

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİTLERİN KURU KAYMADAKİ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI

Mürsel YILMAZ

Mayıs, 2013

İZMİR

**KOMPOZİTLERİN KURU KAYMADAKİ
AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon – İmalat Programı

Mürsel YILMAZ

Mayıs, 2013

İZMİR

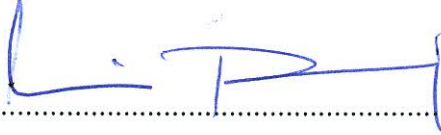
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MÜRSEL YILMAZ, tarafından YRD. DOÇ. DR. MELİH BELEVİ yönetiminde hazırlanan “KOMPOZİTLERİN KURU KAYMADAKİ AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Melih BELEVİ

Yönetici



Prof. Dr. Mine DEMİRSOY

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Uğur MALAYOĞLU

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bana yol gösteren, desteğini esirgemeyen hocam, tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Melih BELEVİ' ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında samimi yardımlarını esirgemeyen Sayın Araş. Gör. Cemal KOÇHAN ve Sayın Araş. Gör. Gökçe Mehmet GENÇER' e teşekkür ederim.

Deney numuneleri üretiminde kullandığımız elyafları tarafıma hibe eden Telateks Tekstil Ürünleri San. Ve Tic. A.Ş. (Metyx Composites) ve değerli yetkililerine ve yine numune üretiminde kullandığımız epoksi reçine ve sertleştiriciyi hibe eden Duratek Koruyucu Malzemeler San. Ve Tic. A.Ş. ve değerli yetkililerine, Duratek firmasından verdiği değerli teknik destek için Sayın Kerem PAKSOY beye teşekkür ederim.

Deney numuneleri üretiminde yardımlarını, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Bülent Murat İÇTEN 'e teşekkür ederim.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi sırasında desteğini, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli arkadaşım Gürcan DURMAZ 'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezim sırasında her türlü maddi ve manevi desteğini gösteren çalışmakta olduğum Ege Endüstri ve Ticaret A.Ş. ve değerli yöneticilerime ve emeği geçen çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, tüm öğrenim hayatım süresince olduğu gibi lisansüstü öğrenimim süresince maddi ve manevi desteklerini bir an olsun esirgemeyen, tecrübelerine sürekli ihtiyaç duyduğum annem Naime YILMAZ ve babam Mustafa YILMAZ 'a teşekkürlerimi sunarım.

Mürsel YILMAZ

KOMPOZİTLERİN KURU KAYMADAKİ AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Bu çalışmada, kuru kayma aşınması şartlarında örgü kumaş şeklinde biaxial cam elyaf (0/90 ve -45/45), triaxial cam elyaf (-45/90/45), quadriaxial cam elyaf (0/45/90/-45), biaxial karbon elyaf (-45/45) ve cam ile karbon elyaflardan oluşan biaxial hibrit elyaf (-45/45) takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARIM) kullanılmıştır. Önceden kesilmiş ve katlanmış elyafların birbiri üzerine istiflenmesi ve vakum ortamında reçinenin elyaflara emdirilmesinin ardından 80 santigrat derecede 5 saat kütleme işlemiyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Vakum destekli reçine infüzyon tekniği, kompozit yapı üretiminde, üretim sırasında uygulanan vakum sayesinde kompozit yapısal elemanlara gelişmiş mekanik özellikler kazandırması açısından avantajlıdır.

Üretilen kompozit malzemelerin aşınma testleri TE53 çok amaçlı sürtünme ve aşınma deney cihazıyla yapılmıştır. Uygulanan aşınma test yöntemi disk üzerinde blok (block on roller) yöntemidir. Test parametreleri seçiminde ASTM 137-97 (2009) standardı referans alınmıştır. Aşındırıcı disk olarak AISI 52100, 65 HRC sertleştirilmiş rulman çeliği kullanılmış ve farklı iki yüzey pürüzlülük değerlerinde ($R_a=0,16$ mikron, $R_a=0,32$ mikron), her birinden ikişer adet olmak üzere toplamda dört adet aşındırıcı disk imal edilmiştir. Her bir test numunesi için farklı parametreler altında sekiz farklı test yapılmış ve her test aşaması için testler üç kere tekrarlanarak ortalama sonuç değerleri alınmıştır. Aşınma davranışlarını uygulanan yük, kayma mesafesi, aşındırıcı disk yüzey pürüzlülüğü ve kayma hızının bir fonksiyonu olarak incelemek için ayrıca SEM analizleri de yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Polimer matrisli kompozitler, kuru kayma, aşınma, elyaf takviye, epoksi reçine, disk üzerinde blok.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOUR OF COMPOSITES IN DRY SLIDING

ABSTRACT

In this study, the wear behavior of the knitted fabric shaped biaxial glass fiber (0/90 and -45/45), triaxial glass fiber (-45/90/45), quadriaxial glass fiber (0/45/90/-45), biaxial carbon fiber (-45/45) and biaxial hybrid fiber (-45/45) composing of glass and carbon fibers and the composites with reinforced epoxy resin matrix materials were investigated experimentally. In the production of composite materials, Vacuum Assisted Resin Infusion Method (VARIM) was used. The composite material production was carried out at 80 centigrade degree during 5-hour curing process after stowing the pre-cut and folded fibers over each other and impregnating the resin inside fibers in vacuumed environment. Vacuum Assisted Resin Infusion Method has advantageous for production of the composite material due to the applied vacuum operation with respect to developing mechanical properties of the composite structural elements.

The wear tests of the produced composite materials were conducted on the multi-purposes friction and TE53 wear test unit. The applied wear test method was the block on roller method. ASTM 137-97 (2009) standard was taken as reference for selection of the test parameters. AISI 52100, 65 HRC hardened bearing steel was used as abrasive disc and four quantities of abrasive disc having two different surface roughness values ($R_a=0,16$ micron, $R_a=0,32$ micron) were produced as total. Eight different wear tests were conducted under different parameters for each test sample and average test results were used after repeating these tests for three times for the each test level. SEM analysis has been also conducted to investigate the phenomenon of wear as a function of applied load, sliding distance, the surface roughness of abrasive disc and sliding velocity.

Keywords: Polymer matrix composite, dry sliding, wear, fiber reinforcement, epoxy resin, block on roller.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xv
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Kompozitlerin Aşınma Davranışları İle İlgili Literatür Araştırması.....	2
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER.....	9
2.1 Kompozit Malzeme Tanımı.....	9
2.1.1 Matris Ve Elyafların Görevleri.....	10
2.1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları	11
2.1.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	13
2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	14
2.2.1 Matris Malzemelerine Göre Kompozitler.....	16
2.2.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	16
2.2.1.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	16
2.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	17
2.2.2 Takviye Elemanına Göre Kompozitler	17
2.2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler	17
2.2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler	19
2.2.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler	20
2.2.2.4 Karma Kompozit Malzemeler.....	20
2.3 Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri	21

2.3.1 Matris Malzemeleri.....	21
2.3.1.1 Termoset Matris Malzemeleri.....	22
2.3.1.1.1 Epoksi Reçine Matrisler.....	23
2.3.1.1.2 Polyester Reçine Matrisler.....	25
2.3.1.1.3 Vinilester Reçine Matrisler.....	25
2.3.1.1.4 Fenolik Reçine Matrisler.....	25
2.3.1.1.5 Bizmalemid Ve Poliimid Reçine Matrisler.....	26
2.3.1.2 Termoplastik Matris Malzemeleri.....	27
2.3.2 Elyaf (Fiber) Malzemeleri.....	29
2.3.2.1 Cam Elyaf lar.....	30
2.3.2.2 Karbon Elyaf lar.....	31
2.3.2.3 Aramid Elyaf lar.....	31
2.3.2.4 Bor Elyaf lar.....	31
2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	32
2.4.1 El Yatırma Yöntemi.....	33
2.4.2 Püskürtme Yöntemi.....	33
2.4.3 Elyaf Sarma Yöntemi.....	34
2.4.4 Profil Çekme (Pultruzyon) Yöntemi.....	34
2.4.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi.....	35
2.4.6 Savurma (Santrifüj) Kalıplama Yöntemi.....	36
2.4.7 Vakum Torbalama (Vacuum Bagging) Yöntemi.....	36
2.4.8 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon (VARIM) Yöntemi.....	37
2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	37
2.5.1 Hava Aracı Ve Askeri Alanda Uygulamalar.....	38
2.5.2 Uzay Alanında Uygulamalar.....	39
2.5.3 Otomotiv Endüstrisinde Uygulamalar.....	40
2.5.4 Spor Araçları Uygulamaları.....	41
2.5.5 Denizcilik Uygulamaları.....	42
2.5.6 Altyapı Uygulamaları.....	42
2.5.7 Diğer Uygulama Alanları.....	43

BÖLÜM ÜÇ – SÜRTÜNME VE ÇEŞİTLERİ..... 45

3.1 Sürtünme	45
3.2 Sürtünme Çeşitleri.....	46
3.2.1 Kuru Sürtünme	46
3.2.2 Sınır Sürtünmesi	48
3.2.3 Sıvı Sürtünmesi.....	49
3.2.4 Yuvarlanma Sürtünmesi	49

BÖLÜM DÖRT – AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ 51

4.1 Aşınma	51
4.2 Aşınma Çeşitleri.....	51
4.2.1 Adezyon Aşınması.....	51
4.2.2 Abrazyon Aşınması	52
4.2.3 Yorulma Aşınması (Pitting).....	53
4.2.4 Oksidasyon (Mekanik Korozyon) Aşınması	54

BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMA..... 56

5.1 Çalışmanın Amacı	56
5.2 Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	56
5.3 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi	57
5.4 Deneyin Yapılışı.....	66

BÖLÜM ALTI – DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME 71

6.1 Aşınma Analizi.....	71
6.2 SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi.....	80

BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR	94
7.1 Sonuç Ve Öneriler	94
KAYNAKLAR	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elyaf ve reçine kullanarak bir kompozit malzeme oluşturma	9
Şekil 2.2 Sürekli elyaf ve kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler	10
Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	15
Şekil 2.4 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi	18
Şekil 2.5 Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi	19
Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzemelerin şematik gösterimi	20
Şekil 2.7 Polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan çeşitli matrislerin performanslarının karşılaştırılması	27
Şekil 2.8 Çeşitli takviye elyafları için çekme gerilmesi-şekil değiştirme diyagramı	32
Şekil 2.9 El yatırma yönteminin şematik gösterimi	33
Şekil 2.10 Püskürtme yönteminin şematik gösterimi	33
Şekil 2.11 Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi	34
Şekil 2.12 Profil çekme yönteminin şematik gösterimi	35
Şekil 2.13 RTM yönteminin şematik gösterimi	35
Şekil 2.14 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi	36
Şekil 2.15 Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi	37
Şekil 2.16 Gizli eylem hava aracı (hayalet uçak)	38
Şekil 2.17 Elyaf takviyeli kompozitlerin Airbus 380 uçağında kullanımı	39
Şekil 2.18 Hazır kalıplama (SMC) yöntemiyle üretilen kamyon motoru külbütör kapağı	40
Şekil 2.19 Formula 1 yarışa arabalarındaki karbon elyaf takviyeli epoksi süspansiyon ve vites kutusu	41
Şekil 2.20 Karbon elyaf takviyeli epoksiden imal edilmiş bisiklet kadrosu	41
Şekil 2.21 Cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit köprü yapısı	42
Şekil 2.22 Kompozit kaymalı yataklar	43
Şekil 2.23 Deniz dibi tarama aracında kullanılan kompozit pervane mili kaymalı yatakları	44
Şekil 2.24 Bisiklette kullanılan kompozit kaymalı yatak uygulaması	44
Şekil 3.1 Sürtünme çeşitleri	45

Şekil 3.2 Sürünmeli düzlemde harekette serbest cisim diyagramı	46
Şekil 3.3 Kuru sürtünme haline yüzeylerin durumu	47
Şekil 3.4 Mikro kaynakların oluşumu	48
Şekil 3.5 Madensel yüzeylere bağlanan polar moleküller	48
Şekil 3.6 Yuvarlanma sürtünmesi mekanizması	49
Şekil 4.1 Kam mili üzerinde zamanla oluşmuş adezyon aşınması	52
Şekil 4.2 Mil üzerinde zamanla oluşmuş adezyon aşınması	53
Şekil 4.3 Sonsuz vida karşılık dişlisinde yorulma aşınması	54
Şekil 5.1 Elyafların katmanlarının basit dizilim şekilleri	57
Şekil 5.2 TE53 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazının numune bağlama aparatı ve üzerine bağlanmış numune	58
Şekil 5.3 Elyafların kesim işlemi	58
Şekil 5.4 Beşe katlanan elyaf yapı	59
Şekil 5.5 Vakum destekli reçine infüzyon tezgahı.....	59
Şekil 5.6 Üretim için yeterli ayırıcı filmin kesilmesi	60
Şekil 5.7 Tezgah tablası ve üzerindeki ayırıcı film çevresine sızdırmazlık macununun uygulanması	60
Şekil 5.8 Ayırıcı filmin üzerine önceden kesilip katlanan, altı farklı tip elyafın yeterli kalınlığa ulaşınca kadar istiflenmesi	61
Şekil 5.9 İstiflenen elyafın üzerine reçinenin vakum torbasına yapışmasını önleyen soyma kumaşının (peel ply) serilmesi	61
Şekil 5.10 Soyma kumaşının üzerine reçine dağılımını sağlayan reçine dağıtıcı filenin, spiral reçine ve vakum borularıyla boru bağlantılarının ve havalandırıcı peçetelerin yerleştirilmesi	62
Şekil 5.11 Tezgah tablasının üzerine önceden yapıştırılan sızdırmazlık macunu ile tüm elemanlarının üzerine serilen vakum torbasının yapıştırılması	62
Şekil 5.12 Sistemin sızdırmazlığının kontrolü için vakuma tabi tutulması	63
Şekil 5.13 Vakum desteğiyle epoksi reçinenin elyaflara emdirilerek, vakum çıkışına doğru reçinenin ilerleyişi.....	64
Şekil 5.14 Elyafların tamamen ıslanması neticesinde 80°C de 5 saat kürleme işlemine tabi tutularak üretimin tamamlanması.....	64

Şekil 5.15 Üretilen plakaların iki yüzeyinin birbirine paralel olması ve 12,7 mm sabit kalınlığın elde edilmesi için işlenmesi	65
Şekil 5.16 İşlenen plakaların 12,7 mm en ve 12,7 mm boyunda küp şeklinde kesilmesi.....	65
Şekil 5.17 Üretilen tüm kompozit malzemelerin 12,7x12,7x12,7 mm küpler şeklinde kesilmesi ve torbalara ayrılması.....	66
Şekil 5.18 TE53 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı.....	67
Şekil 5.19 AISI 52100 malzemedan imal edilen 65 HRC sertliğe sahip aşındırıcı disk	68
Şekil 5.20 Numunelerin ağırlıklarının hassas terazi ile ölçülmesi.....	69
Şekil 5.21 Numunelerin kodlanması	69
Şekil 6.1 Altı farklı kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları (P=67 N, V=1 m/s, Ra=0,16 µm)	71
Şekil 6.2 Cam elyafı kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kaybı değişimleri (P=67 N, V=1 m/s, Ra=0,16 µm).....	73
Şekil 6.3 Altı farklı kompozit malzemenin farklı yük ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P ₁ =67 N, P ₂ =92 N, V=1 m/s, Ra=0,16 µm).....	74
Şekil 6.4 Altı farklı kompozit malzemenin farklı hız ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=67 N, V ₁ =1 m/s, V ₂ =2 m/s, Ra=0,16 µm)	75
Şekil 6.5 Altı farklı kompozit malzemenin farklı pürüzlülük değeri ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=67 N, V=1 m/s, Ra ₁ =0,16 µm, Ra ₂ =0,32 µm).....	76
Şekil 6.6 Altı farklı kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları (P=67 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm)	77
Şekil 6.7 Altı farklı kompozit malzemenin farklı hız ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=92 N, V ₁ =1 m/s, V ₂ =2 m/s, Ra=0,32 µm)	78
Şekil 6.8 Altı farklı kompozit malzemenin farklı pürüzlülük değeri ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=92 N, V=1 m/s, Ra ₁ =0,16 µm, Ra ₂ =0,32 µm).....	79
Şekil 6.9 Au/Pd kaplama öncesi kompozit numunelerinin aşınma yüzeylerinin görünüşü.....	81

Şekil 6.10 Au/Pd kaplama sonrası kompozit numunelerinin aşınma yüzeylerinin görünüşü	81
Şekil 6.11 CX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X25 büyütme)	82
Şekil 6.12 CX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme)	82
Şekil 6.13 CX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme)	83
Şekil 6.14 CX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X2000 büyütme)	84
Şekil 6.15 GCX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	85
Şekil 6.16 GCX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X2000 büyütme)	86
Şekil 6.17 GCX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	86
Şekil 6.18 GL numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme)	87
Şekil 6.19 GL numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	88
Şekil 6.20 GL numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X25 büyütme)	88

Şekil 6.21 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	89
Şekil 6.22 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme)	90
Şekil 6.23 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme)	90
Şekil 6.24 GX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme)	91
Şekil 6.25 GX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	92
Şekil 6.26 GY numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme)	93
Şekil 6.27 GY numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme)	93

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Bazı mühendislik malzemelerinin karakteristik özellikleri	13
Tablo 2.2 Çeşitli matris malzemelerinin kullanım yerleri	22
Tablo 2.3 Termoset reçinelerin bazı temel özellikleri	23
Tablo 2.4 Genel kullanımdaki termoplastik reçinelerin özellikleri	28
Tablo 2.5 Termoset ve termoplastiklerin maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları .	28
Tablo 2.6 Bazı elyafların elastisite modülleri ve dayanımları	29

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Giriş

Bilim ve teknolojinin hızla ilerlediği günümüzde, her geçen gün yeni ve üstün özelliklere sahip malzeme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyaçlar, kompozit malzemelerin geliştirilmesi için itici güç oluşturmuştur. Son yıllarda elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Bu malzemelerin yüksek özgül mukavemet ve rijitliğe sahip olması uzay sanayi, otomotiv ve kimya endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmasını sağlamıştır. Ayrıca bu malzemelerden dişli, kam, tekerlek, fren ve debriyaj balataları, yataklar, muylular gibi aşınmaya maruz kalabilecek parçaların imali de gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Yasar ve Arslan, 2000).

Eğer iyi bir şekilde tasarlanırsa, komponentlerinde ya da bileşenlerinde genellikle en iyi özellikler göstermesi kompozit malzemelerin avantajlarıdır. Kompozit malzeme oluşumuyla geliştirilebilen bazı özellikler şöyle sıralanabilir:

- Mukavemet,
- Rijitlik,
- Korozyon direnci,
- Aşınma direnci,
- Estetik görünüm,
- Ağırlık,
- Yorulma ömrü,
- Sıcaklıkla ilgili özellikler,
- Isı yalıtımı,
- Isı iletkenliği,
- Akustik iletkenlik (Jones, 1999).

Kompozit malzemeler konvansiyonel malzemelerle kıyaslandığında bu malzemelerin avantajları özellikle dayanım / yoğunluk ve elastisite / yoğunluk oranları karşılaştırıldığı zaman ortaya çıkmaktadır (Staab, 1999). Bu durumda,

yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olan kompozit malzeme aynı zamanda düşük ağırlığa sahiptir.

Sürtünme ve aşınmayı azaltmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi yağ gibi sıvı yağlayıcılar kullanmaktır. Bu sayede kayma yüzeyleri, düşük kesme mukavemetine sahip bir film tabakası ile ayrılır. Sıvı yağlayıcılar bozulma ve/veya kalıntılardan dolayı sınırlı ömre sahiptirler ve ara sıra değiştirilmesi gereklidir. Dahası, bu tip bir yağlama ile ilgili bazı dezavantajlar vardır: (a) genellikle filtre, pompa ve soğutma sistemi gerektirir; (b) kısmen kullanılmış yağlayıcıların ve kısmen gazların veya partiküllerin sızıntı ve emisyonlarından dolayı imha edilmesinin çevreye olumsuz etkileri vardır; (c) üretimleri sırasında yiyecek ve tekstil ürünleri gibi ürünler kirlenebilir. Bu olumsuz yanlar ve kısıtlamalardan dolayı katı yağlayıcılar ve kendinden yağlama özelliğine sahip malzemelere ilgi vardır. Polimer matrisli kompozitler yağ ile yağlamalı metal malzemeler yerine kendinden yağlamalı malzemeler olarak bariz adaydırlar.

Polimerler genel olarak metaller ve seramiklere kıyasla bazı sınırlamalara yol açan zayıf malzemelerdir. Bu dezavantajı aşmak için farklı tipte takviyeler örneğin çoğu kez elyaf takviyesi uygulanmaktadır. Bu takviye uygulaması, genel anlamda mekanik özellikleri iyileştirmek için ve bundan başka birçok durumda iyileştirilmiş aşınma ve sürtünme kontrolünü geliştirmek için yapılmaktadır (Larsen, Andersen, Thorning, Vigild, 2008).

Aşınma, makine dizaynında çok önemli bir yere sahiptir. Birbirine temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise makinenin işleme hassasiyetinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, makine parçalarının çalışması sırasında aşınmanın meydana gelmesi istenilmeyen bir durumdur.

1.2 Kompozitlerin Aşınma Davranışları İle İlgili Literatür Araştırması

Kompozit malzemelerin özellikleri konusunda çok sayıda bilimsel çalışma yapılmıştır. Halen bu konuda araştırmalar devam etmektedir. Aşağıda yapılan

literatür çalışmasında polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin aşınmaya karşı davranışları incelenmiştir.

Epoksi matrisli cam elyaf dokuma, karbon/aramid hibrit dokuma, PTFE partikül ve CuO nano partikül takviyeli kompozit malzemelerin farklı temas basınçları ve kayma hızlarındaki aşınma performansları incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç, farklı şekillerde takviye edilmiş malzemelerin hafif kayma koşulları ile ağır kayma koşulları arasındaki aşınma performanslarının sistematik olarak karşılaştırılmasıdır. Sonuç olarak, cam elyaf dokuma yerine karbon/aramid hibrit dokuma elyafı kullanılmasıyla sürtünme katsayısı ortalama %35 azaldığı ve karbon/aramid hibrit dokuma elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma oranı, hafif temas basıncı ve kayma hızı şartlarında, cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin aşınma oranından ortalama 22 kat daha düşük çıktığı görülmüştür. Buna karşın, karbon/aramid takviyesi test numunesinin en sonunda tamamen bozulmasına sebep olacak kademeli olarak artan bir sürtünme kuvvetine sebep olurken, cam elyaf takviyesi nispeten kararlı bir davranış sergilediği sonucu elde edilmiştir. Epoksi reçine ve karbon/aramid elyaf takviyesi içerisine mikro boyutta PTFE partikülleri ve nano boyutta CuO partikülleri ilave edilerek üretilen kompozit numunelerle yapılan deneylerde, sürtünmede farklılık olmadığı ancak aşınmada küçük iyileşmeler olduğu görülmüştür. Mikro boyutta PTFE partikülleri saf epoksi reçine içine ilave edilerek teste tabi tutulmuş ve bunun sonucunda aşınma oranında artış, sürtünme katsayısında bir azalış görülmüştür. (Larsen, Andersen, Thorning, Vigild, 2008).

Poliamid 66 esaslı kısa cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yuvarlanma-kayma temasındaki sürtünme ve aşınma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Aramid elyaf takviyesi matris malzemesinin sürtünmesini önemli ölçüde değiştirmedeği sonucu bulunmuştur. Ancak, karbon elyaf ve cam elyaf takviyesi sürtünme katsayısını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Bu üç takviye durumunda da takviyesiz polimere göre aşınma oranında 10 katın üzerinde bir artış görülmüştür. Takviyenin en önemli yararı düşük sürtünme katsayısı ile açığa çıkan sıcaklıkta düşüş göstermesidir (Kukureka, Hooke, Rao, Liao, Chen, 1999).

