to the surface being measured (i.e. flat faces for flat, polished surfaces and round faces for other cases).

6.4 Loading fixtures

6.4.1 General

Fixtures appropriate to the loading method chosen shall be used. The compression fixture shall load the specimen so that the requirement on allowable specimen bending given in 9.8 is met. The fixture used shall be identified in the test report.

6.4.2 Method 1: shear loading

The load is applied to the specimen by shear through the faces of the end tabs. It is permissible to use different types of grip and sleeve (trapezoidal, for example). Aligned hydraulic grips in aligned test machines are also acceptable. A schematic diagram of a compression fixture for shear loading is given in Figure 2.

NOTE Some method 1 fixtures in common use are shown in annex B, e.g. ASTM D 3410: method A (Calanese) and method B (TTR).

6.4.3 Method 2: end loading

The load is applied directly to the end of the specimen. For a tabbed specimen, loading is by a combination of end loading and shear loading through the tab. A schematic diagram of a compression fixture for shear loading is given in Figure 3.

NOTE 1 Some method 2 fixtures in common use are shown in annex C, e.g. ISO 8515 and ASTM D 695 (modified version in prEN 2850). The D 695 fixture gives a lower degree of support to the end of the specimen.

NOTE 2 The main aspect of the fixture design for both loading methods is the alignment (initial and throughout the test), and for method B of ASTM D 3410 a further important aspect is prevention of failure at the end of the specimen.

6 Test specimens

6.1 Shape and dimensions

6.1.1 Type A specimen

The specimen shall be straight-sided and of rectangular cross-section, with the dimensions given in Table 1 (see also Figure 4).

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

8.1.2 Type B specimen

The specimen shall be straight-sided and of rectangular cross-section, with the dimensions given in Table 1. End tabs shall be used if necessary to avoid failure at the loaded ends of the specimen.

Table 1 — Specimen dimensions

Dimensions	Symbol	Dimensions in millimetres		
		Type A specimen	Type B1 specimen	Type B2 specimen
Overall length (minimum)	l_0	110 ± 1	110 ± 1	125 ± 1
Thickness	b	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$ to $10 \pm 0,2$	≥ 4
Width	δ	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
Distance between end tabs/grips	L	10	10	25
Length of end tabs (minimum)	l_t	50	50 (if required)	50 (if required)
Thickness of end tabs	d_t	1	0,5 to 2 (if required)	0,5 to 2 (if required)

NOTE Requirements for specimen quality and parallelism of specimen and end tabs are given in subclause 8.3.

8.2 Preparation

8.2.1 General

A panel shall be prepared in accordance with ISO 1268, ISO 9353 or another specified/agreed procedure. Specimens cut from finished parts (for example, for quality control during manufacture or on delivery) shall be taken from flat areas of uniform thickness.

8.2.2 End-tab material

The ends of the specimen shall be reinforced, if necessary, with end tabs made preferably from a 0°/90° cross-ply or fabric laminate made from glass-fibre/resin with the fibre axes in the fabric set at $\pm 45^\circ$ to the specimen axis. The tab thickness shall be between 0,5 mm and 2 mm, with a tab angle of 90° (i.e. not tapered). If tab failure occurs under high end loads, the fibre axes in the tab shall be set at 0°/90° to the specimen axis.

Alternatives, such as tabs made from the material under test, mechanically fastened tabs, unbonded tabs or friction materials (emery paper, grit paper or fine-finish grip faces), shall be shown, before use, to give at least equal strength values (see ISO 527-1:1993, subclause 10.5) and no greater coefficient of variation (see ISO 3534-1) than the recommended tab material. When the test is carried out on untabbed specimens, the "distance between tabs" shall be taken to be the distance between the tabs of a corresponding tabbed specimen (see ISO 527-4:1997, type 3 specimen).

8.2.3 Application of end tabs

The end tabs shall be bonded to the specimen as shown in annex A.

NOTE This procedure can be used for individual specimens or groups of specimens.