Cam ve karbon elyaf kumaşı takviyeli vinilester kompozitlerinin sürtünme ve kuru kaymadaki aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri, block-on-ring test yöntemi kullanılarak kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada asıl amaç, vinilester reçineli kompozitlerde farklı tipteki elyaf kumaşlarının kuru kayma şartlarında aşınma davranışına olan etkisini incelemektir. Deneysel çalışma saf vinilester, cam-vinilester ve karbon-vinilester kompozitlerinin farklı kayma hızları, uygulama yükleri ve sabit kayma mesafelerinde yapılmıştır. Sonuç olarak, iki yönlü kumaş takviyeli vinilester kompozitlerinin sürtünme ve aşınma karakteristikleri kumaş malzemeye bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Karbon-vinilester kompoziti farklı yük ve kayma hızlarında daha düşük sürtünme göstermiş ve bu nedenle yatak uygulamaları için uygun olabileceği vurgulanmıştır. Spesifik aşınma oranı, karbon kumaş takviyeli vinilester kompozitlerinde cam kumaş takviyeli vinilester kompozitlerine göre daha düşük olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu da karbon kumaş takviyesi, sürtünme katsayısını düşürmesinin yanında vinilester kompozitinin aşınma direncini artırdığını göstermektedir. Farklı yük ve kayma hızlarındaki bu aşınma verileri SEM içyapı fotoğrafları kullanılarak doğrulanmıştır. Aşınma prosesleri süresince, her iki adheziv ve abrasif aşınma mekanizmalarının önemli ve etkili olduğu görülmüş, SEM görüntülerinde elyaf kırılması, ara yüzey ayrılması, matris kopması, ara yüzeyde ince film oluşması vb. özellikler gözlenmiştir (Suresha, Kumar, Seetharamu, Kumaran, 2010).

Yapısal uygulamalarda sıkça kullanılan elyaf takviyeli polipropilen (PP) kompozitinin, elyaf takviyesi ile tribolojik özelliklerinin ne kadar iyileştirilebileceği deneysel olarak araştırılmıştır. Uygun bir elyaf takviyesi ile polipropilenin tribo-mekanik özellikleri önemli derecede etkilenebileceği görülmüştür. Sonuç olarak, standart plastik malzeme olarak kullanılan polipropilenin mekanik ve tribolojik özellikleri uygun bir cam elyaf takviyesi ile geliştirilebileceği elde edilmiş ve çok daha pahalı olan poliamid veya poliasetal gibi termoplastik malzemeler yerine polipropilenin kullanılabilmesi ön görüşünde bulunulmuştur. Bunlara ilave olarak, cam elyaf takviyesinin olumlu etkisi hipotezi, mühendislik tasarımlarında kullanılacak esnek değerlerle ölçülmüş, ancak araştırmanın mevcut durumunda bu tekstil esaslı Polipropilen kompozitlerinin kaymalı yataklarda kullanılmaması

bariz bir biçimde tavsiye edilmektedir (Hufenbach, Stelmakh, Kunze, Böhm, Kupfer, 2012).

Cam elyaf örgülü kumaş-epoksi reçineli ve cam elyaf-polyester reçineli kompozit malzemelerde reçine içeriğinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, block-on-shaft aşınma test düzeneği kullanılarak farklı yük ve hızlar altında, kuru kayma şartlarında, bu etkinin deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Farklı kayma mesafeleri sonunda ağırlık kayıpları ölçülmüş ve aşınma, ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir. Genel olarak, cam elyaf-epoksi reçineli kompozit malzemeler cam elyaf-polyester reçineli kompozit malzemelerle kıyaslandığında daha yüksek dayanım ve minimum aşınma gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Ek olarak, aşınma yüzeylerini incelemek ve aşınma analizi sonuçlarını doğrulamak için taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Sonuç olarak, elyaf dağılımı 500 gr/m² olan cam elyaf takviyeli kompozit malzemede, elyaf dağılımı 425 gr/m² olan kompozite göre daha fazla aşınma görülmüştür. Cam elyaf örgülü kumaş-epoksi reçineli kompozit numunelerindeki aşınma, tüm hız ve yüklerde, cam elyaf-polyester reçineli kompozit malzemedeki aşınmadan daha az olduğu sonucu elde edilmiştir. Genel olarak tüm kompozit numunelerinde, uygulanan yük arttıkça, artan kayma mesafelerinde ve 0,39 m/s sabit hızda, ağırlık kaybı arttığı görülmüştür (Pıhtılı, 2009).

Sürekli karbon elyaf takviyeli (hacimce %80) yüksek performanslı termoplastik polieterimid matrisli kompozitin, farklı elyaf yönlenme açılarının (0°, 30°, 45°, 60° ve 90°) fonksiyonu olarak değişik mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi konusunda çalışılmıştır. Yükleme doğrultusuna göre artan elyaf yönlenme açıları ile elastisite modülü, poisson oranı, tokluk ve % şekil değiştirme değerlerinde azalış görülmüştür. Fiberlerin yönlenme açısı 45° olduğu durumda en yüksek düzlem içi kayma modülü elde edilmiştir. Kompozitlerdeki elyafların 0° konumlarında neredeyse tüm özelliklerin en iyi olduğu görülmüştür. Genel olarak, tribolojik olarak abrasif aşınma modunda farklı yük ve elyaf doğrultularında sürtünme katsayısı (μ) ve spesifik aşınma oranı (K_0) yük ile azaldığı görülmüştür. 0° elyaf yönlenmesi için nispeten düşük spesifik aşınma oranı (K_0) gözlenirken, 90°

elyaf oryantasyonu (yükleme doğrultusuna dik) neredeyse üç kat daha yüksek aşınma oranı gösterdiği tespit edilmiştir (Sharma, Rao, Bijwe, 2010).

Cam elyaf takviyeli kompozit ve sade polyester reçinenin aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, block-on-shaft aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Numuneler 500 rpm ve 700 rpm hızlarda ve 500 g ve 1000 g iki farklı yükler altında aşınma testine tabii tutulmuştur. Deneylerdeki aşınma, ağırlık kaybı olarak belirlenmiştir. Sekiz farklı kayma mesafesindeki ağırlık kaybı ölçülmüş ve numunelerin SEM fotoğrafları çekilerek aşınma davranışları araştırılmıştır. Sonuç olarak, cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin aşınma dirençlerinin sade polyester malzemeye göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin aşınma davranışları üzerinde uygulanan yükün, hıza göre daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Uygulanan yük ile birlikte artan sıcaklık sebebiyle numune yüzeyinde gevrek tabaka kalınlığı artmış, bu tabakaların numune yüzeyinden koptuğu görülmüştür. Kopan bu parçaların sebep olduğu shaft ile numune yüzeyi arasındaki abrasif ortam etkisiyle aşınmanın arttığı tespit edilmiştir (Pıhtılı, Tosun, 2002).

Kauçuk ya da oksit partikülleri takviye edilmiş cam-epoksi kompozitinin kayma aşınma karakteristikleri block-on-roller test konfigürasyonu kullanılarak araştırılmıştır. Kütle kaybı, farklı kayma hızları ve uygulama yükleri için kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Düşük yüklerde, oksit dolgulu kompozit malzeme daha düşük aşınmaya sahip iken, yüksek yüklerde kauçuk dolgulu kompozit malzemenin daha düşük aşınmaya sahip olduğu tespit edilmiş. Bu çalışmada ayrıca, yüksek yük ve kayma hızlarında aşınan yüzey özelliklerinde ara yüzey ayrılması, fiberlerin kırılma eğilimi, matris kaybının yanı sıra iki farklı elyafta döküntü görülmesi gibi değişiklikler meydana geldiği görülmüştür (Kishore, Sampathkumaran, Seetharamu, Vynatheya, Murali, Kumar, 2000).

Sürekli cam elyaf (E-camı) takviyeli polyester matrisli, sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemenin elyaf hacim oranı ve elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkileri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel doğrultuda ve %15 elyaf hacim oranında elde edilmiştir.

Kayma hızı ve yüzey basıncının artmasıyla, sürtünme katsayısı ve özgül aşınma hızının azaldığı tespit edilmiş. Elyaf hacim oranı ve elyaf yönlenmesindeki değişimlere bağlı olarak numunelerin aşınma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopunda (SEM) fotoğrafları çekilmiş ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Sonuç olarak, sürtünme katsayısı, farklı elyaf konumları için farklı çıkmıştır. Anti-paralel konumda aşınan matrisin elyaf üzerini kapatması yağlama etkisi yaptığından sürtünme katsayısı daha küçük çıktığı tespit edilmiştir. Elyaf dik konumdayken numune yüzeyinde aşırı ısınma sonucu kömürleşme meydana gelmiş, bu durumun karşı yüzeyde polimer filmi oluşmasını engellediği ve sürtünme katsayısının yüksek çıkmasına sebebiyet verdiği görülmüştür. Paralel konumda ise sürtünme daha ziyade elyaflarla karşı yüzey arasında gerçekleştiği, matrisin yağlama etkisi daha az olduğundan sürtünme katsayısı anti-paralel konuma göre daha yüksek çıktığı sonucu elde edilmiştir. Uygulanan test şartlarında en iyi aşınma dayanımı elyaflara paralel konumda elde edildiği belirlenmiş, bunun nedeni karşı yüzey tarafından çekmeye zorlanan elyafların çekme mukavemetinin fazla olması sebebiyle kolayca kopmamaları ve matristen ayrılmamaları olduğu tespit edilmiştir. Anti-paralel durumda ise elyafların daha ziyade eğilmeye zorlanmaları sonucunda kırıldığı ve matristen daha kolay ayrıldığı görülmüştür. Elyaf dik konumda ise aşırı gürültü, yanma ve parçalanma gözlenmiştir. Aşınma olayının, elyaf ve matris aşınması yanında elyaf kopması ve kopan elyafların abrazif etkisi ile oluştuğu tespit edilmiştir (Yaşar, Arslan, 2000).

Dokuma 300 ve 500 cam elyaf kumaşları ve aramid elyaf kompozit malzemelerin farklı hız ve yüklerdeki aşınma davranışları deneysel block-on-shaft deney düzeneğini kullanılarak araştırılmıştır. Deneyledeki aşınma, ağırlık kaybı olarak belirlenmiş ve numunelerin SEM fotoğrafları çekilerek aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak, aşınma üzerinde numunelere uygulanan yük, kayma hızından çok daha etkili olduğu anlaşılmış, ayrıca dokuma 500 cam elyaf takviyeli kompozit malzemedeki ağırlık kaybı, dokuma 300 cam elyaf takviyeli kompozit malzemesinden çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, dokuma 500 cam elyaf takviyeli kompozit malzemedeki kumaşlar arası matris miktarı, dokuma 300 cam kumaşa göre daha fazla olmasıdır. Bu durumda aşınma, elyaf takviyelerden çok

matriste meydana gelmektedir. Aramid elyaf takviyeli kompozit malzemedeki ağırlık kaybı, dokuma cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında oldukça düşük olduğu görülmüştür. Aramid elyafların düşük sürtünme katsayısına, yüksek kayma mukavemetine sahip olması ve epoksi esaslı kompozitlerin polyester esaslı kompozitlerden daha düşük aşınma kaybı sergilemesi, aramid elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma miktarının cam elyaf takviyeli kompozitlerin aşınma miktarından daha düşük olduğu sonucunu göstermiştir (Pıhtılı, Tosun, 2002).

Cam-epoksi kompozit ile beraber grafit dolgusunun etkisinin karşılaştırmalı performansı değişken uygulama yükü, kayma mesafesi ve kayma hızı altında disk üzerinde pim aparatı kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Arttırılmış yük durumu için yüksek ağırlık kaybı elde edilmiştir. Cam-epoksi kompozitine grafit ilavesi ile daha düşük ağırlık kayıpları görülmüştür. Kompozit içerisindeki grafit miktarı arttırıldığında ağırlık kaybı değeri daha da düştüğü sonucu elde edilmiştir. Bu durumun, disk üzerinde ince bir koherent ve homojen tabakanın taşınmış olmasından dolayı ve ara fazın ayrıca yağlayıcı parçacıklar içermesi dolayısıyla üç gövdeli abrazyon aşınmasının ağırlık kaybı azalmasının sonucu olduğu belirlenmiştir (Basavarajappa, Ellangovan, Arun, 2009).

BÖLÜM İKİ

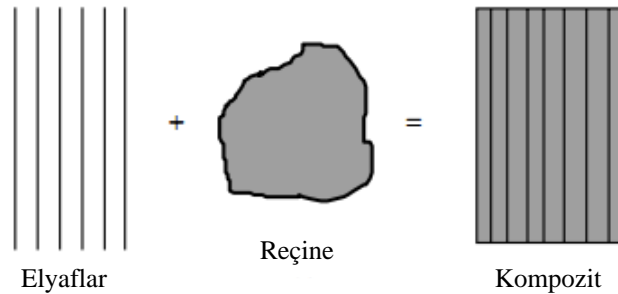
KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzeme Tanımı

Günümüzde kullanılan kompozit malzemelerin tanımı çok geneldir. Tanım olarak kompozit malzemeler; Tasarım amacına uygun olarak (ısı, mekanik, fiziksel, işletme vb.) istenilen bir veya birden fazla özelliği içeren bileşiklerin makro ve/veya mikro olarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan istenen özelliklerin baskın, istenmeyen özelliklerin yok edilmesini sağlayan malzemelere verilen genel addır.

Bu tanımlama çok geneldir ve metal alaşımları, plastik kopolimerleri, mineralleri ve ahşapları kapsayabilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler yapıyı oluşturan malzemelerin farklı moleküler düzeyde ve mekanik olarak ayrılabilir olmasından dolayı yukarıdaki malzemelerden farklıdır. Toplu olarak, yapıyı oluşturan malzemeler birlikte çalışır ancak orijinal formları aynen kalır. Kompozit malzemelerin nihai özellikleri yapıyı oluşturan bileşenlerin özelliklerinden daha iyidir (Mazumdar, 2002).

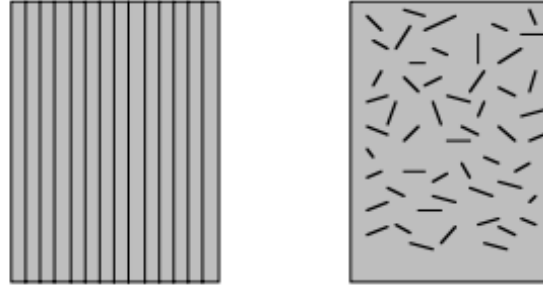
Bir kompozitin ana konsepti matris malzemeleri içermesidir. Genel anlamda, kompozit malzeme Şekil 2.1' de gösterildiği gibi bir matris reçine içerisine elyafların takviyesi ile oluşturulur (Mazumdar, 2002).



Şekil 2.1 Elyaf ve reçine kullanarak bir kompozit malzeme oluşturma (Mazumdar, 2002).

Elyaf veya dokuma kumaş takviyesi kompozite mukavemet ve bükülme direnci sağlarken, matris rijitlik ve çevre koşullarına karşı direnç verir. Takviye elyafları

sürekli uzun elyaflardan dokuma kumaşa, kısa doğranmış elyaflar ve keçe olarak farklı şekillerde bulunur. Her bir konfigürasyon farklı özellikler meydana getirir. Bu özellikler, elyafların kompozit içerisine serilme yönüne son derece bağlıdır. Yukarıdaki bütün kombinasyonlar veya sadece bir türü kompozit içerisinde kullanılabilir. Önemli olan elyafların yükü taşıdığını ve elyaf mukavemetinin en fazla elyaf eksenine boyunca olduğunu hatırlamaktır. Yük doğrultusundaki sürekli uzun elyaflar, kompozit özelliklerinin matris reçinenin kendi özelliklerinden çok daha üstün olmasına sebep olur. Şekil 2.2 'de gösterildiği gibi, kısa kırılmış aynı malzeme sürekli elyaflardan daha düşük özellikler verir (Mazumdar, 2002).



Sürekli elyaf kompozitleri

Kısa elyaf kompozitleri

Şekil 2.2 Sürekli elyaf ve kısa elyaf takviyeli kompozit matzemeler (Mazumdar, 2002).

2.1.1 *Matris Ve Elyafların Görevi*

Kompozit malzeme, plastiklerin elyaflarla güçlendirilmesi ile oluşturulur. Kompozit davranışlarının iyi bir şekilde anlaşılması için kompozit içindeki elyaf ve matris malzemelerinin rolleri hakkında iyi bir bilgi birikimine sahip olunmalıdır.

Elyafların kompozit içindeki ana görevleri;

- Yükü taşımak. Yapısal kompozitlerde yükün %70-90 elyaflar tarafından karşılanır.
- Kompozitte mukavemet, bükülmezlik, termal kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlar.
- Kullanılan elyaf tipine bağlı olarak elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı sağlar.

Matris malzemesi kompozit yapı içinde birçok görevi yerine getirir. Bunların çoğu yapının yeterli performansı için son derece önemlidir. Elyafların matris malzemesi veya bağlayıcı olmaksızın kullanımları çok azdır.

Matris malzemesinin önemli görevleri şunlardır:

- Matris malzeme elyafları bir arada tutar ve yükü elyafalara transfer eder. Bu, yapı için rijitlik ve biçim sağlar.
- Matris, elyafları izole eder böylece ayrıık elyaflar bağımsız hareket edebilir. Bu, çatlakların ilerlemesini durdurur veya yavaşlatır.
- Matris, iyi bir finiş yüzey kalitesi sağlar ve nihai ürün veya nihai ürüne yakın parçaların üretimine yardımcı olur.
- Matris, elyaf takviyelerin kimyasal saldırı ve mekanik hasara (aşınma) karşı koruma sağlar.
- Matris malzemesi seçimine bağılı olarak, süneklilik, darbe dayanımı, vb. performans karakteristikleri de etkilenmiştir. Sünek matris yapının tokluğunu artırır. Yüksek tokluk gereksinimleri için termoplastik esaslı kompozitler seçilir.
- Hata türü, kompozit malzemede kullanılan matris malzemesinin tipi ile son derece etkilendiğı kadar matris malzemesinin elyaflarla uyumluluğundan da etkilenir (Mazumdar, 2002).

2.1.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Yüksek performans ve hafif ağılık ihtiyacı duyulan uygulamalarda kompozitler rutin olarak dizayn edilmiş ve üretilmiştir. Geleneksel mühendislik malzemelerinin yerine pek çok avantaj sunarlar.

Bu avantajlar şunlardır;

- Kompozit malzemeler parça entegrasyon imkânları sağlar. Bir tek kompozit parça birkaç metalik parçanın yerini tutabilir.

- Kompozit yapılar, içine yerleştirilen sensörler yardımıyla online süreç takibi veya kullanımları süresince gözetleme imkânı sağlar. Bu özellik hava araçlarında yorulma hasarı gözetleme için kullanılır veya RTM (resin transfer molding) prosesinde reçine akışını gözlemlemede faydalı olabilir.
- Tablo 2.1 'de görüldüğü gibi kompozit malzemeler yüksek özellikli dayanıma sahiptir. Kompozitler, çeliklere oranla ağırlıkça beş kat, alüminyuma oranla ağırlıkça iki at daha fazla mukavemet sağlar.
- Kompozit malzemenin spesifik mukavemet (mukavemet / yoğunluk oranı) değeri çok yüksektir. Bundan dolayı, uçak ve otomobiller daha hızlı ve daha iyi yakıt verimliliği ile hareket eder. Kompozitlerde spesifik mukavemet değeri çelik ve alüminyum alaşımlarının genellikle 3-5 katı aralığındadır. Bu yüksek spesifik mukavemet değerinden dolayı kompozit parçalar muadillerinden daha hafiftir.
- Kompozit malzemeler için yorulma dayanımı (dayanıklılık sınırı) çok yüksektir. Çelik ve alüminyum alaşımları statik mukavemetlerinin yaklaşık % 50 sinden daha fazla yorulma dayanımı sergiler iken tek yönlü karbon / epoksi kompozitleri nerdeyse statik dayanımlarının %90 'ından fazla yorulma dayanımına sahiptirler.
- Kompozit malzemeler yüksek korozyon ve kimyasal dayanım gösterirler.
- Kompozit malzemeler çok fazla tasarım esnekliği sağlar. Örneğin, kompozit yapılarda ardışık olarak uygun malzeme ve üretim yöntemi seçimi yapılarak termal uzama katsayısı sıfır yapılabilir. Çünkü kompozitler için termal uzama katsayısı metal malzemelerinkinden çok küçüktür ve bundan dolayı kompozit yapılar iyi boyutsal kararlılık gösterirler.
- Nihai ürün veya nihai ürüne yakın parçalar kompozit malzeme ile üretilebilir. Bu özellik birkaç işleme operasyonunu ortadan kaldırılır ve böylece prosesin çevrim süresi ve maliyeti azaltılır.
- Metallerle bazen üretilmesi mümkün olmayan kompleks parçalar ve özel konturlu ayrı parçalar perçinli veya kaynaklı olmaksızın kompozit malzeme kullanılarak üretilebilir. Bu güvenilirliği artırır ve üretim zamanını azaltır.
- Kompozit malzemelerin gürültü, titreşim ve sertlik karakteristikleri metallere göre daha iyidir. Kompozit malzemeler titreşimleri azaltır.

- Uygun tasarım ve üretim tekniklerinden faydalanarak uygun maliyetli kompozit parçalar üretilebilir.
- Kompozitler için gerekli işleme maliyeti daha düşük basınç ve sıcaklık gereksinimlerinden dolayı metallere göre çok daha düşüktür.

Tablo 2.1 Bazı mühendislik malzemelerinin karakteristik özellikleri (Mazumdar, 2002).