8.2.4 Machining the specimens

Method 1: Machine the tab surfaces as necessary to ensure the tabs are symmetrical about the specimen centreline and parallel to each other.

Method 2: Machine the end faces of each specimen so that they are parallel to each other and perpendicular to the longitudinal axis of the specimen. The allowed deviation from parallel of the areas of the end-loading plates in

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

contact with the specimen ends is 0,1 % of the initial length of the specimen, i.e. the distance between the end-loading plates. Tabs, if used, shall be prepared as for method 1.

Some specimen-machining parameters are specified in ISO 2818. With unidirectionally reinforced materials, the test specimen shall be taken with its axis within 0,5° of the mean fibre axis.

NOTE Additional guidance on machining specimens is given in annex A.

6.3 Checking

The specimens shall be free of twist and shall have symmetrical pairs of parallel surfaces. The surfaces and edges shall be free from scratches, pits, sink marks and flash. The specimens shall be checked for conformity with these requirements by visual observation against straight edges, squares and flat plates, and by measuring with micrometer callipers. Specimens showing measurable or observable departure from one or more of these requirements shall be rejected or machined to the proper size and shape before testing.

7 Number of test specimens

7.1 At least five test specimens shall be tested in each direction of test. The number of measurements may be more than five if greater precision of the mean value is required.

It is possible to calculate this by means of the confidence interval (95 % probability, see ISO 2602).

7.2 The results from test specimens that rupture inside the grip end blocks or end tabs shall be discarded and new specimens tested in their place. Replacement specimens shall also be used if bending of the specimen exceeds the maximum value permitted in 9.8.

NOTE This test method can result in failures at the edge of the loading fixture or end tab rather than in the middle of the gauge length. These failures are acceptable, but consideration should be given to minimizing them by using a different type of loading fixture, tab, etc.

8 Conditioning

Condition the test specimens as specified in the International Standard for the material tested. In the absence of this information, select the most appropriate set of conditions from ISO 291, unless otherwise agreed upon by the interested parties, e.g. when testing at elevated or low temperatures.

9 Procedure

9.1 Conduct the test in the atmosphere specified in the International Standard for the material tested. In the absence of this information, select the most appropriate set of conditions from ISO 291, unless otherwise agreed upon by the interested parties, e.g. when testing at elevated or low temperatures.

9.2 Measure the width b of each test specimen to the nearest 0,1 mm and the thickness h to the nearest 0,02 mm.

9.3 Attach strain gauges, or extensometers, and set up the necessary strain-recording equipment. Two strain measurements (one on each face of the specimen, i.e. back-to-back) are required to ascertain that column bending is not occurring. Euler buckling is considered to have been detected if the strain on one face reverses (decreases) while the strain on the opposite face increases rapidly.

With batches of specimens greater than five, tests can be conducted without making two strain measurements provided that:

- a) the first five specimens are shown to fail at a bending strain less than the value given in 9.8 using back-to-back strain measurements;
- b) there is no change in the test conditions (i.e. batch, specimen type, test conditions, operator, test equipment, etc.);

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

c) the tests are conducted over a short time period without disrupting the fixture alignment.

In such cases, the modulus, if required, can be obtained from a single strain measurement.

The change in procedure shall be reported in the test report.

8.4 Mount the specimen in the compression fixture.

8.6 Set the cross-head speed to 1 mm/min $\pm$ 0,5 mm/min and load the specimen to failure.

8.8 Record the load and the strain (or deformation) continuously, if possible, or at least record the data at regular increments of strain.

8.7 Record the maximum load sustained by the specimen during the test.

8.8 Check that the test was valid (see 7.2). A test is valid if failure occurs within or at the end of the specimen gauge length. There shall be no failure (breaking) of the specimen ends when loaded by method B.

Bending is acceptable if the difference between the strains recorded on each face of the specimen throughout the duration of the test until failure is such that

$$\left| \frac{\varepsilon_{11b} - \varepsilon_{11a}}{\varepsilon_{11b} + \varepsilon_{11a}} \right| \leq 0,1$$

where ε_{11a} and ε_{11b} are the longitudinal strains on opposite faces of the specimen.

If a large strain difference suggests an Euler column buckling failure, annex D can be used to calculate a revised thickness for type B specimens.

8.8 Record the mode of failure (see Figure 6).

10 Expression of results

10.1 Calculate the compressive strength σ_{cM} , expressed in megapascals, using the equation

$$\sigma_{cM} = \frac{F_{max}}{bh}$$

where

F_{max} is the maximum load, in newtons;

b is the width, in millimetres, of the test specimen;

h is the thickness, in millimetres, of the test specimen.

10.2 Calculate the compressive modulus E_c , expressed in megapascals, using the equation

$$E_c = \frac{\sigma'_c - \sigma''_c}{\varepsilon'_c - \varepsilon''_c}$$

where

σ'_c is the compressive stress at $\varepsilon'_c = 0,0025$, expressed in megapascals;

σ''_c is the compressive stress at $\varepsilon''_c = 0,0005$, expressed in megapascals.

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

See Figure 5 [N.B. $\epsilon_{10}^0 = 0,0005$ and $\epsilon_{10}^0 = 0,0025$ shall be average values if the strain values on opposite faces of the specimen are not equal (see 9.8)].

10.3 Calculate the compressive failure strain ϵ_{100} from the mean of the longitudinal strains (ϵ_{110} and ϵ_{110}) at failure.

10.4 Calculate the arithmetic mean of the test results and, if required, the standard deviation and the 95 % confidence interval of the mean using the procedure given in ISO 2602.

11 Precision

The precision of this test method is not known because interlaboratory data are not available. When interlaboratory data are obtained, a precision statement will be added at the following revision.

12 Test report

The test report shall include the following information:

- a) a reference to this International Standard, indicating the loading method and specimen type used;
- b) all details necessary for complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code-number, form and previous history, where these are known;
- c) all relevant information on the preparation of the test specimens, including information on the direction of cutting/testing (e.g. direction 1 or 2 in Figure 1);
- d) all details necessary for complete identification of the fixture used;
- e) the dimensions of the test specimens;
- f) the test conditions and conditioning procedures, if applicable;
- g) the number of specimens tested;
- h) the speed of testing;
- i) the accuracy grading of the test machine (see ISO 5893);
- j) the method of strain or deformation measurement;
- k) the individual test results, if required;
- l) the mean values of the individual results;
- m) the type of failure obtained;
- n) the standard deviations and the 95 % confidence intervals of the mean values, if required;
- o) the date of measurement.

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

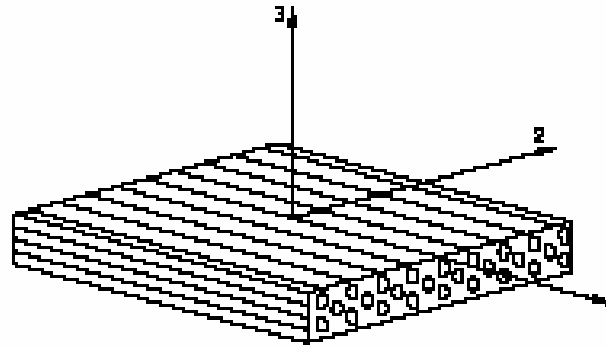
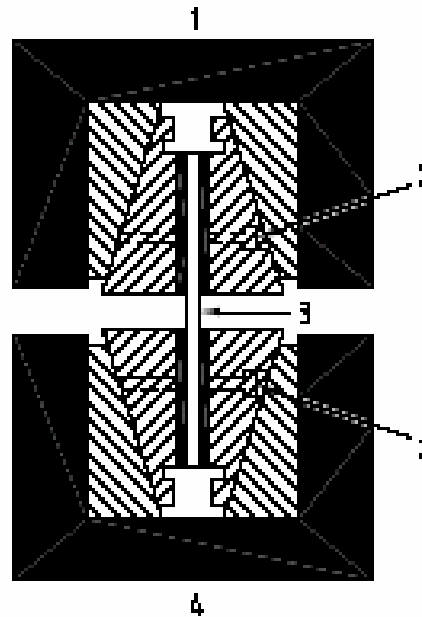