Malzeme	Yoğunluk (ρ), (g/cc)	Çekme Modülü (E), (GPa)	Çekme Mukavemeti (σ), (GPa)	Özgül Modül (E/ ρ)	Özgül Mukavemet (σ/ρ)	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (° C)
Metaller						
Dökme Çelik, Kalite 20	7,0	100	0,1	14,3	0,0	230-300
Çelik, AISI 1045	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500-650
Sıcak Haddelenmiş						
Alüminyum 2024-T4	2,7	73	0,45	27,0	0,17	150-250
Alüminyum 6061-T6	2,7	69	0,27	25,5	0,1	150-250
Plastikler						
Naylon 6/6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75-100
Polypropilen	0,9	1,4	0,033	1,55	0,037	50-80
Epoksi	1,25	3,5	0,069	2,80	0,055	80-215
Fenolik	1,35	3,0	0,006	2,22	0,004	70-120
Seramikler						
Alumina	3,8	350	0,17	92,1	0,045	1425-1540
Mgo	3,6	205	0,06	56,9	0,017	900-1000
Kısa elyasflı kompozitler						
Cam dolgulu epoksi (%35)	1,90	25	0,30	8,26	0,16	80-200
Cam dolgulu polyester (%35)	2,00	15,7	0,13	7,25	0,065	80-125
Cam dolgulu naylon (%35)	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75-110
Cam dolgulu naylon (%60)	1,95	21,8	0,29	11,18	0,149	75-110
Tek yönlü kompozitler						
S cam / Epoksi (%45)	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80-215
Karbon / Epoksi (%61)	1,59	142,0	1,73	89,3	1,08	80-215
Kevlar / Epoksi (%53)	1,35	63,6	1,1	47,1	0,81	80-215

2.1.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemeler birçok fayda sağlamasına rağmen bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlar şunlardır;

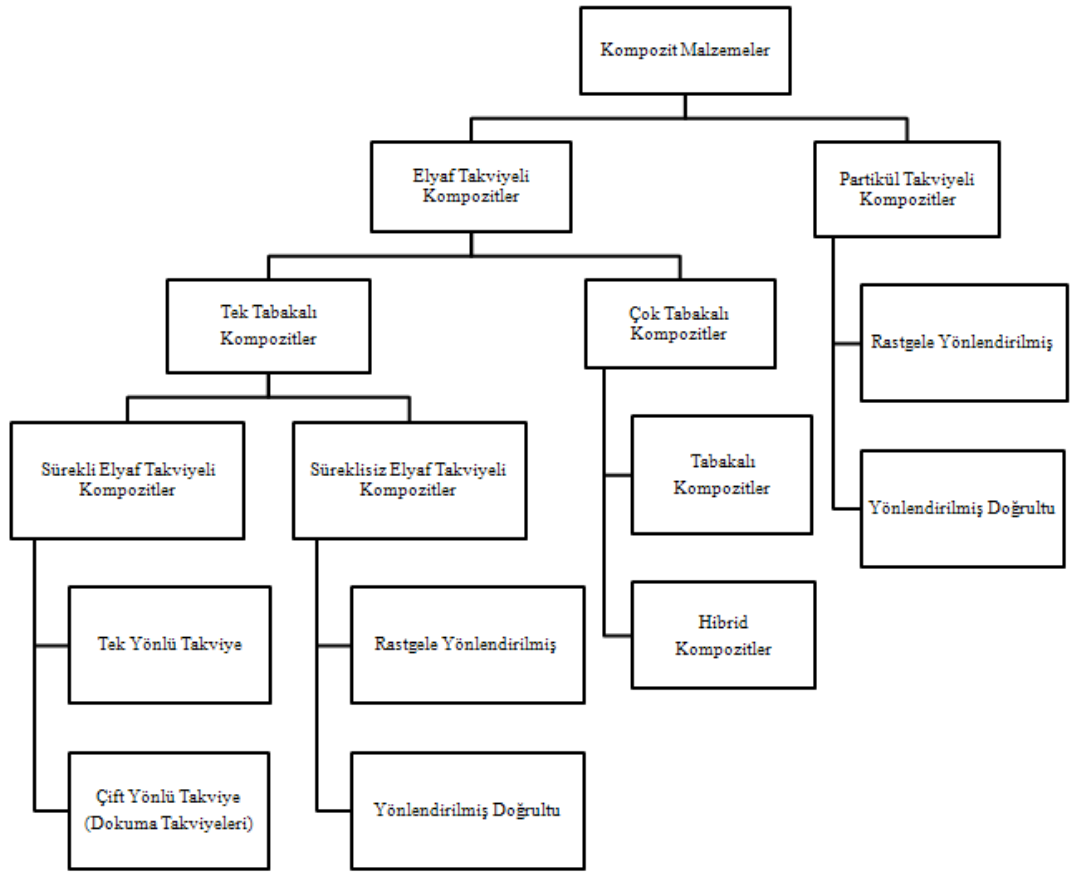
- Kompozit malzemeler için malzeme maliyeti çelik ve alüminyumla karşılaştırıldığında çok yüksektir. Ağırlık bazında, alüminyum ve çelik maliyetinin nerdeyse 5-20 kat yüksektir.
- Geçmişte, kompozit malzemeler büyük yapıların küçük miktarlarda (günde 1-3 parça) üretimi için kullanılmıştır. Yüksek hacimli üretim yöntemlerinin eksikliği kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanımını sınırlar. Son zamanlarda, yüksek üretim oranları için pultrüzyon (profil çekme), reçine transfer kalıplama (reçine enjeksiyonu) (RTM), yapısal reaksiyon enjeksiyon

kalıplama (SRIM), hazır kalıplama pestili (SMC) ve elyaf sarma (filament winding) üretim yöntemlerinde otomasyona geçilmiştir.

- Metaller için ürün tasarımının klasik yolları makine ve metal el kitapları, tasarım ve veri el kitaplarının kullanımına bağlıdır. Metaller için geniş tasarım veritabanları mevcuttur. Kompozit parçaların tasarımı için veri tabanı eksikliği sebebiyle birçok kitaba ulaşılması mümkün değildir.
- Kompozit parçaların sıcaklık direnci, matris malzemesinin sıcaklık direncine bağlıdır. Kompozitlerin büyük bölümünde polimer esaslı matrisler kullanıldığı için sıcaklık direnci plastik özellikleri ile sınırlanır. Kompozitlerin ortalama çalışma sıcaklığı $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Epoksiler, bismalemid reçineler ve polieter eter keton (PEEK) gibi yüksek sıcaklık plastikleri için en yüksek sıcaklık limiti ise $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında olabilir.
- Kompozitlerin kimyasal direnci, solventlere karşı direnci ve çevresel gerilme çatlama polimerlerin özelliklerine bağlıdır. Bazı polimerler düşük solvent direnci ve çevresel gerilme direncine sahiptir.
- Kompozitler özelliklerini ve boyutsal karalılıklarını olumsuz etkileyen nem absorbe ederler (Mazumdar, 2002).

2.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Şimdiye kadar geliştirilmiş kompozit malzemelerin çoğu mukavemet, sertlik, tokluk ve yüksek sıcaklık performansı gibi mekanik özellikleri iyileştirmek için üretilmiştir. Ortak güçlendirme mekanizmasına sahip kompozitlerin, birlikte çalışması doğaldır. Güçlendirme mekanizması, takviyenin geometrisine yüksek oranda bağlıdır. Bu nedenle, kompozit malzemeleri takviyenin temsili bir biriminin geometrisi esas alınarak sınıflandırmak oldukça uygundur. Kompozit malzemelerin yaygın olarak kabul edilen sınıflandırma şeması Şekil 2.3 'te gösterilmiştir (Agarwal ve Broutman, 1980).



Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Agarwal, Broutman ve Chandrashekhara, 2006).

Kompozit malzemeler genellikle matris malzemesine ve takviye elemanına göre sınıflandırılırlar.

Matris malzemesine göre kompozitler;

- a. Polimer matrisli kompozit malzemeler
- b. Metal matrisli kompozit malzemeler
- c. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Takviye elemanına göre matrisler;

- a. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler
- b. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
- c. Tabakalı kompozit malzemeler
- d. Karma kompozit malzemeler

2.2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozitler

2.2.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozit malzemeler, kolay işlenebilirlik, hafiflik, istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi ve yalıtkanlık gibi özelliklerinden dolayı ideal malzeme olarak endüstride kullanılırlar. Kompozit malzemelerin sıcaklık dayanımını büyük oranda matris malzemeleri tayin eder. Bu nedenle yüksek sıcaklık reçineleri havacılık uygulamalarında geniş ölçüde kullanılır.

2.2.1.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, esas yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye eleman olarak seramik ya da refrakter bir takviye elemanının kullanıldığı kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler, polimer matrisli muadilleri kadar geniş bir kullanıma sahip değildir. Polimer matrisli muadillerine göre yüksek dayanım, kırılma tokluğu ve bükülme direnci gösterirler. Polimer kompozitlere göre korozif ortamda yüksek sıcaklıklara dayanabilirler.

Metal ve metal alaşımlarının birçoğu matris malzemesi olarak kullanılabilirler ve bunlar belirli bir sıcaklık aralığının üzerinde kararlı olmak zorunda olan ve aynı zamanda reaktif olmayan takviye malzemelerine ihtiyaç duyarlar. Ancak takviye malzemesi seçimi için yol gösteren esasen matris malzemesidir.

Metal ve alaşımlarının çoğu iyi birer matris meydana getirirler. Ancak, gerçekte, düşük sıcaklık uygulamaları için seçenekler çok değildir. Sadece hafif metaller düşük yoğunluklarıyla bir avantaj sağlayarak cevap verirler. Titanyum, alüminyum ve magnezyum hava aracı uygulamalarında bilhassa faydalı popüler matris malzemeleridir.

Kompozitlerin değişik sıcaklıklarda ergime noktası, fiziksel ve mekanik özellikleri kompozitlerin çalışma sıcaklığını belirler. Birçok metal, seramik ve bileşikler matrislerin düşük ergime sıcaklıklı alaşımları ile kullanılabilir. Takviye

elemanlarının seçimi, daha çok matris malzemelerinin ergime sıcaklığındaki artışı ile sınırlanmış olur.

2.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramikler genel olarak çok güçlü iyonik bağ ve bazı durumlarda kovalent bağ sergileyen katı malzemeler olarak tanımlanabilir. Yüksek ergime noktaları, iyi korozyon dirençleri, yüksek sıcaklıklarda kararlılık ve yüksek basma mukavemeti özellikleri 1500°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kopmayan yapısal malzeme gerektiren uygulamalar için seramik matrisli malzemeleri favori hale getirir. Doğal olarak, seramik matrisler yüksek sıcaklık uygulamaları için bariz tercihtir. Seramiklerin çoğu yüksek elastisite modülü ve düşük çekme uzamasına sahiptir.

2.2.2 Takviye Elemanına Göre Kompozitler

Kompozit malzemeler genellikle kullanılan takviye elemanın tipine göre sınıflandırılırlar.

Kompozitlerin iki ana sınıfını elyaf takviyeli kompozitler ve partikül takviyeli kompozitler oluşturur. Bunların her biri kendine özgü özelliklere ve uygulama potansiyeline sahiptirler (Staab, 1999).

2.2.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, matris malzemesi içerisinde asılı bir şekilde duran ya sürekli (uzun) veya doğranmış (kristal filament) elyaflardan oluşmaktadırlar. Hem sürekli elyaflar hem de kristal filamentler (whiskers) geometrik bir bakış açısından tanımlanabilirler:

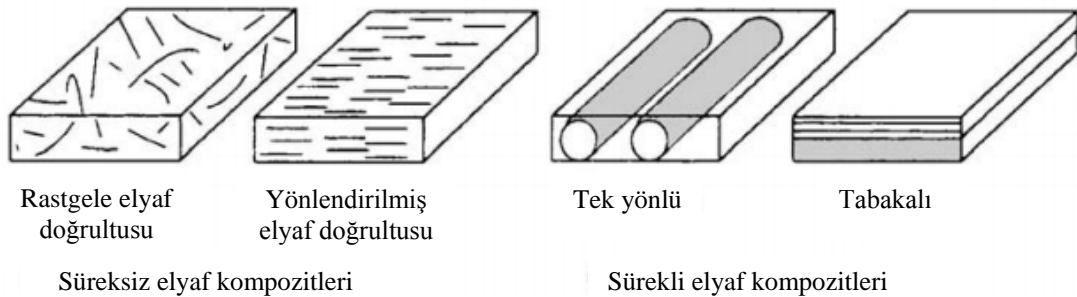
Sürekli Elyaf: Bir sürekli elyaf, çok yüksek uzunluk / çap oranına (l/d) sahip olduğundan dolayı geometrik olarak karakterize edilir. Bunlar genellikle ham

malzemeden daha güçlü ve katıdırlar. Elyaf çapları, elyafa bağlı olarak genellikle 3-200 µm aralığındadır (Staab, 1999).

Kristal Filamentler (Whiskers): Bir kristal filament genellikle kısa, küt elyaf olarak nitelendirilir. Uzunluk / çap oranı $5 < l/d < 1000$ ve daha fazlasına sahip olduğundan dolayı kapsamlı bir biçimde tanımlanabilir. Kristal filament çapları genellikle 0,02-100 µm aralığındadır (Staab, 1999).

Kompozitleri oluşturan takviye elemanları süreksiz fiberler veya kristal filamentlerden oluşuyorsa bu takviye elemanları kompozit yapı içerisinde ya rastgele dağılımlı ya da yönlendirilmiş doğrultuya sahiptir.

Süreksiz takviye elemanlarından oluşan malzeme sistemleri tek tabakalı kompozitler olarak nitelendirilir. Bu süreksizlikler anizotropik malzeme tepkisi ortaya koyabilir ancak birçok örnekte rastgele dağılımlı takviye elemanları hemen hemen izotropik kompozitler ortaya koymuştur. Sürekli elyaf kompozitleri tek tabakalı veya çok tabakalı olabilir. Tek tabakalı sürekli elyaf kompozitleri ya tek yönlü ya da dokuma olabilir iken, çok tabakalı kompozitler genellikle lamina olarak anılırlar. Sürekli elyaf kompozitinin malzeme tepkisi genellikle ortotropik' tir. Her iki tip elyaf takviyeli kompozit şematik olarak Şekil 2.4 'te gösterilmiştir (Staab, 1999).



Şekil 2.4 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi (Staab, 1999).

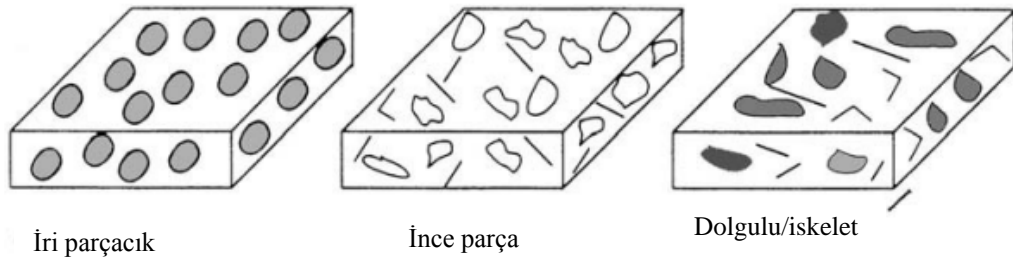
2.2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler, matris içerisinde asılı bir şekilde duran parçacıklardan oluşmasıyla karakterize edilir. Parçacıklar virtuel olarak herhangi bir şekil, boyut ve konfigürasyona sahip olabilir. Parçacık kompozitlere iyi bilinen örnekler olarak beton ve sunta verilebilir. Parçacık takviyeli kompozitlerin iki alt sınıfı vardır. Bunlar ince parça (flake) ve dolu / iskelet (filled/skeletal) 'tir (Staab, 1999).

İnce parça (flake): İnce parça kompoziti, genellikle, ince parçalar ile matris içerisinde asılı bir şekilde duran alan / kalınlık oranları geniş platformdan oluşturulur. Örnek olarak sunta verilebilir.

Dolgulu/iskelet (Filled/Skeletal): Dolgulu / iskelet kompoziti sürekli bir iskelet matrisin ikinci bir malzeme ile doldurulmasıyla oluşturulur. Örnek olarak, petekli bir gövdenin izolasyon malzemesi ile doldurulması verilebilir.

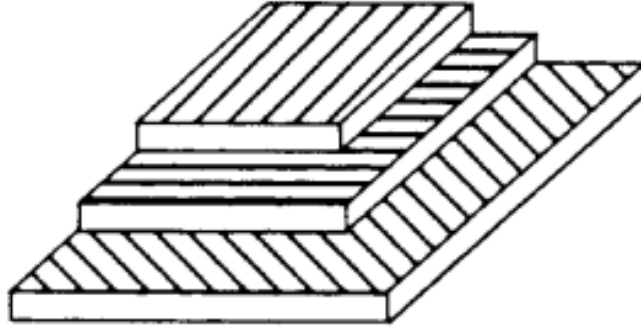
Parçacık takviyeli kompozitlerin malzeme tepkisi ya anizotropik ya da ortotropik ' tir. Bu tür kompozitler, tasarımda dayanımın önemli olmadığı birçok uygulamada kullanılır. Değişik tipte parçacık takviyeli kompozitler şematik olarak Şekil 2.5' te gösterilmiştir (Staab, 1999).



Şekil 2.5 Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi (Staab, 1999).

2.2.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, birbirine yapışık en az iki farklı malzeme katmalarından meydana gelir. Tabakalaşma (laminasyon), bileşen katmanların ve yapıştırıcı maddenin en iyi yönlerini birleştirerek daha yararlı bir malzeme elde etmek için kullanılır. Laminasyon ile sağlamlık, eğilme direnci, düşük ağırlık, korozyon direnci, aşınma direnci, ısı yalıtımı, ses yalıtımı ve benzeri özelliklerin elde edildiği önemle belirtilebilir (Jones, 1999).



Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzemelerin şematik gösterimi (Staab, 1999).

Laminasyon, Şekil 2.6 'da gösterildiği gibi istenen ürünü elde etmek için özel bir şekilde yönlendirilmiş tabaka istifidir (Staab, 1999).

2.2.2.4 Karma Kompozit Malzemeler

Karma kompozit malzemeler, yukarıda bahsedilen kompozit gruplarının kombinasyonu bir gruptur.

Muhtelif çok fazlı kompozit malzemeler fiber takviyeli, tabakalı veya parçacık takviyeli kompozitler gibi farklı sınıfların, birden çok karakteristiğini gösterirler. Örnek olarak, güçlendirilmiş beton hem parçacık takviyeli kompozit (çünkü beton, çimento karışımı bağlayıcısı içerisine ince çakıl ilavesiyle meydana getirilmiştir) hem de fiber takviyeli kompozittir (çelik takviyesi sebebiyle).

Karma kompozit malzemelerde, elyaf takviyeli malzeme katmanları, farklı doğrultularda tipik olarak yönlendirilmiş her bir katmanın elyaf doğrultuları ile birlikte yapıştırılmıştır. Bu durum, karma kompozitlerin değişik yönlerde farklı dayanım ve eğilme dayanımları göstermesine sebep olur. Bu sayede, tabakalı elyaf takviyeli kompozit malzemenin dayanım ve eğilme dirençleri, kurulacak yapısal elemanların özel tasarım gereksinimleri doğrultusunda uygun hale getirilebilir. Elyaf takviyeli tabakalı kompozitlere örnek olarak roket motor muhafazaları, tekne gövdeleri, hava aracı kanat panelleri ve gövde parçaları, tenis raketleri, golf sopaları, vb. verilebilir (Jones, 1999).

2.3 Kompozit Malzemelerin Temel Bileşenleri

2.3.1 *Matris Malzemeleri*

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matrisin görevleri; elyafları bir arada tutmak, kuvvetleri elyaflara dağıtmak, kimyasallar ve nem gibi kötü çevresel etkilere karşı bariyer oluşturmak, elyafların yüzeyini abrazyon aşınması gibi mekanik bozunmalardan korumaktır. Kompozit yapının çeki kuvveti taşıma kapasitesinde matris minör rol oynamaktadır. Ancak, kompozit malzemenin bası, tabakalar arası kayma ve ilaveten düzlem içi kayma özellikleri üzerinde matris malzemesinin seçimi majör etkiye sahiptir. Matris bası yükleri altında olası elyaf bükülmelerine karşı yanıl destek sağlamakta, böylece kompozit malzemenin basma mukavemeti büyük ölçüde etkilenmektedir. Yapılar için, tabakalar arası kayma mukavemeti, eğilme yükleri altında tasarımda dikkate alınması gereken önemli bir husus iken burulma yükleri altında düzlem içi kayma mukavemeti önemlidir. Matris ve elyaflar arası etkileşim yapılarında tasarım hasar toleransı açısından ayrıca önemlidir. Sonuç olarak, kompozit malzemedeki imalat ve hatalar, matrisin üretim karakteristiklerine son derece bağlıdır. Örnek olarak, havacılıkta kullanılan birçok kompozit malzemedeki matris olarak kullanılan epoksi polimerleri için üretim karakteristikleri, sıvı viskozitesi, kürlenme sıcaklığı ve kürlenme zamanını kapsamaktadır (Mallick, 2008).

Tablo 2.2’de ticari veya araştırma için kullanılan çeşitli matris malzemelerinin listesi verilmiştir. Bunların arasında, epoksiler, polyesterler ve vinil esterler sürekli

veya uzun elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemesi olarak çok yaygın bir şekilde kullanılan termoset polimerleridir. Esas olarak bunların kullanılma nedeni düşük viskozitelerinden dolayı üretimde kolaylık sağlamalarıdır. Termoplastik polimerleri ise kısa fiber takviyeli kompozitlerde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerde termoplastik matris için ilgi giderek artmaktadır (Mallick, 2008).

Tablo 2.2 Çeşitli matris malzemelerinin kullanım yerleri (Mallick, 2008).

Polimerik
Termoset polimerler
Epoksiler: Çoğunlukla uzay ve hava aracı uygulamalarında kullanılırlar
Polyesterler, yaygın olarak otomotiv, denizcilik, kimyasal ve elektriksel uygulamalarda kullanılırlar
Fenolikler: Kitlesel kalıplama tekniklerinde kullanılırlar
Poliimidler, polibenzimidazoller (PBI), polyphenyl quinoxaline (PPQ): yüksek sıcaklık hava-uzay uygulamaları için (sıcaklık aralığı: 250°C-400°C)
Siyanat ester
Termoplastik polimerler
Naylon (nylon6, nylon 6.6 gibi), termoplastik polyesterler (PET, PBT gibi), polikarbonat (PC), poliasetaller: enjeksiyon kalıplama şartlarında süresiz elyaflarla
Polyamit-imid (PAI), polieter eter keton (PEEK), polisülfon (PSUL), polifenilen sülfür (PPS), polietermit (PEI): sürekli elyaflarla kısmen yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur
Metalik
Alüminyum ve alaşımları, titanyum alaşımları, magnezyum alaşımları, bakır esaslı alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlar, paslanmaz çelik: yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur (sıcaklık aralığı: 300°C-500°C)
Seramik
Alüminyum oksit (Al₂O₃), karbon, silikon karbid (SiC), Silikon nitrit (Si₂N₄) : yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur

Polimer esaslı matris malzemeleri termoset ve termoplastik olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

2.3.1.1 Termoset Matris Malzemeleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerde, termoset matrisler en yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir. Bir kez kürlenmiş termoset malzemeler tekrar eritilemez veya şekil verilemezler. Kürlenme süresince termosetler, çapraz

bağlanmalar (cross-linkings) adında üç boyutlu moleküler zincirle oluştururlar. Bu çapraz bağlanmalardan dolayı moleküller esnek değildir ve yeniden eritilip şekillendirilemezler. Çok sayıdaki çapraz bağlanmalar sonucu malzeme çok daha rijit ve termal kararlılığı çok daha yüksek olur. Lastik ve diğer elastomerlerde çapraz bağlanmaların yoğunluğu çok daha azdır ve dolayısıyla esneklerdir. Termosetler yüksek sıcaklıklarda bir nebze de olsa yumuşayabilirler. Bu karakteristik, bazen filaman sarılı tüpler gibi boru şeklindeki yapılarda büküm veya eğri oluşturmak için kullanılır. Termosetler doğada kırılğan halde bulunmakta ve genellikle dolgu ve takviyenin bazı formu ile kullanılmaktadır.

Termoset reçineler, kolay işlenebilirlik ve oda sıcaklığında reçine sıvı halde olduğu için daha iyi elyaf impregnasyonu sağlarlar. Bu özelliği sayesinde iplik sarma (filament winding), profil çekme (pultrusion) ve reçine transfer kalıplama (RTM) gibi farklı proseslerde kullanılırlar. Termosetler, büyük termal ve boyutsal kararlılık, daha iyi rijitlik ve daha yüksek elektriksel, kimyasal ve solvent direnci gösterirler. Termoset kompozitlerinde en yaygın kullanılan reçine malzemeleri epoksi, polyester, vinilester, fenolik, siyanat esterleri, bizmalemidler ve poliimidlerdir. Tablo 2.3 'te yaygın olarak kullanılan termoset reçinelerin bazı temel özellikleri gösterilmiştir (Mazumdar, 2002).

Tablo 2.3 Termoset reçinelerin bazı temel özellikleri (Mazumdar, 2002).

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Katsayısı GPa (10 ⁶ psi)	Çekme Mukavemeti Mpa (10 ³ psi)
Epoksi	1,2-1,4	2,5-5,0 (0,36-0,72)	50-110 (7,2-16)
Fenolik	1,2-1,4	2,7-4,1 (0,4-0,6)	35-60 (5-9)
Polyester	1,1-1,4	1,6-4,1 (0,23-0,6)	35-95 (5,0-13,8)

2.3.1.1.1 Epoksi Reçine Matrisler. Epoksi reçineler en yaygın kullanılan reçinelerdir. Epoksiler, epoksit gruplarının içerdiği düşük moleküler ağırlıklı organik sıvılardır. Epoksit halkasında üç eleman mevcuttur: bunlar bir oksijen ve iki karbon atomudur. Epiklorhidrin ile fenollerin veya aromatik aminlerin reaksiyonu epoksileri

meydana getirir. Viskozite, darbe, bozunma, vb. özellikleri ile geniş yelpazede üretmek için sertleştiriciler, plastikleştiriciler ve katkı maddeleri ayrıca eklenir.

Epoksi matrisler diğer polimer matrislerden daha pahalı olmasına rağmen, en yaygın polimer matrisli kompozit matrisidir. Polimer matrislerin üçte ikisinden fazlası havacılık uygulamalarında kullanılır ve bunlar epoksi esaslıdır. Epoksi reçinenin en yaygın kullanılan polimer matris malzemesi olmasının ana sebepleri,

- Yüksek mukavemet
- Üretim sırasında elyafların iyi ıslanmasına olanak sağlayan ve elyafların yanlış hizalanmasını engelleyen düşük viskozite ve düşük akış oranları
- Kürlenme süresince düşük uçuculuk
- Epoksi ile takviye elemanları arasındaki bağların artış eğilimindeki büyük kayma gerilmelerini azaltan düşük büzülme oranları
- Üretim gereklilikleri ve belirli özellikleri karşılamak için yirmiden fazla kalite kullanılabilir (Kaw, 2006).

Epoksi esaslı kompozit malzemeler oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda iyi performans gösterirler. Epoksiler 200-250°F sıcaklığın üzerinde sağlıklı çalışabilir ve 400°F sıcaklığın üzerinde iyi performans sergileyebilen epoksiler de vardır. Yüksek sıcaklık ve yüksek performans epoksileri için maliyetleri artar ancak bunlar iyi kimyasal ve korozyon direnci gösterirler. Epoksiler sıvı, katı ve yarı katı formlarda olabilir. Sıvı epoksiler reçine transfer kalıplama (RTM), elyaf sarma, profil çekme, elle yatırma ve diğer kompozit üretim proseslerinde cam, karbon, aramid, bor elyaf gibi çeşitli takviye elyafları ile kullanılır. Yarı katı epoksiler vakum torbalama ve otoklav prosesleri için önceden emprenye edilmiş (prepreg) olarak kullanılır. Katı epoksi kapsülleri ise yapıştırma amacıyla kullanılır. Epoksiler, polyester ve vinilesterlerden çok daha maliyetlidir ve bu nedenle özel performansa ihtiyaç duyulmadıkça maliyet odaklı pazarlarda (otomotiv ve denizcilik gibi) kullanılmazlar (Mazumdar, 2002).

2.3.1.1.2 Polyester Reçine Matrisler. Polyester reçineler düşük maliyetli reçine sistemleridir ve çok iyi korozyon direnci gösterirler. Polyesterlerin çalışma sıcaklıkları epoksilerin çalışma sıcaklıklarından düşüktür. Polyesterler profil çekme, elyaf sarma, hazır kalıplama pestili (SMC) ve reçine transfer kalıplama (RTM) işlemlerinde geniş çapta kullanılır. Polyesterler termoset veya termoplastik reçine olabilir.

Doymamış çift fonksiyonlu organik asitler ile çift fonksiyonlu bir alkolün reaksiyona girmesiyle doymamış polyesterler elde edilir. Kullanılan asitler, maleik, fumarik, ftalik ve tereftalik asitlerdir. Alkoller ise, etilen glikol, propilen glikol, ve halojenli glikol' dür (Mazumdar, 2002).

Polyesterlerin avantajları; düşük maliyetleri, çok iyi korozyon dirençleri, kolay imal edilebilmeleri ve şeffaf yapılabilme yetenekleridir. Dezavantajları ise, çalışma sıcaklıklarının 170°F (77°C) altında olması, gevrek yapıya sahip olmaları ve kürlenme sırasında %8 kadar yüksek büzülme göstermeleridir (Kaw, 2006).

2.3.1.1.3 Vinilester Reçine Matrisler. Vinilesterler, profil çekme, elyaf sarma, hazır kalıplama pestili (SMC) ve reçine transfer kalıplama (RTM) proseslerinde geniş çapta kullanılır. Bunlar iyi kimyasal ve korozyon direnci gösterirler ve kimya endüstrisinde elyaf takviyeli polimer boru ve depoların üretiminde kullanılırlar. Otomotive ve diğer malzeme seçimi yapılırken maliyetin kritik olduğu yüksek hacimli uygulamalarda kullanılırlar. Maliyetleri epoksi reçinelerden daha ucuzdur.

Vinilesterler, doymamış organik asit ile sınırlanmış epoksid moleküllerinin kimyasal reaksiyonu ile oluşturulurlar. Vinilester moleküllerinde, polyester ve epoksilere göre çapraz bağlanmalar için daha az doymamış bölge vardır, bu sebeple kürlenmiş vinilesterler artmış tokluk ve süneklik sağlarlar (Mazumdar, 2002).

2.3.1.1.4 Fenolik Reçine Matrisler. Fenolikler, duman ve zehirlilik açısından federal havacılık idaresi (FAA) taleplerini karşılar. Hava araçlarının iç kısımlarında,

uçak bagaj kutularında ve uçak mutfak duvarlarının yanı sıra düşük maliyet, alev dayanımı ve düşük duman salımı gerektiren diğer ticari pazarlarda da kullanılır.

Fenolik reçineler, fenol (karbolik asit) ve formaldehit reaksiyonu sonucu oluşur ve bir asit veya baz ile katalize edilir. Bunların kürlenme karakteristikleri, kürlenme reaksiyonu sırasında su açığa çıkmasından dolayı, epoksi gibi diğer termoset reçinelerden farklıdır. Proses süresince bu su uzaklaştırılır.

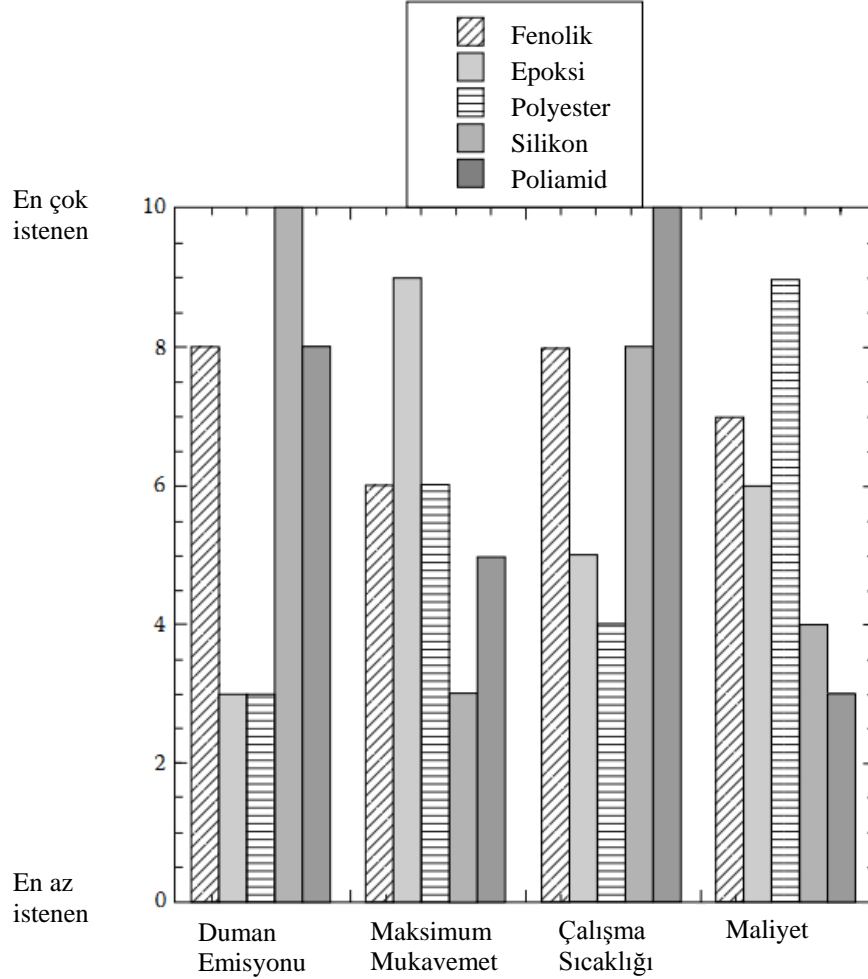
Fenolik rnler, alev dayanımlarından başka yüksek sıcaklık direnci istenen, elektriksel özelliklere ihtiyaç duyulan, aşınma direnci önem arz eden, iyi kimyasal direnç ve boyutsal kararlılık gereken çeşitli uygulamalarda yeteneklerini sergilemişlerdir.

Fenolikler, elyaf sarma, reçine transfer kalıplama (RTM), enjeksiyon kalıplama, hazır kalıplama gibi çeşitli kompozit üretim proseslerinde kullanılırlar. Kolay işlenebilirlik, dar toleranslar elde etme, azaltılmış işleme ve yüksek mukavemet sağlarlar. Bunların yüksek sıcaklık dirençlerinden dolayı egzoz parçaları, füze parçaları, manifold ara halkaları, komütatörler ve disk frenlerde kullanılırlar (Mazumdar, 2002).

2.3.1.1.5 Bizmalemid Ve Poliimid Reçine Matrisler. Bizmalemid ve poliimid reçineler hava araçları, füzeler ve elektronik devre kartları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. Bizmalemidlerin camlaşmaya geçiş sıcaklığı 550-600°F aralığında iken bazı poliimidlerin bu sıcaklık değerı 700°F ‘den daha fazladır. Bu değerler epoksi ve polyesterlerinkinden çok daha yüksektir. Dezavantajları ise, tokluk değerleri epoksi ve siyanat esterlerden daha düşüktür ve yüksek nem absorpsiyon yeteneğine sahiptirler (Mazumdar, 2002).

Görüldüğü gibi, reçine sistemlerinin her biri kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir. Özel bir sistem kullanımı uygulamaya bağlıdır. Dikkate alınacak bu hususlar mekanik dayanım, maliyet, duman emisyonu, sıcaklık farklılıkları vb. kapsar. Şekil

2.7 'de yaygın olarak kullanılan beş reçinenin duman emisyonu, dayanım, çalışma sıcaklığı ve maliyete dayalı karşılaştırmasını gösterir (Kaw, 2006).



Şekil 2.7 Polimer matrisli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan çeşitli matrislerin performanslarının karşılaştırılması (Kaw, 2006).

2.3.1.2 Termoplastik Matris Malzemeleri

Termoplastik malzemeler, genel olarak termoset malzemelerden daha sünek ve daha sert malzemelerdir. Dolgu malzemesiz ve takviye elemansız yapısal olmayan çok çeşitli uygulamalarda kullanılırlar. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve tekrarlı olarak yeniden şekillendirilip form verilebilir. Termoplastik moleküllerde çapraz bağlanma yoktur ve bu nedenle esnek ve yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastikler ya amorf yapıda ya da yarı kristal yapıda olabilirler. Tablo 2.4' te

termoplastiklerin bazı özellikleri verilmiştir. Bunların düşük eğilme dirençleri ve düşük mukavemet değerleri, yapısal uygulamalarda takviye veya dolgu elemanları kullanımını gerektirir.

Tablo 2.4 Genel kullanımdaki termoplastik reçinelerin özellikleri (Mazumdar, 2002).

Resin Material	Density (g/cm³)	Tensile Modulus GPa (10⁶ psi)	Tensile Strength MPa (10³ psi)
Nylon	1.1	1.3–3.5 (0.2–0.5)	55–90 (8–13)
PEEK	1.3–1.35	3.5–4.4 (0.5–0.6)	100 (14.5)
PPS	1.3–1.4	3.4 (0.49)	80 (11.6)
Polyester	1.3–1.4	2.1–2.8 (0.3–0.4)	55–60 (8–8.7)
Polycarbonate	1.2	2.1–3.5 (0.3–0.5)	55–70 (8–10)
Acetal	1.4	3.5 (0.5)	70 (10)
Polyethylene	0.9–1.0	0.7–1.4 (0.1–0.2)	20–35 (2.9–5)
Teflon	2.1–2.3	—	10–35 (1.5–5.0)

Tablo 2.5 Termoset ve termoplastiklerin maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları (Mazumdar, 2002).

Materials	Maximum Continuous-Use Temperature (°C)
Thermosets	
Vinylester	60–150
Polyester	60–150
Phenolics	70–150
Epoxy	80–215
Cyanate esters	150–250
Bismaleimide	230–320
Thermoplastics	
Polyethylene	50–80
Polypropylene	50–75
Acetal	70–95
Nylon	75–100
Polyester	70–120
PPS	120–220
PEEK	120–250
Teflon	200–260

Termoplastikler, özellikle yüksek sıcaklıklarda termoset reçineler kıyasla genellikle zayıf sürünme direnci gösterirler. Tablo 2.5’ te termoplastik ve termoset reçinelerin maksimum sürekli kullanım sıcaklıkları verilmiştir.

Termoplastik reçineler, birlikte kaynatılabilir ve tamir edilip, parçalarla birleştirilmesi termosetlere göre çok basittir. Termoplastik reçineler termoset sistemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek form verme sıcaklık ve basınçlarına ihtiyaç duyulur.

Termoplastik grubunu oluşturan ve en yaygın olarak kullanılan reçineler; Asetal, Poliamid (PA), Polietilen (PE), Polivinilklorür (PVC), Polipropilen (PP), Politetrafloretillen (PTFE), Akrilonitril Butadiyen Stiren (ABS), Polietereterketon (PEEK), Naylonlar, Akrilik olarak verilebilir.

2.3.2 Elyaf (Fiber) Malzemeleri

Takviye elemanları (elyaflar) kompozit malzemelerin önemli bileşenleridir ve kompozitte ihtiyaç duyulan tüm mukavemet ve rijitliği sağlar (Mazumdar, 2002).

Tablo 2.6 Bazı elyafların elastisite modülleri ve dayanımları (Mazumdar, 2002).

Fiber	Tensile Modulus Msi (GPa)	Tensile Strength ksi (MPa)
Berylium	35 (240)	189 (1300)
Boron	56 (385)	405 (2800)
Carbon: High tenacity, high modulus	10.2–87.5 (70–600)	254–509 (1750–3500)
PAN (Polyacrylonitrile)	29.2–56.9 (200–390)	305–494 (2100–3400)
Pitch (mesophase)	24.8–100.6 (170–690)	189–349 (1300–2400)
Glass: E-Glass	10.5 (72.4)	508 (3500)
S-Glass	12.4 (85.5)	68 (4600)
M-Glass	15.9 (110)	508 (3500)
Kevlar-29	8.6 (59)	384 (2640)
Kevlar-49	18.9 (128)	406 (2800)
Silica	16.5 (72.4)	482 (5800)
Tungsten	60 (414)	610 (4200)

Elyaf, takviye elemanlarının özel bir halidir ve genellikle sürekli olup 3-200 µm aralığında değişen çaplara sahiptirler. Elyaf, tipik olarak lineer elastik veya

tam plastiktirler ve genellikle ham haldeki aynı malzemeden daha kuvvetli ve daha serttirler. En yaygın olarak kullanılan elyaflar cam, karbon, kevlar (aramid) ve boron elyaflarıdır (Staab, 1999).

2.3.2.1 Cam Elyaflar

Cam elyaf, polimer metrisli kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan elyaf türüdür. Cam elyafların avantajları, yüksek mukavemet, düşük maliyet, yüksek kimyasal direnç ve iyi yalıtım özellikleri içermeleridir. Dezavantajları ise, polimerlere göre düşük elastisite modülleri, zayıf adezyon özellikleriyle, yüksek özgül ağırlık, aşınmaya karşı duyarlı olmaları (çekme mukavemetini düşüren) ve düşük yorulma dayanımlarıdır. (Kaw, 2006).

Cam elyaf üretiminde silis kumuna farklı katkı malzemeleri ilave edildiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tip cam elyaf vardır.

E Camı (Fiberglas): E camındaki “E” elektrikle ilgili olduğunu gösterir. Çünkü elektrik uygulamaları için tasarlanmıştır. Ancak dekorasyon ve yapısal uygulamalar gibi birçok farklı amaç için kullanılır.

S Camı: S camındaki “S” daha yüksek oranda silis içerdiğini ifade eder. E camıyla kıyaslandığında yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet gösterirler ve daha yüksek yorulma mukavemetine sahiptirler. Esas olarak havacılıkta ve uzay sanayisi uygulamalarında kullanılırlar.

C Camı: C camındaki “C” korozyonu ifade eder. Depolama tankları gibi kimyasal ortamlarda kullanılırlar.

R Camı: Konstrüksiyon gibi yapısal uygulamalarda kullanılırlar.

D Camı (Elektriği iletmeyen): Anten gövdeleri gibi düşük elektrik sabiti gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

A Camı: Yüksek oranda alkali içeren camdır. Bu nedenle elektrik yalıtkanlığı özelliği kötüdür. Yüzey görüntüsünü iyileştirmek için kullanılır.

2.3.2.2 Karbon Elyaf lar

Karbon elyaf lar, hava aracı parçaları gibi yüksek modül ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılırlar. Karbon fiberlerin avantajları, son derece yüksek çekme dayanımı-ağırlık oranlarının yanı sıra çekme modülü-ağırlık oranları, çok düşük termal uzama katsayısı (boyutsal kararlılık sağlar), yüksek yorulma dayanımları ve yüksek termal iletkenlikleridir. Dezavantajları ise, düşük kopma uzaması, düşük darbe direnci, yüksek elektrik iletkenliği ve yüksek maliyetli oluşlarıdır (Mallick, 2008).

2.3.2.3 Aramid Elyaf lar

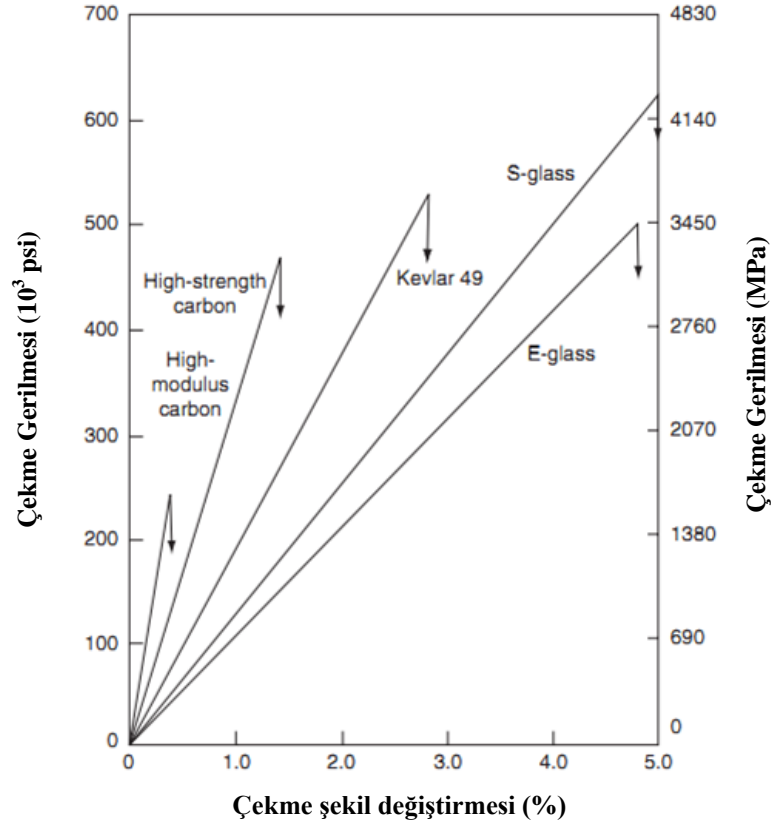
Aramid elyaf, karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojenden yapılmış aromatik organik bir bileşiktir. Düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, düşük maliyet ve yüksek darbe dayanımları aramid elyaf ların avantajlarıdır. Dezavantajları ise, düşük basınç özellikleri ve güneş ışığına maruz kaldıklarında bozulmalarıdır. Aramid fiberlerin, Kevlar 29 ve Kevlar 49 ticari adı altında iki ana tipi vardır. Kevlar elyaf larının her iki tipi benzer spesifik dayanıma sahiptir, ancak Kevlar 49 daha yüksek spesifik katılığa sahiptir. Kevlar 29 esas olarak kurşungeçirmez yelekler, halatlar ve kablolarda kullanılır. Kevlar 49 ise hava aracı sanayinde yüksek performans uygulamalarında kullanılır (Kaw, 2006).

2.3.2.4 Bor Elyaf lar

Bor elyaf ların en önemli özelliği, 379-414 GPa aralığında değişen çok yüksek çekme modüllerine sahip olmalarıdır.

Bor elyaf lar nispeten büyük çaplara bağlı olarak çok iyi burkulma direnci gösterirler. Bu da bor elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek basma dayanımına sahip

olmasına katkı sağlar. Bor elyafların en önemli dezavantajı yüksek maliyetli oluşlarıdır. Hatta karbon elyafların birçok formundan daha pahalıdır. Bu sebeple, şimdilik az sayıda kısıtlanmış hava-uzay uygulamalarında kullanılırlar (Mallick, 2008).



Şekil 2.8 Çeşitli takviye elyafları için çekme gerilmesi-şekil değiştirme diyagramı (Mallick, 2008).

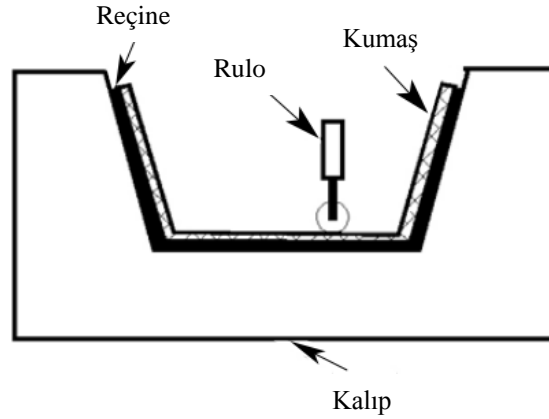
2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemi, matris malzemesine (reçine), takviye elemanın (elyaf) cinsine ve şekline, üretilecek parçanın şekline, elde edilmek istenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak belirlenir.

Bir kompozit malzemeyi üretmek için genel olarak ham madde, kalıp, ısı ve basınca ihtiyaç duyulur. Burada polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde en çok kullanılan üretim yöntemlerine yer verilecektir.

2.4.1 El Yatırma Yöntemi

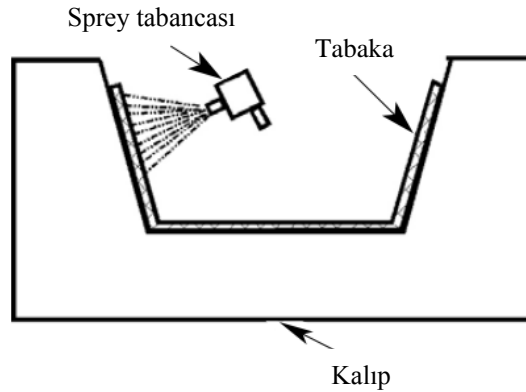
Elyaf yatırma yönteminde, sıvı reçine kalıba tatbik edilir ve üzerine takviye elemanı (elyaf) yerleştirilir. Reçineyi elyafa emdirmek için rulo kullanılır. Uygun kalınlığı elde edinceye kadar bu işleme devam edilir. Farklı tipte dokuma ve keçe takviye malzemelerin yerleştirilmesiyle kullanıcıları parça optimizasyonuna izin vermesi açısından çok esnek bir prosestir.



Şekil 2.9 El yatırma yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

2.4.2 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi el yatırma yöntemiyle benzer fakat kalıp üzerine reçine ve elyaf malzemelerinin uygulama yöntemi açısından farklıdır.