Figure 1 — Unidirectionally reinforced composite plate element showing symmetry axes



Key

- | | | | |
|---|---------------------|---|---------------------|
| 1 | Upper housing block | 3 | Specimen |
| 2 | Locking screws | 4 | Lower housing block |

Figure 2 — Schematic diagram of compression test specimen and fixture for method 1

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

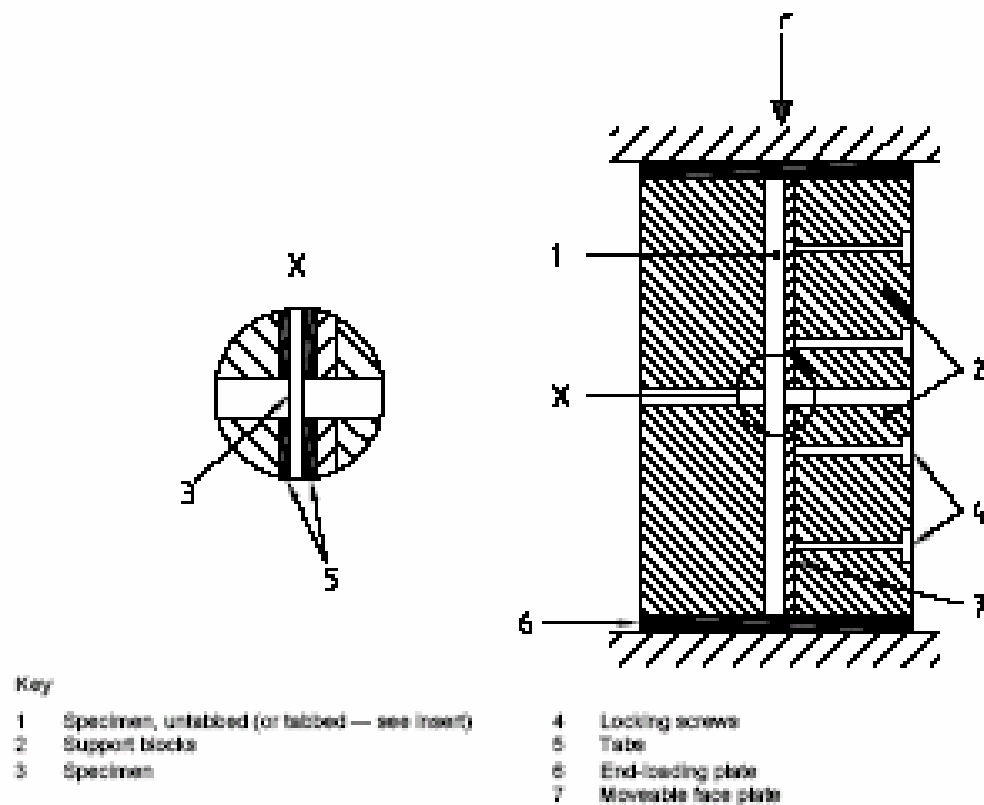


Figure 3 — Schematic diagram of compression test fixture for method 2

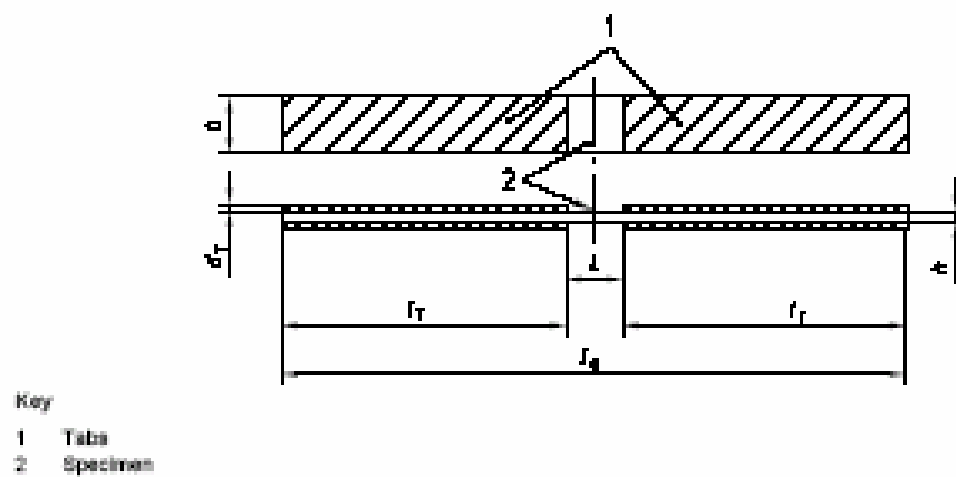


Figure 4 — Type A and B tabbed-specimen designs (dimensions are given in Table 1)

EK-4. (Devam) Sıkıştırma Testi Standardı

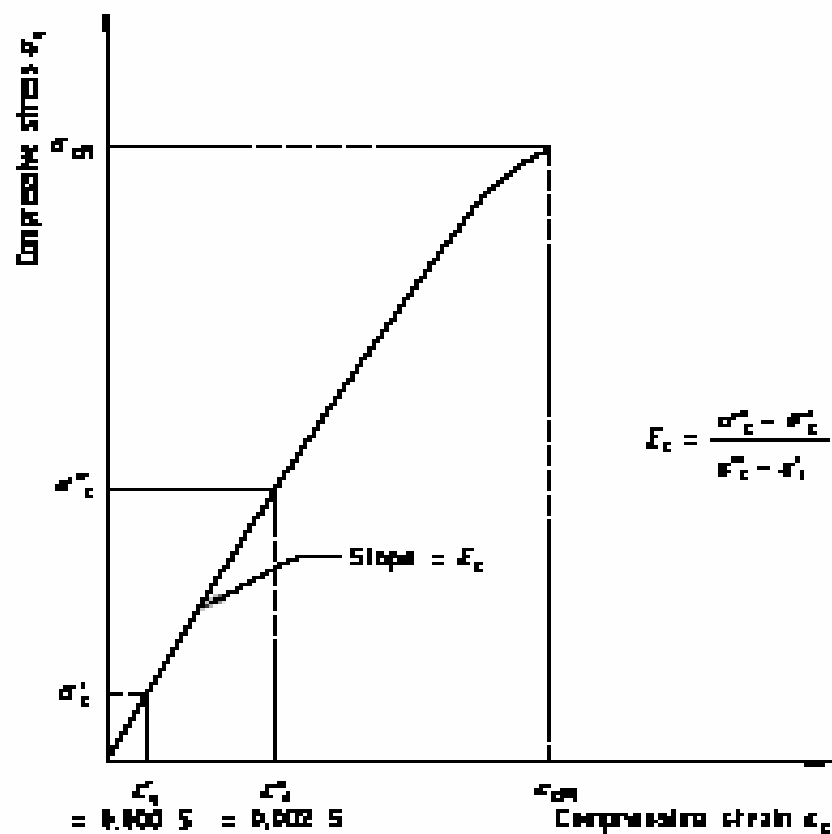


Figure 5 — Compressive stress/strain diagram

In-plane shear



Compressive



Through-the-depth shear



Splitting



Delamination



Figure 6 — Acceptable modes of failure

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİREL, Azime
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 10.04.1977 Antalya / Akseki
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (312) 335 93 80
e-mail : azidem@gmail.com

Eğitim

Derece

Yüksek lisans

Eğitim Birimi

Gazi Üniversitesi /

Kimya Mühendisliği Bölümü

Lisans

Ankara Üniversitesi /

Kimya Mühendisliği Bölümü

Lise

Antalya Lisesi

Mezuniyet tarihi

2002

1994

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Araştırma-inceleme, müzik, sinema,