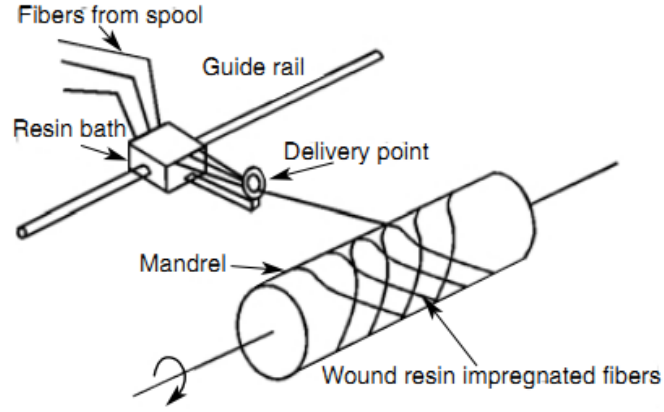


Şekil 2.10 Püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

El yatırma yöntemi, reçine ve elyaf malzemelerin elle uygulanmasından dolayı yoğun iş gücü gerektirir. Püskürtme yönteminde ise elyaf ve reçinenin uygulanması sprej tabancası yardımıyla yapılır. Bu yöntemde sprej tabancası reçine ile kırılmış elyafları kalıp üzerine biriktirir. El yatırma yöntemine göre çok daha hızlı ve ucuz bir yöntemdir.

2.4.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yönteminde, bobinlere sarılı elyaflar reçine banyosundan geçerek hareketli bir mekanizma sayesinde dönen mandrele istenen açıda sarılır.

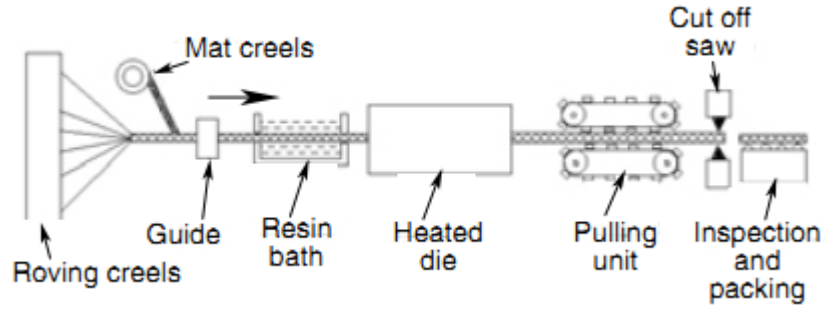


Şekil 2.11 Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

İstenilen kalınlığa ulaşıldıktan sonra işlem tamamlanmış olur. Kürleme işlemi oda sıcaklığında veya bir fırında gerçekleştirilir. Bu yöntem genellikle boru, tank veya basınçlı kap üretiminde kullanılır.

2.4.4 Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

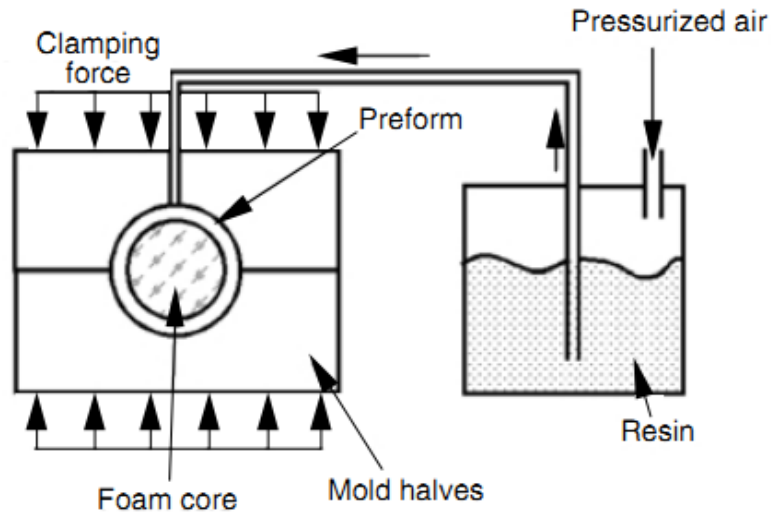
Profil çekme işlemi sürekli ve sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçirilerek sertleşmesi sağlanır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde yüksek mekanik mukavemet sağlanır. Enine yüklerin karşılanması için özel dokumalar kullanılması gerekir.



Şekil 2.12 Profil çekme yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

2.4.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunluk jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır.



Şekil 2.13 RTM yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında

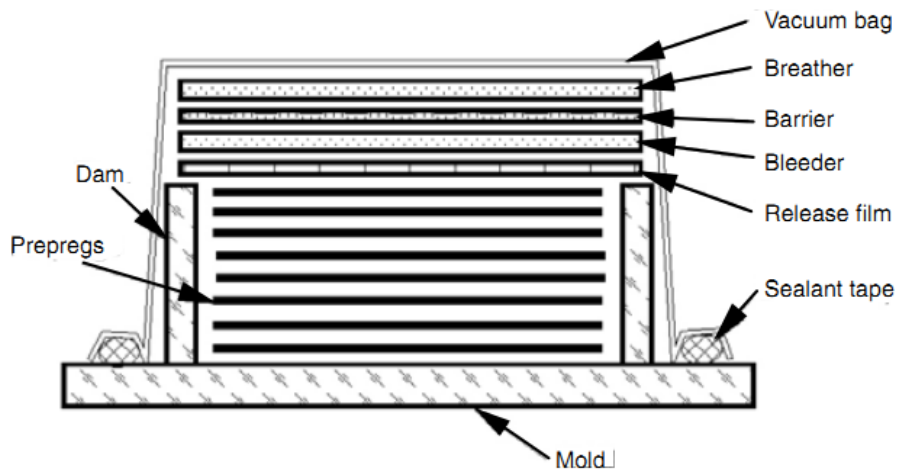
kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C 'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır (Arıcasoy, 2006, s.12).

2.4.6 Savurma (Santrifüj) Kalıplama Yöntemi

Kırılmış fiberlerle takviye edilmiş reçine kalıp içerisine dökülür ve kalıp belirli bir hızla döndürülür. Merkezkaç kuvveti etkisiyle malzeme dışa, kalıp çeperlerine doğru savrulur ve böylece parça şekillenmiş olur. Silindirik parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir.

2.4.7 Vakum Torbalama (Vacuum Bagging) Yöntemi

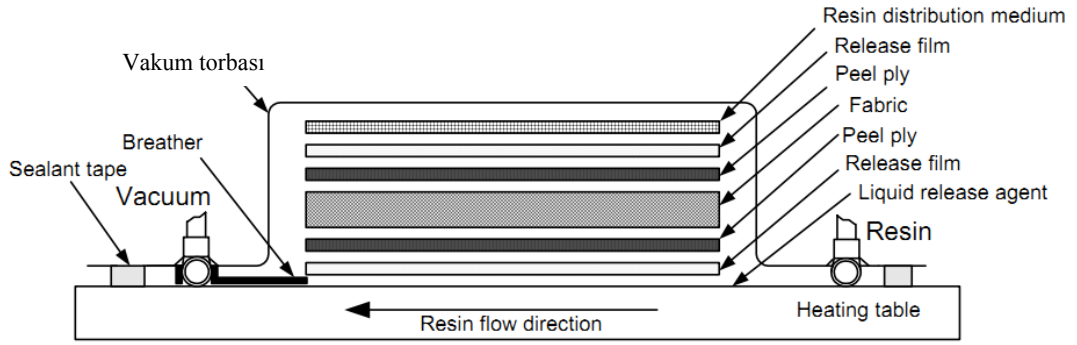
Bu kompozit üretim yöntemi el yatırma yönteminin devamı şeklinde düşünülebilir. Tek fark elle reçine sürülmüş tabakalı yapının sonrası vakum ortamına alınmasıdır. Bu yöntem özellikle epoksi ve fenolik reçine kullanımına uygundur.



Şekil 2.14 Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

2.4.8 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon (VARİM) Yöntemi

Vakum destekli reçine infüzyonu yönteminde, ilk önce kalıp yüzeyi bir ayırıcı ile kaplanır daha sonra belirli bir dizilişe sahip kuru kumaş elyaflar kalıba yerleştirilir. Elyafın üzerine ayırıcı kumaş ve reçine dağıtıcı file sıralanır. Reçine geçişi için spiral borular yerleştirilip bağlantıları yapılır. Daha sonra bunların üzerine vakum torbası serilir ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak vakum torbası kalıp yüzeyine yapıştırılır. Böylece istiflenmiş elyaflar ve diğer kullanılan elemanlar dış ortamdan izole edilir. Son işlem olarak vakum yardımıyla reçinenin istiflenmiş kuru elyaflara tamamen nüfuz etmesi sağlanır ve malzeme kürlenmeye bırakılır. Kürlenme süresi sonunda kompozit üretimi tamamlanır.



Şekil 2.15 Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi.

2.5 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ticari ve endüstriyel kullanımı çok çeşitlidir ve bunları hepsini listelemek mümkün değildir. Burada hava aracı, uzay, otomotiv, spor eşyaları, denizcilik ve altyapı gibi büyük yapısal uygulama alanları üzerinde durulacaktır. Elyaf takviyeli polimer kompozitler ayrıca elektronikte (örneğin, baskılı devre kartları), bina yapımı (örneğin, döşeme kirişleri), mobilya (örneğin, sandalye yayları), enerji sanayi (örneğin, trafo gövdeleri), medikal endüstri ve seyyar merdiven, oksijen tankları, güç aktarım şaftları gibi birçok endüstriyel ürünlerde kullanılır. Birçok mühendislik uygulamalarında elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanım potansiyeli vardır.

2.5.1 Hava Aracı Ve Askeri Alanda Uygulamalar

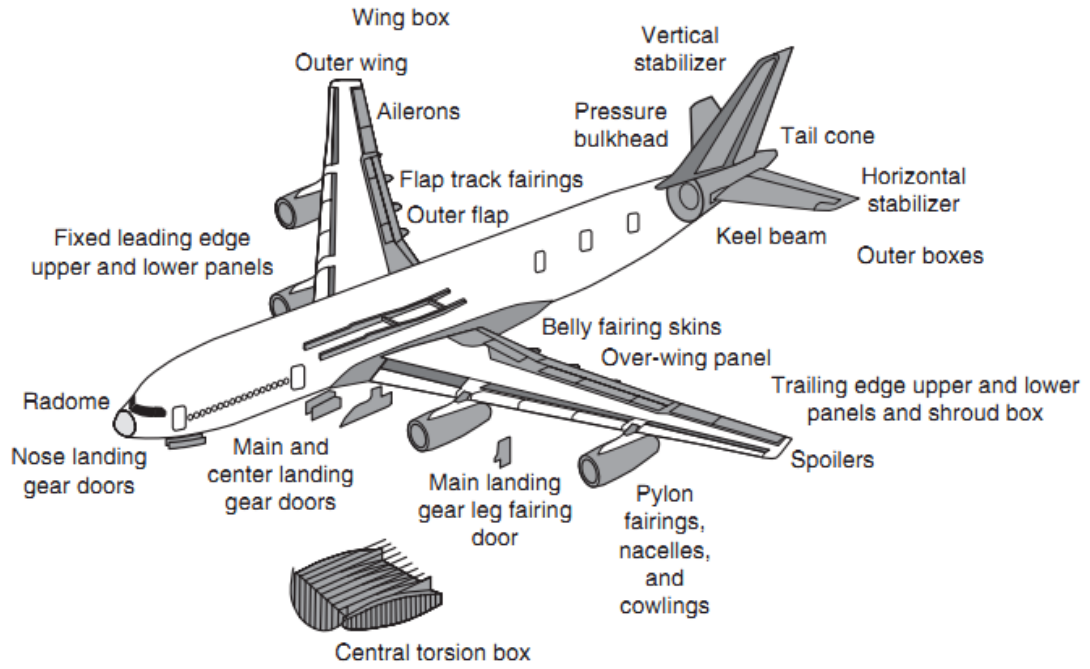
Askeri ve ticari hava araçları alanında elyaf takviyeli kompozitlerin büyük yapısal uygulamaları, ağırlığın azaltılması, dolayısıyla, daha yüksek hızlara çıkılması ve yük taşıma kapasitesini arttırmak için kritiktir. 1970 'li yıllarda karbon elyafların tanınmasıyla, karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler kanat, uçak gövdesi, uçak kuyruk takımı gibi birçok parçanın birincil malzemesi oldu. Bu ilkel parçaların yapısal bütünlük ve dayanıklılığı, bu malzemelerin kendi performansı ile güvenli bir şekilde arttırılmış ve diğer yapısal uçak parçalarının gelişimine yol açmıştır. Sonuç olarak, askeri hava araçlarında kompozitlerin miktarı artarak kullanılmaya başlanmıştır. B-2 (Şekil 2.16) hava aracının dış yüzeyi ve diğer gizli eylem hava araçlarının neredeyse tamamı karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerden yapılır.



Şekil 2.16 Gizli eylem hava aracı (hayalet uçak) (Mallick, 2008).

Bu hava araçlarının görünmezlik karakteristikleri karbon elyaf kullanımı, özel kaplamalar ve diğer tasarım özellikleri sayesinde. Bunlar radar yansımalarını ve ısı yayınımını azaltır.

Airbus A380 uçağında kompozitlerin kullanımı Şekil 2.17 'de şematik olarak gösterilmiştir. 2006 yılında tanıtılan bu uçağın ağırlığının yaklaşık %25 'i kompozit malzemelerden yapılmıştır.



Şekil 2.17 Elyaf takviyeli kompozitlerin Airbus 380 uçağında kullanımı (Mallick, 2008).

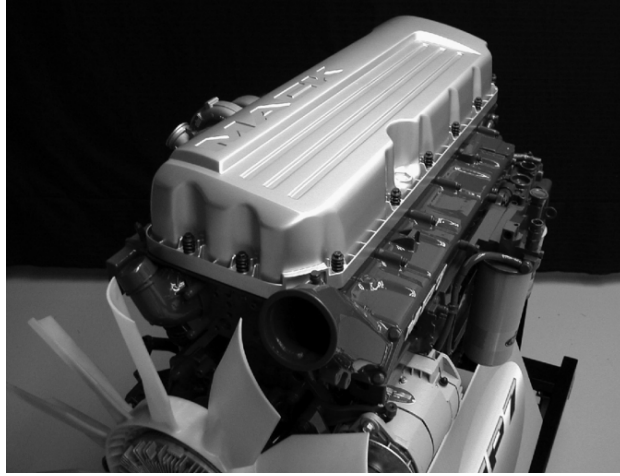
A380 uçağında büyük kompozit parçalar arasında merkezi torsiyon kutusu (gövdenin altından sağ ve sol kanatları bağlayan parça), arka basınç duvarı bölmesi (uçağın arka bölümünden yolcu kabinini ayıran kubbe şeklindeki basınç olmayan ara bölme), kuyruk ve flaplar, spoyler ve kanatçıklar gibi uçuş kontrol yüzeyleri yer alır (Mallick, 2008).

2.5.2 Uzay Alanında Uygulamalar

Elyaf takviyeli kompozitlerin birçok uzay aracında kullanılmasının ana sebebi ağırlık azaltma amacıdır. Uzay mekiklerinin yapısında yer alan farklı uygulamalar arasında, gövde orta kirişler (bor elyaf takviyeli alüminyum tüpler), yük taşıma bölgesi (karbon fiber takviyeli epoksi yüzey ve alüminyum bal peteği çekirdekli sandviç tabakalı kompozit), uzaktan kontrollü manipülatör kolu (çok yüksek katsayılı karbon elyaf epoksi tüp) ve basınçlı kaplar (Kevlar 49 elyaf takviyeli epoksi) yer alır. Elyaf takviyeli polimerler büyük yapısal parçaların yanı sıra, güneş enerjisi sağlayan tertibatlar, antenler, optik platformlar ve benzeri birçok küçük parçalarda taşıyıcı yapı olarak kullanılırlar (Mallick, 2008).

2.5.3 Otomotiv Endüstrisinde Uygulamalar

Otomotiv endüstrisinde elyaf takviyeli kompozitlerin uygulamaları gövde parçaları, şasi parçaları ve motor parçaları olarak üç grupta sınıflandırılabilir.



Şekil 2.18 Hazır kalıplama (SMC) yöntemiyle üretilen kamyon motoru külbütör kapağı (Mallick, 2008).

Dış gövde parçaları (kaput ve kapı panelleri gibi) yüksek sağlamlık ve hasar toleransı (çökme direnci) gerektirdiği kadar görünüş için A sınıf yüzey pürüzlülüğü gerektirir. Bu parçaların imali için E-camı takviyeli kompozit malzemeler kullanılır. Burada sürekli olmayan cam elyaflar polyester veya vinil ester reçine içerisine rastgele dağıtılmıştır. Önemli ölçüde düşük maliyetli olduğu için karbon elyaf yerine E-camı kullanılır.

Formula 1 yarış arabalarının vites kutusu ve arka süspansiyonunda kullanılan karbon elyaf takviyeli kompozitin kullanımına örnek Şekil 2.19’ da gösterilmiştir. Formula 1 arabalarında karbon elyaf takviyeli epoksinin önemli bir uygulaması da bir kaza olayında sürücüyü koruyan yaşam hücresi diye adlandırılan parçadır. Ayrıca yaşam hücresinin önünde yer alan burun konisi karbon elyaf takviyeli epoksiden yapılır.



Şekil 2.19 Formula 1 yarışa arabalarındaki karbon elyaf takviyeli epoksi süspansiyon ve vites kutusu (Mallick, 2008).

2.5.4 Spor Araçları Uygulamaları

Elyaf takviyeli polimerler, tenis raketlerinden spor ayakkabılara kadar metal, deri, ağaç gibi geleneksel malzemelerin yerine spor araçlarının imalinde geniş ölçüde kullanılırlar. Elyaf takviyeli polimerlerin kullanımının ağırlık hafiflemesi, titreşim sönümleme ve tasarım esnekliği gibi avantajları vardır.



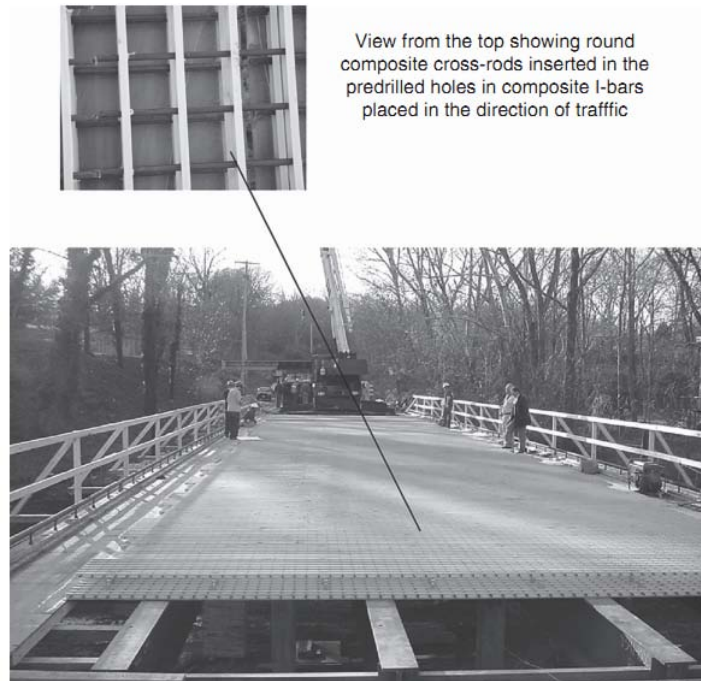
Şekil 2.20 Karbon elyaf takviyeli epoksiden imal edilmiş bisiklet kadrosu (Mallick, 2008).

Spor araçlarında elyaf takviyeli polimerlerin uygulamalarına örnek olarak tenis raketleri, golf sopaları, balık oltaları, bisiklet kadrosu, kar ve su kayak takımları, hokey ve beysbol sopaları, kürek, paletler, sörf tahtaları, kano gövdeleri, oklar, spor ayakkabıları ve ayakkabı topukları, mızrak, kasklar verilebilir.

2.5.5 Denizcilik Uygulamaları

Cam elyaf takviyeli polyesterler 1940 'lı yıllarda ticari malzeme olarak tanıtılmasından beri yelkenli, balıkçı tekneleri, cankurtaran filikaları, küçük sandallar ve yatlar gibi farklı tipte bot uygulamalarında kullanılmaktadır. Bugün, tüm dinlenme amaçlı botların yaklaşık %90 'ı ya cam elyaf takviyeli polyester ya da cam elyaf takviyeli vinil ester reçineli kompozit malzemeden yapılmaktadır. Son zamanlarda, Kevlar 49, cam elyaflara göre sahip olduğu yüksek çekme dayanımı-ağırlık ve modül-ağırlık oranları sebebiyle bu uygulamaların bazılarında cam elyafın yerini almıştır. Bu uygulama alanları arasında tekne gövdeleri, güverte, ara bölme, tekne iskeleti, gemi direkleri vardır (Mallick, 2008).

2.5.6 Altyapı Uygulamaları



Şekil 2.21 Cam elyaf takviyeli vinil ester kompozit köprü yapısı (Mallick, 2008).

Elyaf takviyeli polimerlerin köprü, bina ve diğer inşaat altyapılarında güçlendirilmiş beton ve çelik yerine kullanım potansiyeli yüksektir. Bu kompozitlerin esas tercih edilme sebepleri korozyon dirençlerinden dolayı daha uzun ömür, düşük bakım ve yenileme maliyetleridir. Şekil 2.21’ de 73 yıllık nervürlü beton köprü yerine değiştirilmiş kompozit köprü yapısı gösterilmiştir (Mallick, 2008).

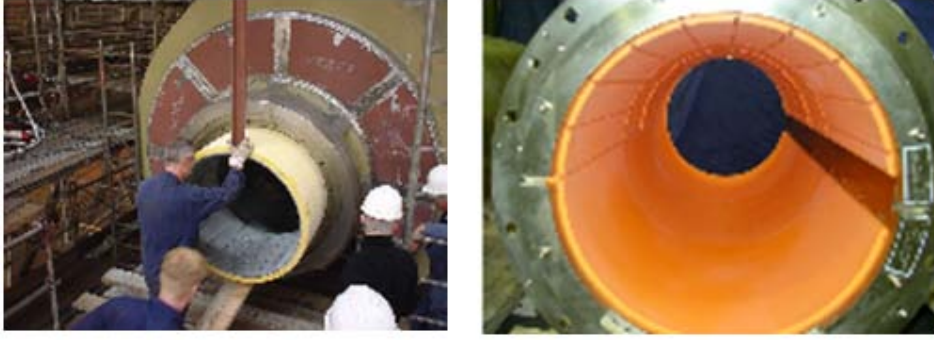
2.5.7 Diğer Uygulama Alanları

Kompozit malzemelerin kullanım alanları çok geniştir ve günden güne daha da genişlemektedir. Kompozit malzemelerin doğal malzeme olmayışı ve kullanım amacına göre farklı özelliklerde kompozit malzemelerin geliştirilebilmesi tercih edilme sebepleridir.

Kompozitler, matbaa endüstrisi için endüstriyel merdane ve şaftların yapımında soğutma kulesi uygulamaları için endüstriyel tahrik millerinin yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Geliştirilmiş dayanım, sönümlenme ve tepki süresi sağlamak amacıyla robot kolu yapımında kullanılırlar. Kompozitler bunların yanı sıra burçlarda, pompa ve merdanelerde yatak malzemesi olarak ve pistonlarda kullanılırlar (Mazumdar, 2002). Çeşitli kompozit malzemedan imal edilmiş kaymalı yatak uygulamaları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir, Şekil 2.22-2.24.



Şekil 2.22 Kompozit kaymalı yataklar (GM/2401) (thordonbearings, 2013).



Şekil 2.23 Deniz dibi tarama aracında kullanılan kompozit pervane mili kaymalı yatakları (thordonbearings, 2013).



Şekil 2.24 Bisiklette kullanılan kompozit kaymalı yatak uygulaması (turnerbikes, 2013)

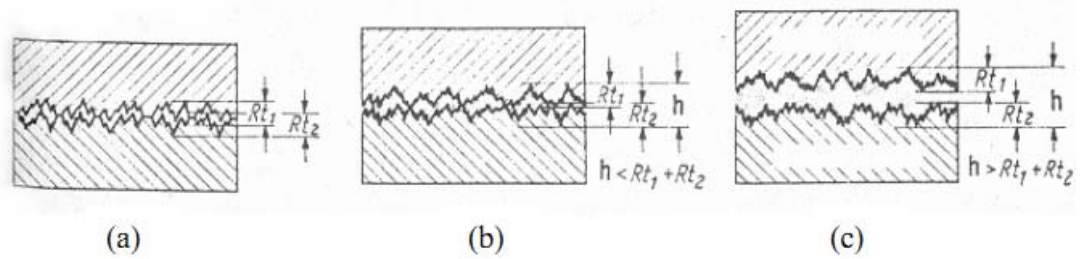
BÖLÜM ÜÇ

SÜRTÜNME VE ÇEŞİTLERİ

3.1 Sürtünme

Genel anlamda sürtünme, temasta olan ve izafi hareket yapan iki cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir. Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma veya kayma – yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan *kayma*, *yuvarlanma* veya *kayma – yuvarlanma* sürtünmesi şeklinde olur.

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir (Şekil 3.1). Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda, yani yüzeyler tamamen ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır (Akkurt, 1982).



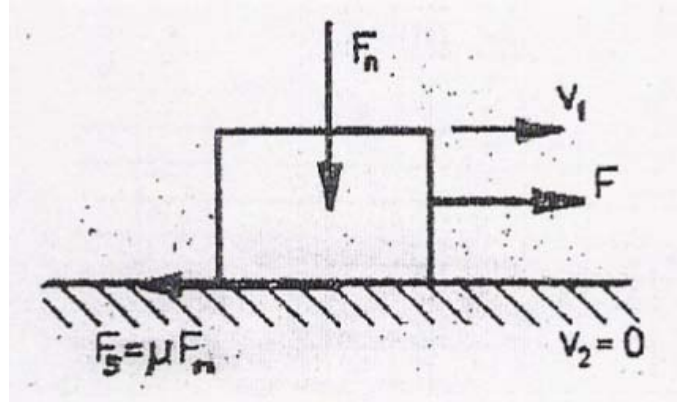
Şekil 3.1 Sürtünme çeşitleri (a) Kuru, (b) Sınır, (c) Sıvı sürtünme halleri (Akkurt, 1982).

Sürtünme olayı sonrasında makine parçalarında aşınmalar meydana gelir. Makine parçalarında oluşan aşınma, boyut değişkenliğine sebep olur. Aşınma ile boyut hassasiyetini kaybeden bir makine istenilen kalite ve hassasiyette olmaz ve görevini yerine getiremez.

3.2 Sürtünme Çeşitleri

3.2.1 Kuru Sürtünme

Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için Şekil 3.2 de gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı $F_s = \mu \cdot F_n$ değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ - sürtünme katsayısıdır.



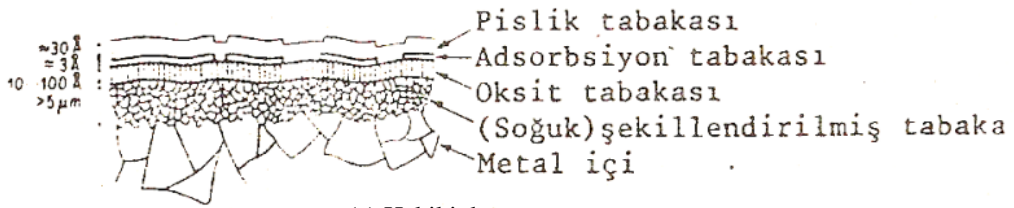
Şekil 3.2 Sürtümlü düzlemde harekette serbest cisim diyagramı (Akkurt, 1982).

Şekil 3.2 de görülen cisimlerden herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse, iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda F kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kayamazlar. Bu halde hareket olanağı olduğundan yüzeyler arasında statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir. Bu durumda Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetine tam olarak eşit ve ters yöndedir. Kavrama, fren gibi sürtünme ile çalışan elemanlarda esas olarak bu sürtünme hali vardır. İkinci durumda F kuvvetinin etkisi altında yüzeyler birbirleri üzerinde kayarlar. Kinematik veya doğrudan doğruya sürtünme denilen bu halde F_s sürtünme kuvveti, F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yöndedir (Akkurt, 1982).

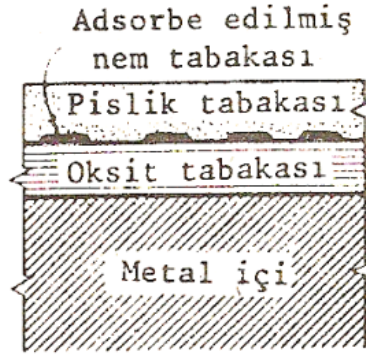
Coulomb – Amontons kanunu olarak tanınan $F_s = \mu \cdot F_n$ bağıntısına göre: Sürtünme kuvveti normal kuvvetle orantılıdır; böylece sürtünme katsayısı $\mu = F_s / F_n$ şeklinde ifade edilir.

- ✓ Sürtünme kuvveti nominal temas alanına bağlı değildir.
- ✓ Sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsızdır.

Yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri arasında, ortamın atmosferinin ve bu atmosferi teşkil eden elemanların etkisinde olduğundan oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır (Şekil 3.3). Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabilen bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel veya kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerdeki oksit tabakası aniden oluşmaktadır.



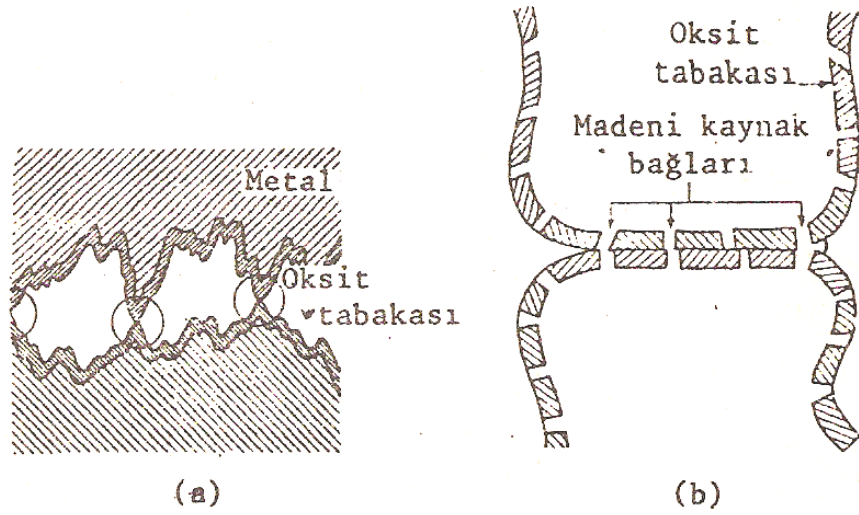
(a) Hakiki durum



(b) Modellenmiş durum

Şekil 3.3 Kuru sürtünme haline yüzeylerin durumu (Akkurt, 1982).

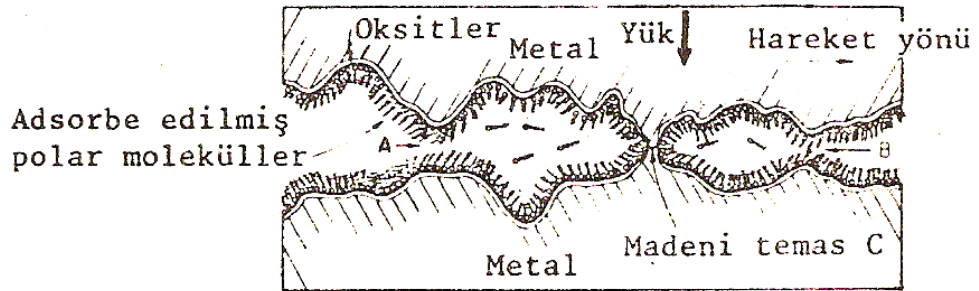
Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisi dikkate alındığında; Şekil 3.4 (a) da gösterildiği gibi yük tatbik edilmeden önce temas halindeki tabii tabakalar arasında bir bağlantı oluşur. Yük tatbik edildikten sonra tabakanın bir kısmı (Şekil 3.4 b) kopar ve buradaki küçük temas alanlarında metal kaynama meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar, tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir. İzafi hareket yapan yüzeylerde sürtünme, metal kaynak bağlar ile tabii tabakalar arasındaki bağlantıların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti, hem kaynak bağlarını hem de bağlantıları koparan kuvvettir.



Şekil 3.4 Mikro kaynakların oluşumu (Akkurt, 1982).

3.2.2 Sınır Sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,03 ile 0,1 arasında değişir.



Şekil 3.5 Madensel yüzeylere bağlanan polar moleküller (Akkurt, 1982).

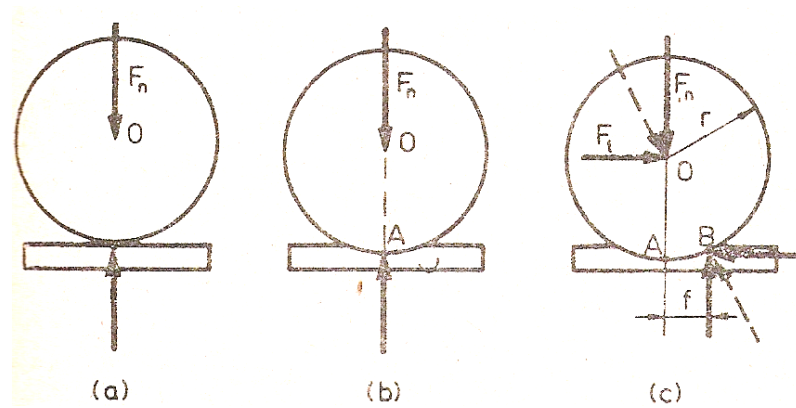
Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 3.5). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır.

3.2.3 Sıvı Sürtünmesi

Sıvı sürtünmesinde madeni yüzeyler arasında bulunan yağ tabakasındaki basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığı takdirde yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur. Madensel yüzeylerde doğrudan doğruya temasta olan yağ tabakalarının adsorpsiyon dolayısıyla her iki yüzey boyunca tamamen yapışmış olduğu görülür. Sıvı sürtünmesi haline sürtünme esas itibarıyla birbiri üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmakta ve bu tabakalar arasındaki kayma gerilmelerine bağlı olmaktadır. Sıvı sürtünmesinin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır (Akkurt, 1982).

3.2.4 Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bir elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında (Şekil 3.6 a) hiçbir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde elastik ve daha az olarak plastik deformasyonlar oluşur (Şekil 3.6 b); şöyle ki, temas yüzeyleri doğru veya nokta değil de alan şeklindedir. Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelmektedir (Şekil 3.6 c).



Şekil 3.6 Yuvarlanma sürtünmesi mekanizması (Akkurt, 1982).

Genellikle yuvarlanma, elastik deformasyon ve kaymadan oluşan bir sürtünme olayı şeklindedir. Yuvarlanma sürtünmesinde en çok rastlanan dişli çarklar ve rulmanlar gibi sistemlerde temas yüzeylerindeki kayma, başka faktörlere bağlı olarak

oluşmaktadır. Örneğin dişli çarklarda kavrama özelliği, rulmanlarda Coriolis kuvvetleri gibi etkenler kaymayı meydana getirirler. Sonuç olarak, yuvarlanma sürtünmesinde sürtünme kuvveti, normal kuvvetin çok küçük bir payıdır (Akkurt, 1982).

BÖLÜM DÖRT

AŞINMA VE ÇEŞİTLERİ

4.1 Aşınma

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerden malzemenin, mekanik etkenler etkisiyle ve istenilmediği halde kopup ayrılmasıdır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybederler; parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon normal şekilde yerine getirilemez.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişmelerin sonucudur. Dış etkilerin, fiziksel ve kimyasal değişikliklerinin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil birçok aşınma halleri vardır. Bunlar adezyon, abrazyon, yorulma aşınması (pitting), oksidasyon (mekanik korozyon) olmak üzere dört grupta incelenebilir.

4.2 Aşınma Çeşitleri

4.2.1 Adezyon Aşınması

Yüzeyler arasındaki gerçek temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları büyük bir basınç altında bulunmaktadır. Normal olarak yüzeylere adsorbe edilmiş olan gaz veya sıvı molekülleri ile oksit tabakaları bu basınç altında parçalanır; malzemelerin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel kaynak bağları oluşur. Bu kaynak bağlarının meydana getirdiği malzeme kaybı adezyon aşınmasını teşkil etmektedir. En yaygın aşınma çeşididir.

Adezyon aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelir. Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hızlarda ve yüklerde görülen bir aşınma şeklidir. Adezyon aşınması, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir. Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hızlarda ve yüklemelerde meydana gelir. Yağlamının

etkisi büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önler. Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemede olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir. Kalay, selenyum, arsenik ve tellür gibi metallerde adezyon aşınması görülmemiştir. Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrazyon aşınmasını meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde adezyon aşınması oluşmaz (Akkurt, 1982).



Şekil 4.1 Kam mili üzerinde zamanla oluşmuş adezyon aşınması (Adezyon_aşınması, 2013).

Adezyon aşınmasını önlemek için alınması gereken önlemler:

- Eş çalışacak malzeme çiftleri uygun seçilmelidir. Çünkü bu aşınma benzer ve kolay alışım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu bakımdan malzemelerden biri sert (çelik) diğeri ise yumuşak (bronz) olmalıdır.
- İyi bir yağlama sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katkılar kullanılmalıdır.

4.2.2 Abrazyon Aşınması

Abrazyon aşınmasında türünde yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyler arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan malzemelerin yüzeylerinde oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi altında meydana gelir. Bu sert parçacıklar

yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğelemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine sebep olurlar (Akkurt, 1982).



Şekil 4.2 Mil üzerinde zamanla oluşmuş adezyon aşınması
(Abrazyon_aşınması, 2013).

Abrazyon aşınmasını önlemek için alınacak önlemler şu şekilde özetlenebilir:

- Yüzeyler sertleştirilmelidir.
- Dışarıdan sert maddelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır.
- Makineler ve sistemler talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir.

4.2.3 Yorulma Aşınması (Pitting)

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle dişli çarklar, kam mekanizmaları, rulmanlar gibi yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan Hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu çeşit basınçların etkisi altında yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedir.

Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi, bunları büyümesinde önemli rol oynayabilir.



Şekil 4.3 Sonsuz vida karşılık dişlisinde yorulma aşınması (Triboloji, 2013).

Pitting oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemli rol oynar. Doğal sertlikteki malzemelerde, örneğin çeliklerde, pitting meydana gelmektedir. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmektedir. Yorulma aşınmasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir (Akkurt, 1982).

4.2.4 Oksidasyon (Mekanik Korozyon) Aşınması

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda ince sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Oksidasyon aşınmasını önlemek için yüzeyler

fosfat veya sülfit ile işlem görür veya oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler (molibden disülfit) kullanılır (Akkurt, 1982).

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1 Deneyin Amacı

Makine imalatında kullanılan parçaların çalışma koşullarında istenen en önemli malzeme özelliklerinden birisi aşınma dayanımıdır. Günümüzde kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı yerlerde, aşınmaya maruz kaldığı durumlarda nasıl bir performans göstereceğinin önceden bilinmesi gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada; epoksi matrisli, altı farklı dizilime sahip cam, karbon ve cam ile karbon (hibrit) elyaftan oluşan kompozit malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin değişik kayma mesafelerinde, farklı yüklerde ve farklı pürüzlülüğe sahip yüzeylerde aşınma davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

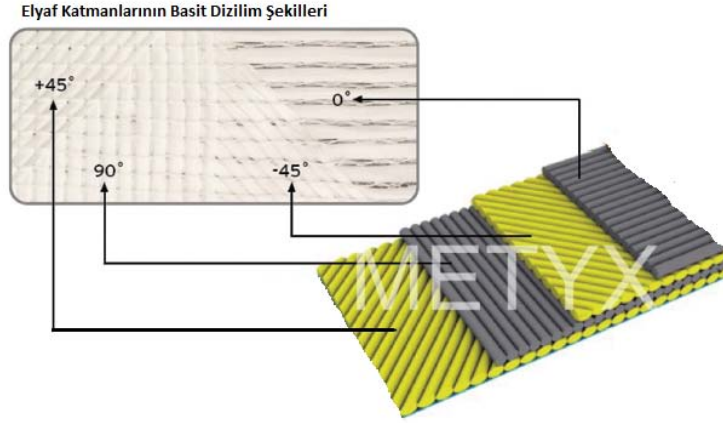
5.2 Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Bu çalışmada ele alınan kompozit numuneler, epoksi reçine matrisli ana malzeme ile örgü kumaş şeklindeki farklı elyaflardan elde edilmiştir. Numunelerde kullanılan elyaf yapılar, örgü kumaş şekillerine ve dizilimlerine göre aşağıda verilmiştir.

- Biaxial cam elyaf ($0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $-45^{\circ}/45^{\circ}$)
- Triaxial cam elyaf ($-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$)
- Quadriaxial cam elyaflar ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}$)
- Biaxial karbon elyaf ($-45^{\circ}/45^{\circ}$)
- Cam ile karbon elyaflardan oluşan biaxial hibrit elyaf ($-45^{\circ}/45^{\circ}$)

Kullanılan tüm elyaflar Metyx Composites firmasından tedarik edilmiştir. Elyaf katmanlarının dizilimleri basit olarak aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir, Şekil 5.1.

Firmadan temin edilen elyaflar eksen sayılarına göre farklı dağılımlara sahiptir. 0/90 iki eksenli (biaxial) örgüler 0° ve 90° , +45/-45 iki eksenli örgüler ise $+45^{\circ}$ ve -45° doğrultularında fiber dizilimine sahip iki katlı yapıdan oluşmaktadır.



Şekil 5.1 Elyaf katmanlarının basit dizilim şekilleri (metyx, 2013).

İki eksenli elyaf lar 600 g/m^2 'lik dağılıma sahip olup, elyaf dağılımı; 0/90 için 0° doğrultusunda 300 g/m^2 ve 90° doğrultusunda 300 g/m^2 , +/-45 için $+45^\circ$ doğrultusunda 300 g/m^2 ve -45° doğrultusunda 300 g/m^2 dir. +45/90/-45 üç eksenli (triaxial) örgüler ise $+45^\circ$, 90° , -45° doğrultularında fiber dizilimine sahip üç katlı yapıdan oluşur. Üç eksenli ürünün fiber dağılımı; $+45^\circ$ doğrultusunda 234 g/m^2 , -45° doğrultusunda 234 g/m^2 , 90° doğrultusunda 236 g/m^2 'dir. Dört eksenli (quadriaxial) örgülerde $+45^\circ$, 90° , -45° , 0° olmak üzere dört ana eksen de fiber bulunmaktadır. 1262 g/m^2 'lik ağırlığa sahip dört eksenli ürünün fiber dağılımı; $+45^\circ$ doğrultusunda 300 g/m^2 , -45° doğrultusunda 300 g/m^2 , 90° doğrultusunda 307 g/m^2 , 0° doğrultusunda 355 g/m^2 'dir.

Kompozit yapıyı oluşturan ana malzeme matristir. Matris içerisine kürlenmeyi hızlandırmak için belirli miktarlarda sertleştirici de ilave edilir. Bu çalışmada matris malzemenin oluşturulmasında kullanılan epoksi reçine ve sertleştiricisi Duratek firmasından temin edilmiştir. Epoksi malzeme olarak DTE 1000/A ve sertleştirici olarak DTS 1105/B kullanılmıştır. Karışımda kullanılan sertleştirici oranı ağırlıkça 1/3 'tür.

5.3 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi

Testler TE53 çok amaçlı sürtünme ve aşınma deney cihazıyla yapılacak olup, cihaza bağlanan numune boyutunun $12,7 \times 12,7 \times 12,7 \text{ mm}$ 'lik küp formunda olması

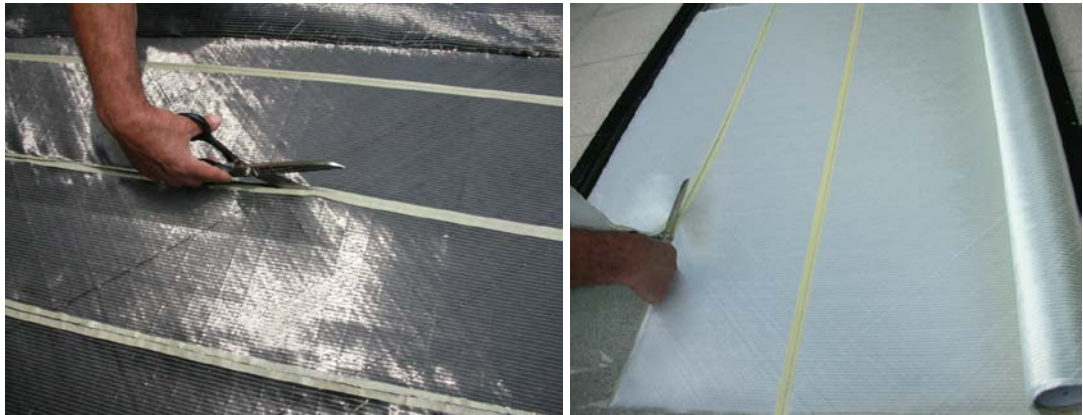
gerekmektedir. Bu sebeple, eni 250 mm, boyu 250 mm ve kalınlığı 12,7 mm numune plakaları üretilip, sonrasında eni 12,7 mm ve boyu 12,7 mm olacak şekilde kesilerek test numunelerinin hazırlanması planlanmıştır.

TE53 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazının numune bağlama aparatı ve üzerine bağlanmış test numunesi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.2.



Şekil 5.2 TE53 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazının numune bağlama aparatı ve üzerine bağlanmış numune.

Bu plan doğrultusunda, Metyx firmasından 1270 mm genişliğinde hazır olarak tedarik edilen elyaflar öncelikli olarak 250 mm genişliğinde kesilmiştir. Elyafların kesim sırasında kenarlarının dağılmaması için kâğıt bant yapıştırılarak kesim işlemi gerçekleştirilmiştir. Elyafların kesim işlemi şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.3.



Şekil 5.3 Elyafların kesim işlemi.

250 mm genişliğinde kesimi gerçekleştirilmiş elyaflar beşe katlanarak 250x250 mm yüzey alanına sahip bir forma getirilmiştir. Katlanmış elyaf yapı şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.4.



Şekil 5.4 Beşe katlanan elyaf yapı.

Kompozit malzeme üretimi Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü Kompozit Laboratuvarında, vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Vakum destekli reçine infüzyon tezgahı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.5.



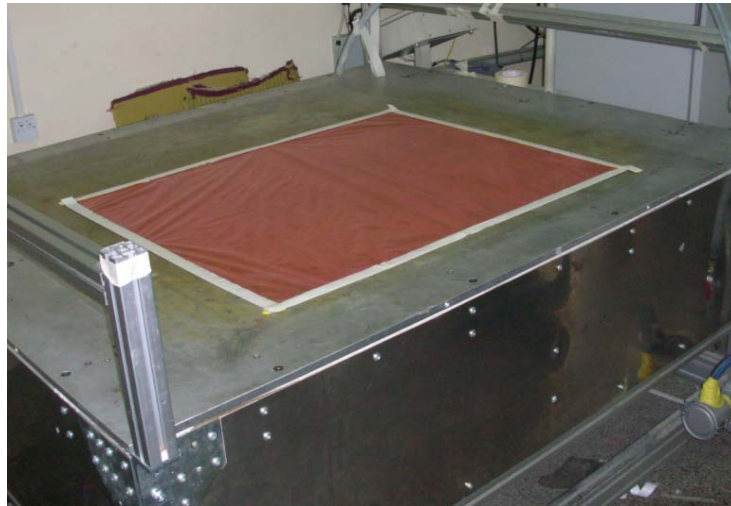
Şekil 5.5 Vakum destekli reçine infüzyon tezgahı.

Çalışmada kullanılan kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile şu şekilde üretilmiştir. Öncelikle, reçinenin tezgah tablasına yapışmasını önlemek için kompozit malzemelerin boyutlarına uygun ayırıcı film 800x1000 mm boyutunda kesilmiş ve tezgah tablasına yerleştirilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Üretim için yeterli ayırıcı filmin kesilmesi.

Vakum aşamasında vakum torbasıyla tezgah tablası arasında sızdırmazlığı sağlamak için tezgah tablası ve üzerindeki ayırıcı filmin çevresine sızdırmazlık macunu uygulanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Tezgah tablası ve üzerindeki ayırıcı film çevresine sızdırmazlık macununun uygulanması.

Önceden kesilip katlanan elyaflar, yeterli kalınlığa ulaşıncaya kadar istiflenip, ayırıcı film üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 5.8).

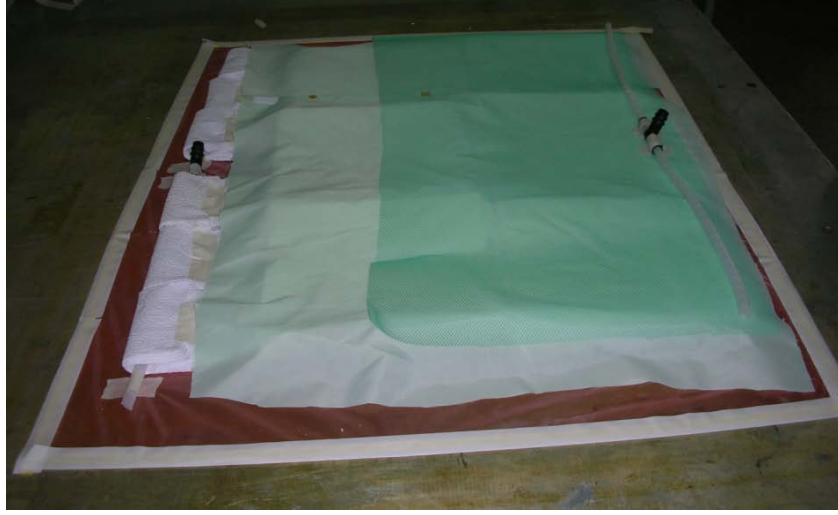


Şekil 5.8 Ayrılcı filmin üzerine önceden kesilip katlanan, altı farklı tip elyafın yeterli kalınlığa ulaşmaya kadar istiflenmesi.

Elyafın üzerine reçinenin vakum torbasına yapışmasını önleyen soyma kumaşı serilmiştir (Şekil 5.9). Bu kumaşın üzerine reçinenin dağılmasını sağlayan reçine dağıtıcı file, spiral reçine, vakum hattı hortumları ve bağlantıları yerleştirilmiştir (Şeki 5.10).

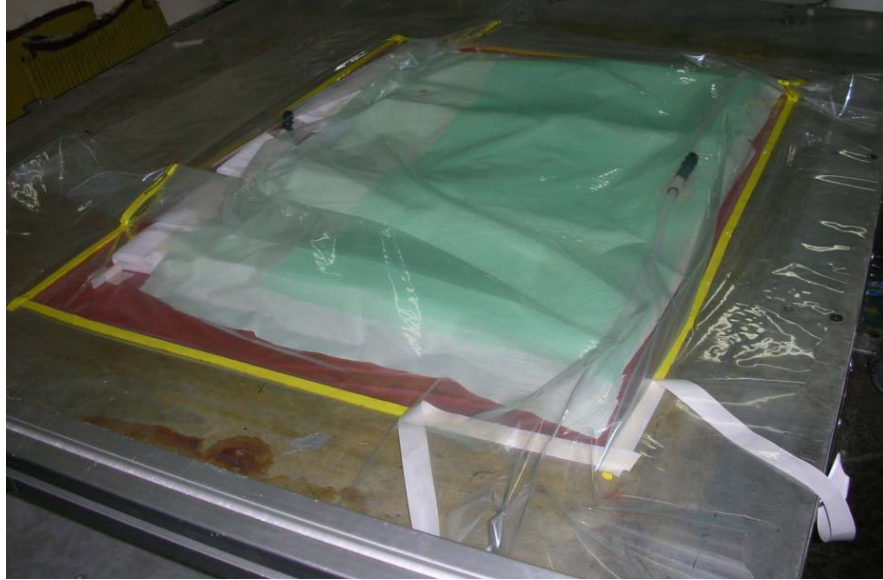


Şekil 5.9 İstiflenen elyafın üzerine reçinenin vakum torbasına yapışmasını önleyen soyma kumaşının (peel ply) serilmesi.

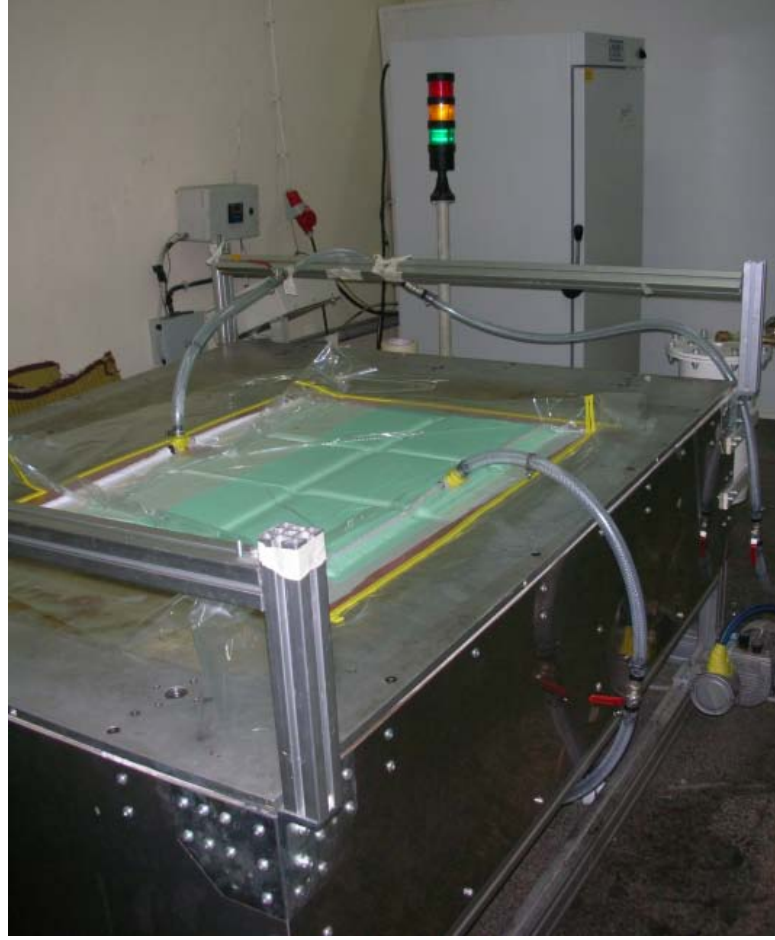


Şekil 5.10 Soyma kumaşının üzerine reçine dağılımını sağlayan reçine dağıtıcı filenin, spiral reçine ve vakum borularıyla boru bağlantılarının ve havalandırıcı peçetelerin yerleştirilmesi.

Tezgah ile vakum torbası arasında sızdırmazlığı sağlamak için önceden tablaya yapıştırılan sızdırmazlık macunu ile tüm elemanların üzerine serilen vakum torbası yapıştırılmıştır (Şekil 5.11). İşlem basamaklarının son aşaması olarak reçine hattı vanası kapatılmış, sistemde herhangi bir sızıntı veya kaçak olup olmadığının tespiti için 20 saat boyunca vakum altında bırakılmıştır (Şekil 5.12).



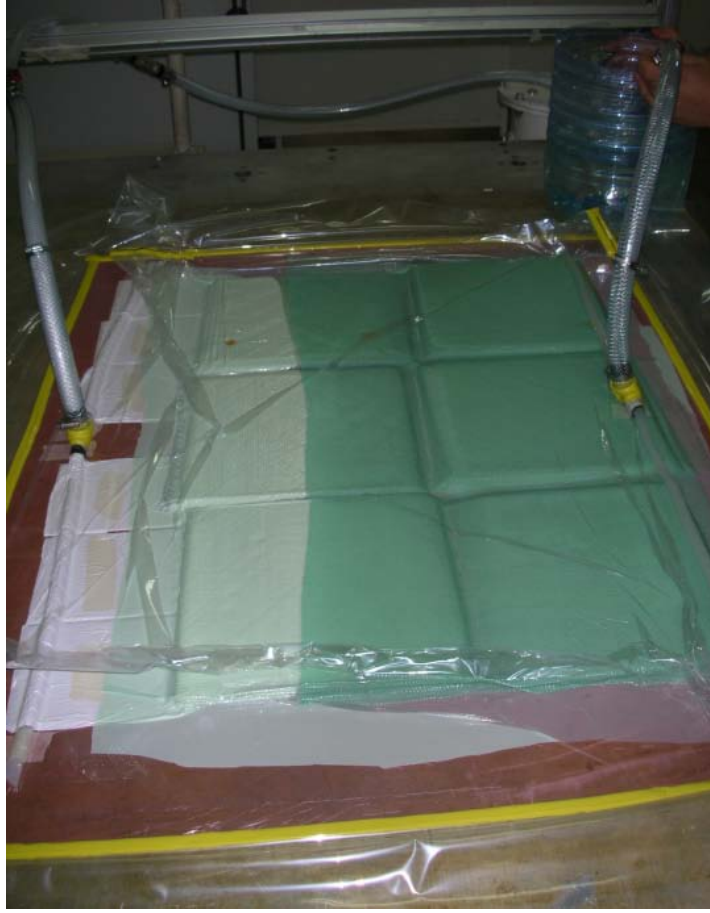
Şekil 5.11 Tezgah tablasının üzerine önceden yapıştırılan sızdırmazlık macunu ile tüm elemanların üzerine serilen vakum torbasının yapıştırılması.



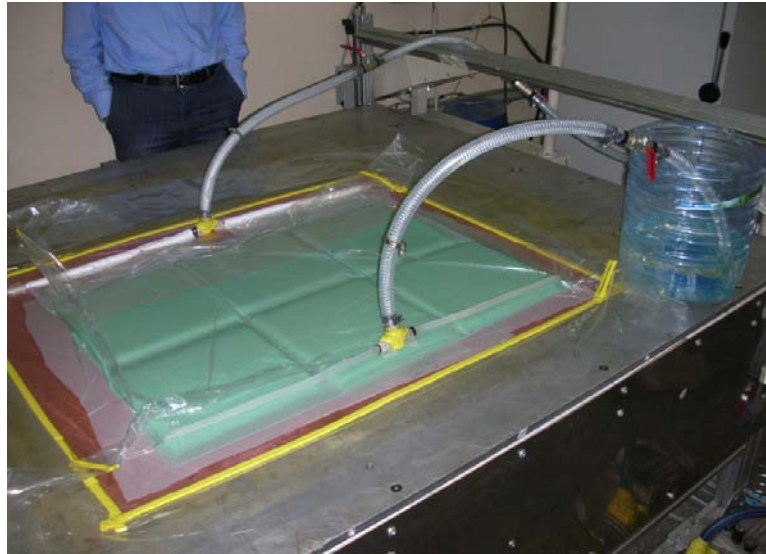
Şekil 5.12 Sistemin sızdırmazlığının kontrolü için vakuma tabi tutulması.

Epoksi reçinenin içerisine ağırlıkça 1/3 oranında sertleştirici malzeme katılmış ve 3-4 dakika süre boyunca yavaş devirde karıştırılarak sisteme verilmek üzere karışım hazırlanmıştır. Üretilcek kompozit malzemenin kalın olması gerekliliğinden dolayı karışımın homojen olarak elyafların arasında ilerlemesinin ve iyi bir reçine emiliminin sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple karışım, 60°C de 35 dakika süre boyunca fırında kürlenme işlemine tabi tutularak viskozitesi düşürülmüştür. Reçinenin sisteme verilmesi ve elyaflar üzerinde ilerleyişi şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.13.

Reçinenin elyafları tamamen ıslatmasının ardından reçine vanası kapatılarak, kompozit malzemenin üretiminin tamamlanması ve mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamak amacıyla 80°C de 5 saat süre boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Reçinenin elyafları tamamen ıslatması ve vakum ortamında kürlenmeye bırakılması şekilde gösterilmiştir, Şekil 5.14.



Şekil 5.13 Vakum desteğiyle epoksi reçinenin elyaflara emdirilerek, vakum çıkışına doğru reçinenin ilerleyişi.



Şekil 5.14 Elyafaların tamamen ıslanması neticesinde 80°C de 5 saat kürlenme işlemine tabi tutularak üretimin tamamlanması.

Üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin aşınma test cihazına bağlanması için yüzeylerin paralel olması gereklidir. Üretilen 6 farklı kompozit plaka yüzeyleri tarama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Üretilen plakaların iki yüzeyinin birbirine paralel olması ve 12,7 mm sabit kalınlığın elde edilmesi için işlenmesi.

Yüzeyleri taranan kompozit plakalar 12,7x12,7x12,7 mm 'lik küp formunda test numunesi haline getirilmek üzere kesme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 İşlenen plakaların 12,7 mm en ve 12,7 mm boyunda küp şeklinde kesilmesi.

DeneYler için yeteri kadar numune üretilmiştir. Kesilen numunelerin tamamı kesim işleminin ardından birbirine karışmalarını önlemek amacı ile üzerine numune tanımı yazılı kilitli poşetlere koyularak muhafaza edilmiştir (şekil 5.17).

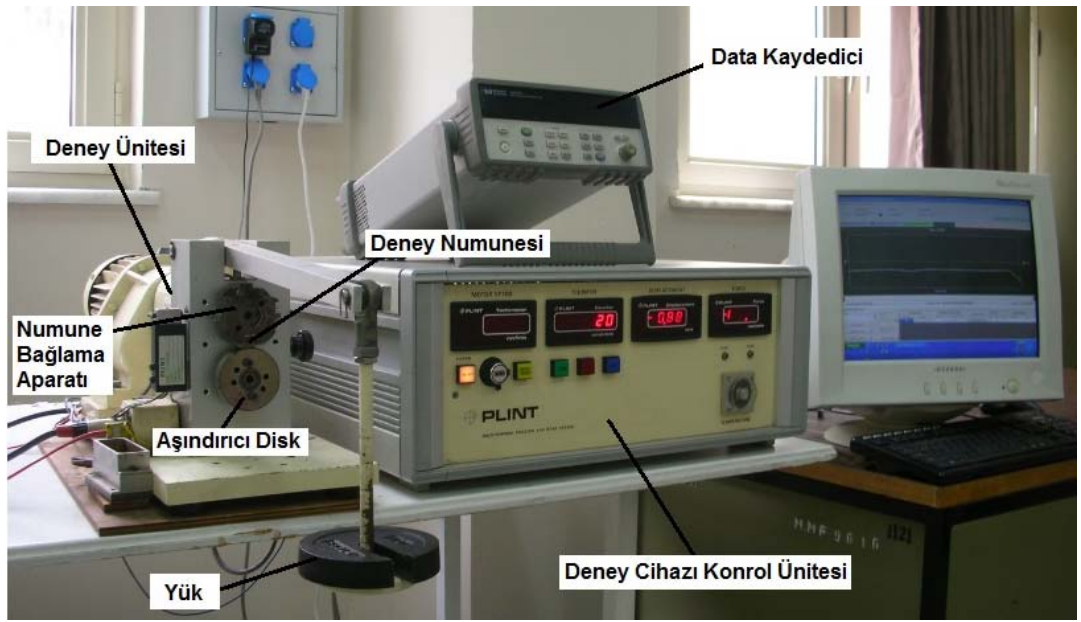


şekil 5.17 üretilen tüm kompozit malzemelerin 12,7x12,7x12,7 mm küpler şeklide kesilmesi ve torbalara ayrılması.

5.4 DeneYin Yapılışı

Aşınma deneYlerinde TE53 çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı kullanılmıştır (şekil 5.18). DeneY cihazı kontrol nitesi, deneY nitesi ve veri kaydedici olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. DeneY düzeneğinde bulunan manivela kolunun ucuna farklı yükler uygulanarak ele alınacak malzemeler üzerindeki aşınma ve buna bağlı büyüklükler ölçülebilmektedir. Kontrol nitesiyle kayma hızı ve yük kontrol edilerek, kayma mesafesi (evrim sayısı olarak), sürtünme kuvveti ve aşınma miktarı izlenebilmektedir. Aşındırıcı disk ve numune arasında oluşan sürtünme kuvveti bir veri kaydedici cihaz kullanılarak bilgisayara kaydedilmektedir. DeneY düzeneğinde disk üzerinde blok (block on roller) ve disk üzerinde disk (roller on roller) yöntemleriyle aşınma testi yapılabilir. Bu çalışmada disk üzerinde blok yöntemi kullanılarak kompozit malzemelerin aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Disk üzerinde blok yönteminde, Şekil 5.2 de gösterildiği gibi aparat yardımıyla sabit olarak tutulan blok şeklindeki numune ve numunenin altında yer alan aşındırıcı disk kullanılmaktadır. Aşındırıcı disk doğrudan redüktörlü motor tarafından tahrik edilerek dönme hareketi yapmaktadır. Aşındırıcı diskin bağlı olduğu mil sabit eksene sahip bir şekilde yataklanmıştır. Numunenin bağlı olduğu üst mil ise küresel yataklama elemanları kullanılarak monte edilmiş ve böylelikle deney süresince numunenin disk ile teması, numune yüzeyine dik olacak şekilde sürekli kılınmıştır. Numune ile aşındırıcı disk arasında %100 kayma gerçekleşmektedir.



Şekil 5.18 TE53 Çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı.

Aşınma deneylerinde kullanılmak üzere farklı yüzey pürüzlülük değerine sahip iki aşındırıcı disk üretilmiştir (Şekil 5.19). Sonuçların doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için deney başlangıç şartlarının aynı olması gerekir. Bu nedenle deney aşamalarında sürtünmenin etkisiyle aşındırıcı disk üzerinde oluşan sıcaklık ve etkilerinden kaynaklanabilecek hataların önlenmesi için farklı pürüzlülüğe sahip diskler her bir deney aşamasında dönüşümlü kullanılmak üzere ikişer adet üretilmiştir. Aşındırıcı diskler AISI 52100, 65 HRC sertleştirilmiş rulman çeliğinden, çapı $\varnothing 60$ mm, kalınlığı ise 16 mm olarak üretilmişlerdir. Bu diskler $R_a=0,16$ μm ve $R_a=0,32$ μm pürüzlülük değerlerine sahiptir.



Şekil 5.19 AISI 52100 malzemeden imal edilen 65 HRC sertliğe sahip aşındırıcı disk.

Üretilen kompozit malzemelerin aşınma deneylerinde kullanılan hız, yük ve pürüzlülük parametreleri ASTM 137-97 (2009) standardı referans alınarak seçilmiştir.

Seçilen parametreler aşağıda verilmiştir.

- Kayma hızı: 1 m/s ve 2 m/s
- Normal yük: 67 N ve 92 N
- Pürüzlülük: $R_a=0,16 \mu\text{m}$ ve $R_a=0,32 \mu\text{m}$

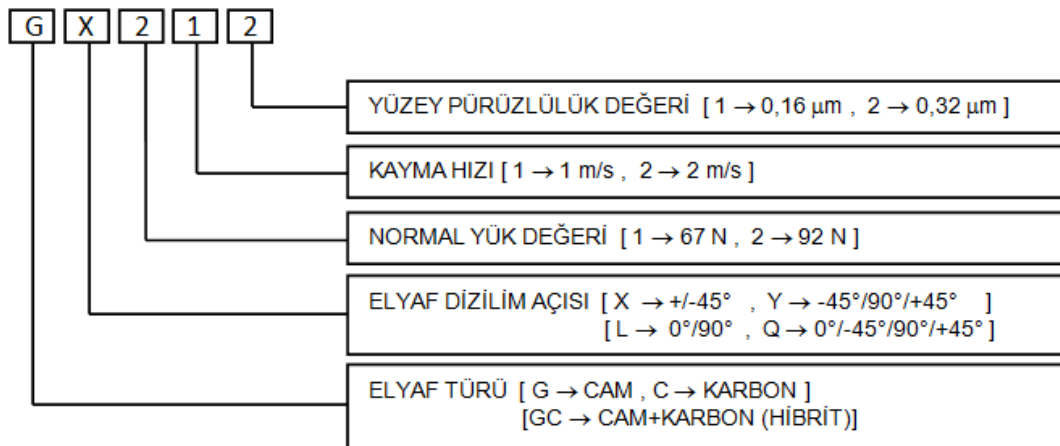
Deneyler yukarıdaki parametrelerin kombinasyonları altında 2000 m kayma mesafesine kadar sürdürülerek her 500 m 'de bir ağırlık kaybı ölçümü yapılmıştır ve 2000 m sonundaki SEM (taramalı elektron mikroskobu) görüntüleri incelenmiştir.

Numuneler aşınma deneyine tabi tutulmadan önce kodlanmış ve 0,0001 gram hassasiyetli teraziyle ağırlık ölçümleri yapılarak başlangıç ağırlıkları belirlenmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Numunelerin ağırlıklarının hassas terazi ile ölçülmesi.

Kodlama işlemi; elyaf türü, elyaf dizilim açısı, normal yük değeri, kayma hızı ve aşındırıcı diskin yüzey pürüzlülük değerine göre yapılmıştır. Numuneler deney aşamalarında ağırlık ölçümü için sökülüp tekrar teste tabii tutulmuş, kodlama ile numunelerin karışması da engellenmiştir. Aşağıdaki şekilde kodlama işleminin nasıl yapıldığına dair bir örnek verilmiştir, Şekil 5.21.



Şekil 5.21 Numunelerin kodlanması.

DeneYler her 500 m sonunda durdurulup, numune bağlı olduğu aparattan çıkartılmıştır. Çıkartılan numunenin ağırlık kaybının hassas bir şekilde belirlenebilmesi için numunenin aşınma yüzeyleri aseton ile temizlenmiş ve kurutulduktan sonra hassas teraziyle ağırlık ölçümü yapılarak ağırlık kaybı belirlenmiştir. Ayrıca her deney aşamasından önce aşındırıcı diskin temas yüzeyi de asetonla temizlenerek deneylerin kontrol altında tutulması sağlanmıştır.

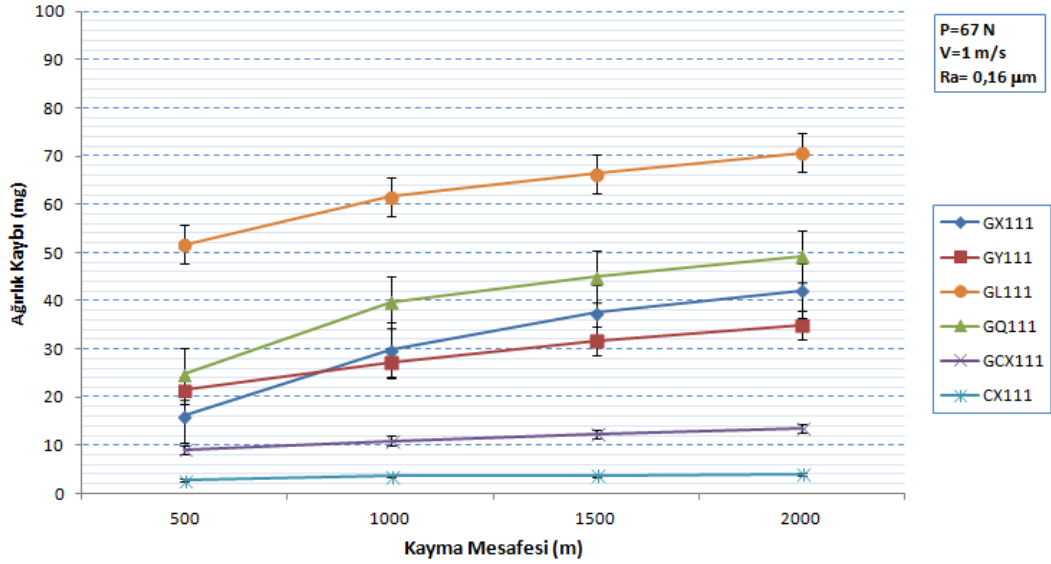
Her malzeme tipi için farklı parametreler altında toplam sekiz farklı test yapılmış ve her test aşaması için testler c kere tekrarlanarak ortalama sonuç değerleri alınmıştır. Ağırlık kaybı sonuçlarında aşırı fark olması durumunda deneyler tekrar edilmiştir. Elde edilen verilerle aşınma miktarı - kayma mesafesi diyagramları çizilerek birbirleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca 2000 m sonunda, yük 92 N, hız 2 m/s, aşındırıcı diskin yüzey pürüzlülüğü $Ra=0,16 \mu\text{m}$ ve $Ra=0,32 \mu\text{m}$ olduğu durumlar için numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir.

BÖLÜM ALTI

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

6.1 Aşınma Analizi

Aşınma analizlerinde altı farklı kompozit yapının farklı elyaf türü ve diziliminde, 67 N ve 92 N olarak iki farklı yük, 1 m/s ve 2 m/s olarak iki farklı kayma hızı ve $Ra=0,16 \mu\text{m}$ ve $Ra=0,32 \mu\text{m}$ olarak iki farklı aşındırıcı disk yüzey pürüzlülük parametreleri kullanılmıştır. Deneylerde 500m, 1000 m, 1500 m ve 2000 m kayma mesafelerindeki aşınma davranışları incelenmiştir. İncelenen kompozit malzemelerin, elyaf türüne ve dizilimine bağlı olarak aşındırıcı disk ile numune arasındaki alıştırma süresi ve bu süre zarfındaki ağırlık kayıpları, diğer mesafelere ve birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle grafiklerde ilk 500 m 'deki ağırlık kaybı değişimleri değerlendirilmemiştir. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde Şekil 6.1-6.8 ile verilmektedir.



Şekil 6.1 Altı farklı kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları ($P=67 \text{ N}$, $V=1 \text{ m/s}$, $Ra=0,16 \mu\text{m}$).

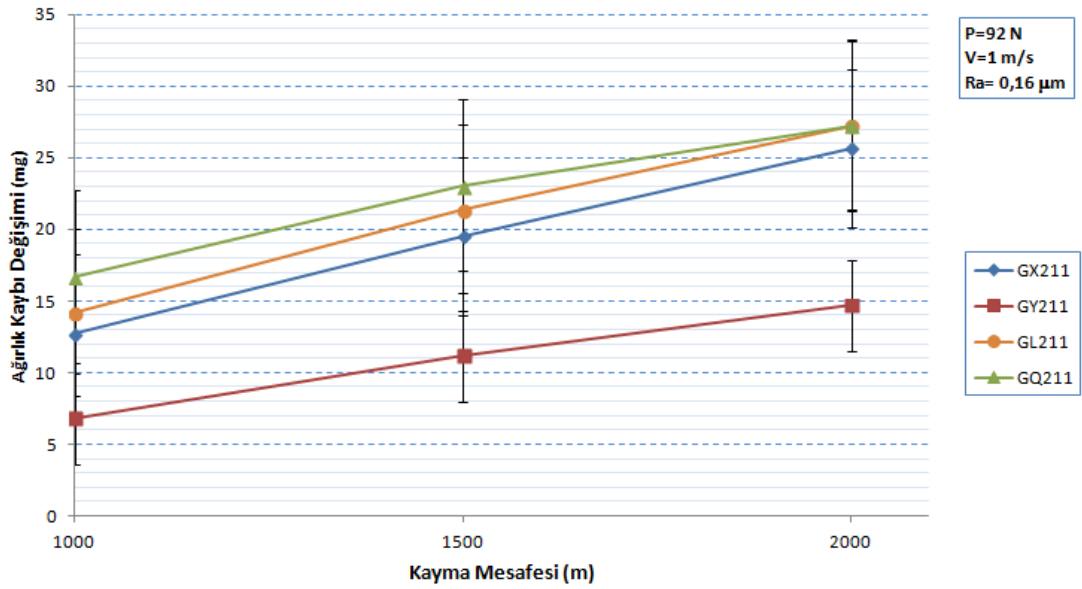
Şekil 6.1 'de görüldüğü gibi ele alınan tüm kayma mesafelerinde en düşük ağırlık kaybı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemede, en fazla ağırlık kaybı ise cam

elyaf takviyeli kompozit malzemelerdedir. Karbon ve cam elyaf (hibrit) takviye elemanlarıyla oluşturulmuş kompozit malzemenin ağırlık kaybı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeye göre yüksek, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere göre oldukça düşük olarak elde edilmiştir. Bu durum kompozit malzemenin tam anlamıyla her iki elyaf takviyesinin özelliklerini taşıdığını göstermektedir. Unutulmamalıdır ki; ele alınan farklı elyaf türüne sahip kompozit malzemelerin elyaf dizilimleri de farklıdır. Bu nedenle elyaf türüne ek olarak, elyaf dizilimlerinin de belirli ölçüde aşınmaya etkisi olacaktır. Karbon elyaf ihtiva eden kompozit malzeme ağırlık kaybının çok daha düşük olması, karbon elyaflarının kendinden yağlama özelliğine, yüksek dayanıma ve katılığa sahip olmasından kaynaklandığı literatürde de yer almaktadır (Suresha, Kumar, Seetharamu, Kumaran, 2010). Hibrit yapı içerisinde karbon elyaf ihtiva ettiği için ağırlık kaybı sadece cam elyaf yapılarına göre daha düşük elde edilmiştir.

Ayrıca sadece karbon elyaf içeren kompozit malzeme farklı kayma mesafelerinde ağırlık kaybı değerleri açısından incelendiğinde bu değerler çok fazla değişmediği hatta 1000 m kayma mesafesinden sonra hemen hemen sabit kaldığı sonucu elde edilmiştir. Sadece cam elyaf ihtiva eden kompozit malzemelerde ise farklı kayma mesafelerinde, farklı ağırlık kayıpları elde edilmiş fakat 1000 m den sonra ağırlık kaybı değişimi aynı oranda artış göstermiştir. Hibrit yapı, içerisinde cam elyaf ihtiva ettiği için farklı kayma mesafelerinde ağırlık kaybı lineer olarak değişmekte fakat bu değişim oranının sadece cam elyaf içeren yapılara kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir.

Elyaf türünün yanı sıra elyaf diziliminin aşınmaya etkisini inceleyebilmek için çalışmada, sadece cam elyaf içeren kompozit yapılar değerlendirilerek bu etki belirlenebilir. Şekil 6.1 dikkate alındığında sadece cam elyaf içeren kompozit malzemelerin 2000 m sonundaki toplam ağırlık kaybı değerlerine bakıldığında 0°/90° (GL) örgü yapısına sahip malzeme için toplam ağırlık kaybı değeri en yüksek olarak elde ediliyorken, -45°/90°/+45° (GY) malzemesinin toplam ağırlık kaybının en düşük olduğu görülmüştür. Toplam ağırlık kaybı miktarı büyükten küçüğe doğru sıralandığında GL>GQ>GX>GY şeklindedir. Bilindiği gibi aşınma direnciyle ağırlık

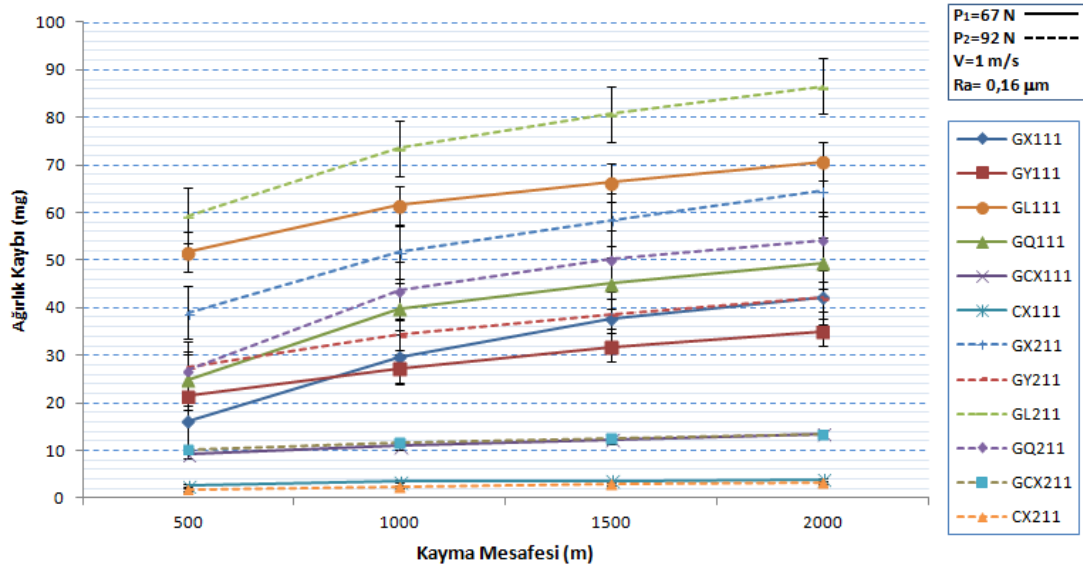
kaybı birbiriyle ters orantılıdır. Bu durumda aşınma dirençleri açısından sıralama yapmak gerekirse $GL < GQ < GX < GY$ olması beklenir. Fakat Şekil 6.1 'den de anlaşılacağı gibi ilk 500 m deki ağırlık kaybının (alışma süresi), 2000 m kayma mesafesi sonundaki toplam ağırlık kaybı üzerinde önemli bir etkisi olmasından dolayı bu değeri önemli ölçüde yükseltmektedir. Fakat 500 m hatta 1000 m sonunda ağırlık kaybı değişimi lineer olmakta ve bu mesafeden sonra ilk 500 m 'ye kıyasla daha düşük ağırlık kaybı değişimleri elde edilmektedir. Bu nedenle aşınma dirençleri kıyaslaması göz önüne alındığında, ilk 500 m 'deki alışma süresinin ağırlık kaybına etkileri göz ardı edilerek değerlendirme yapılması, aşınma direnci faktörünün daha doğru analiz edilmesini sağlayacaktır. Bu durumda Şekil 6.2 'den de görüldüğü gibi farklı dizilime sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma direnci $GY > GL > GQ > GX$ olarak sıralanabilir.



Şekil 6.2 Cam elyafli kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kaybı değişimleri (P=67 N, V=1 m/s, Ra=0,16 µm).

Şekil 6.3 'te diğer parametreler sabit tutulup, sadece yük arttırıldığında en düşük ağırlık kaybının karbon elyaf takviyeli kompozit malzemedeki olduğu ve en fazla ağırlık kaybının ise cam takviyeli kompozit malzemelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum cam elyaf ihtiva eden kompozit malzemelerde yükün arttırılmasıyla, genel olarak aşınma miktarının artmakta olduğu sonucunu

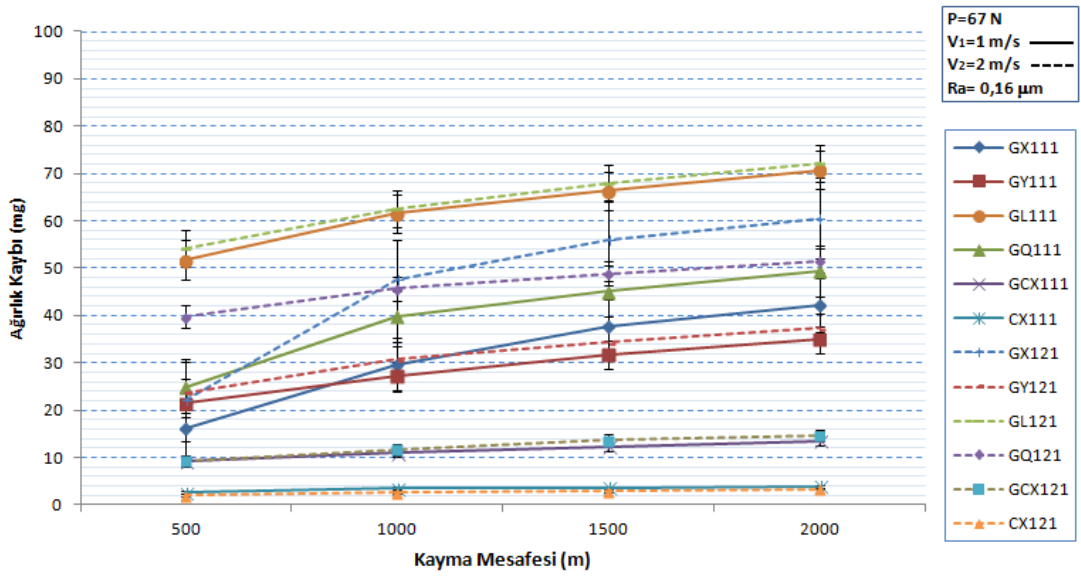
vermektedir. Benzer bir çalışmada cam elyaf takviyesi kullanılarak elde edilen kompozit malzemeler farklı yükler altında aşınma testine tabi tutulmuş ve sonucunda yükün artırılmasıyla ağırlık kaybının arttığı görülmüştür (Pıhtılı, 2009). Ayrıca bu çalışmada, Şekil 6.3 'te görüldüğü gibi farklı yük parametreleri altında yapılan deney sonuçları karşılaştırıldığında, yük parametresinin artırılmasıyla karbon elyaf ihtiva eden kompozit malzemelerin aşınma testleri sonucundaki ağırlık kayıplarında bir değişim olmadığı görülmüştür. Bu durum karbon elyaflarının daha yüksek yük altında çalışabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.3 Altı farklı kompozit malzemenin farklı yük ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması ($P_1=67$ N, $P_2=92$ N, $V=1$ m/s, $Ra=0,16$ μ m).

Yükün artışına karşılık sadece cam elyaf dizilimlerinin toplam ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde, 2000 m kayma mesafesi sonundaki toplam ağırlık kayıpları $GL>GX>GQ>GY$ şeklinde sıralanabilir. 67 N yük altında toplam ağırlık kaybı sıralaması $GL>GQ>GX>GY$ iken, 97 N yük altında bu sıralamada GX ile GQ 'nun yer değiştirdiği görülmektedir. Sonuç olarak, artan yük ile $-45^\circ/+45^\circ$ (GX) elyaf diziliminin aşınma dayanımı azalmış, $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ (GQ) dizilimine sahip cam elyaf yapının aşınma dayanımının tüm kayma mesafesi kademelerinde hemen hemen değişmediği görülmüştür. Bu durum elyaf dizilimin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.4 'te yük ve pürüzlülük parametreleri sabit tutulup, hız değişiminin ağırlık kaybına etkisi incelenmiştir. Grafikte yine en düşük ağırlık kaybının karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde olduğu ve en fazla ağırlık kaybının ise cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, seçilen kayma hızlarında elyaf türündeki farklılığın aşınma dayanımı üzerinde önemli derecede bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

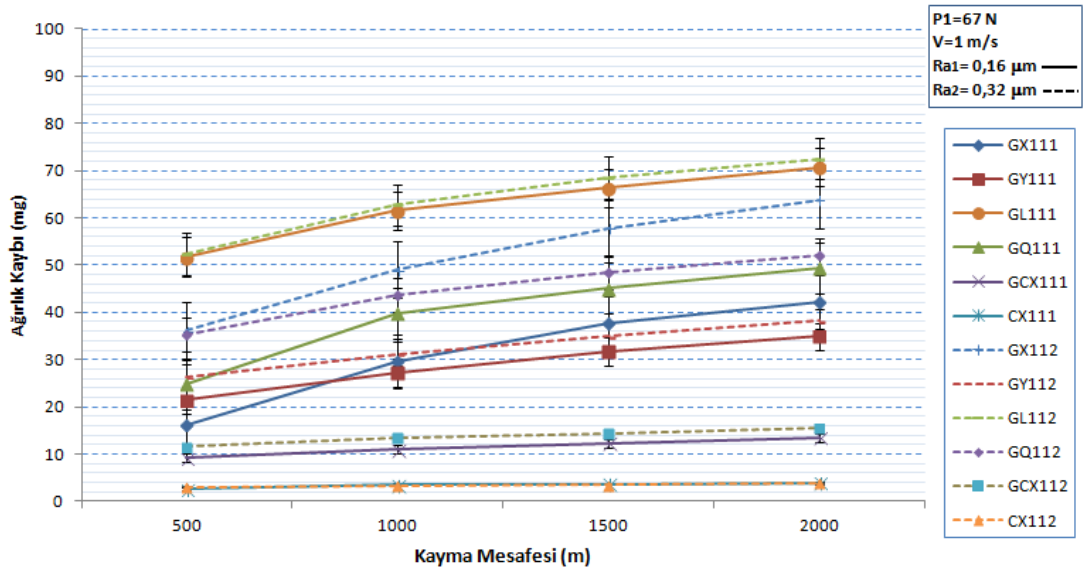


Şekil 6.4 Altı farklı kompozit malzemenin farklı hız ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması ($P=67$ N, $V_1=1$ m/s, $V_2=2$ m/s, $Ra=0,16$ μ m).

Genel olarak, hızın artışıyla toplam ağırlık kaybında az da olsa artış söz konusudur. Benzer bir çalışmada (Pıhtılı, Tosun, 2002), cam elyaf takviyesi kullanılarak elde edilmiş kompozit malzemeler farklı hız ve yükler altında ayrı ayrı aşınma testlerine tabi tutulmuş ve testler sonunda her iki parametrenin ağırlık kaybını arttırdığı gözlemlenmiştir. Fakat hız artışının ağırlık kaybına etkisinin, yük parametresine oranla çok düşük olduğu da belirlenmiştir.

Hızın artışına karşılık sadece cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin elyaf dizilimlerinin toplam ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde, 2000 m kayma mesafesi sonundaki toplam ağırlık kayıpları $GL > GX > GQ > GY$ şeklinde sıralanabilir. Bu

durum Şekil 6.1 'de ele alınan 1 m/s hız altında yapılan analiz sonuçlarıyla hemen hemen aynıdır. Özellikle, GL ve GY malzemeleri için farklı kayma mesafelerindeki toplam ağırlık kaybı değerleri ile hızın 1 m/s olarak alındığı analiz sonuçları büyük oranda örtüşmektedir. Ancak GQ ve GX dizilimlerinde hızın değişmesiyle aşınma dirençleri ve buna bağlı olarak ağırlık kayıplarındaki değişimlerin birbirine göre farklılık gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Bu durum, farklı yük altında yapılan Şekil 6.3 'te grafiği verilen analiz sonucuyla benzerdir.

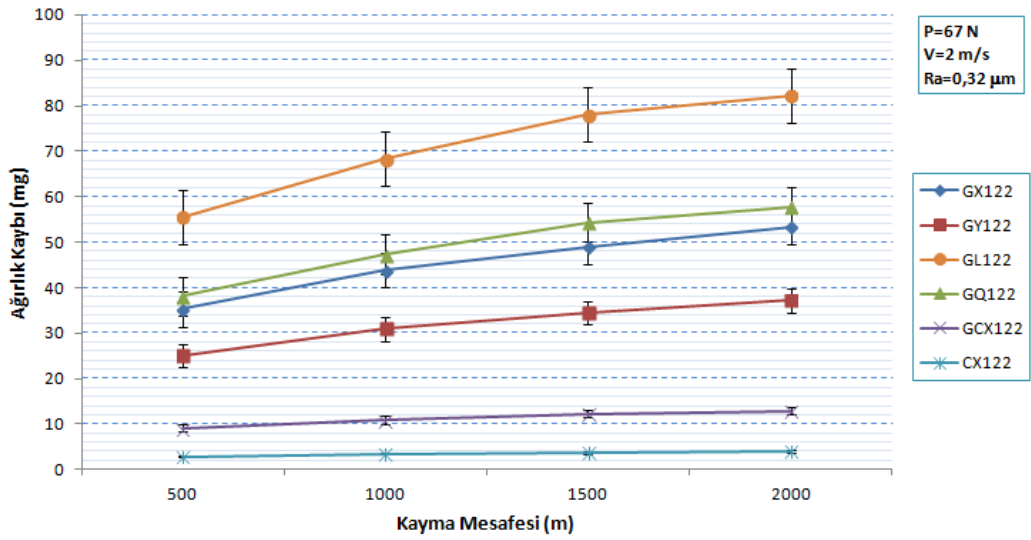


Şekil 6.5 Altı farklı kompozit malzemenin farklı pürüzlülük değeri ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=67 N, V=1 m/s, Ra₁=0,16 µm, Ra₂=0,32 µm).

Şekil 6.5 'te yük ve hız parametreleri sabit tutulup aşındırıcı disk yüzey pürüzlülük değeri değişiminin ağırlık kaybına etkisi incelenmiştir. Grafikte görüldüğü gibi yine en düşük ağırlık kaybı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde ve en fazla ağırlık kaybı ise cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde meydana gelmiştir. Bu durum, seçilen pürüzlülük değerlerinde, farklı elyaf türlerine sahip kompozit malzemelerin aşınma dayanımları üzerine önemli derecede bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

Pürüzlülük değerinin artışına karşılık sadece cam elyaf ihtiva eden kompozit malzemelerin elyaf dizilimlerinin toplam ağırlık kaybına etkisi incelendiğinde, 2000 m kayma mesafesi sonundaki toplam ağırlık kayıpları GL>GX>GQ>GY

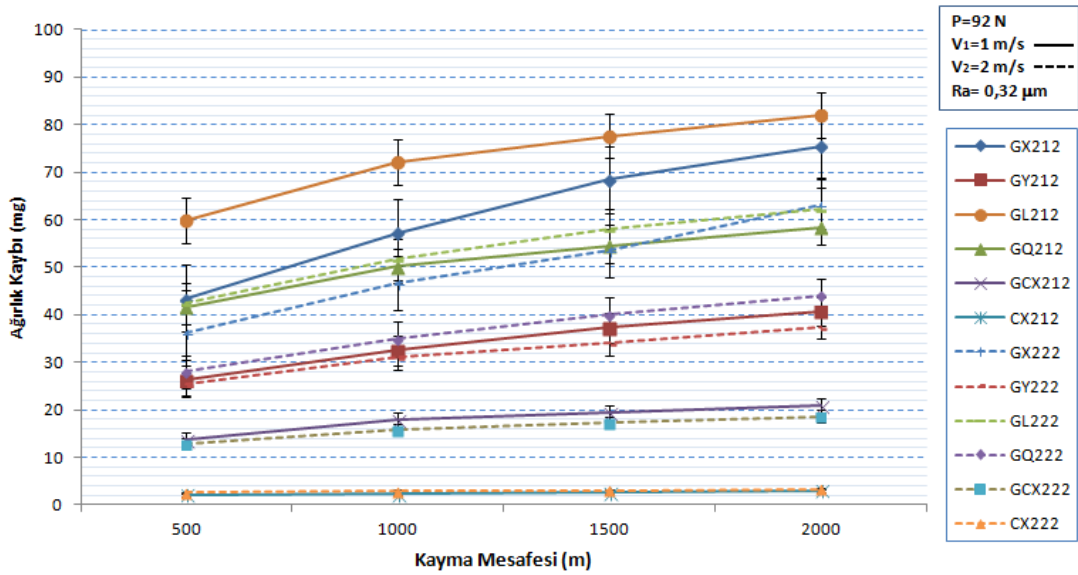
şeklinde sıralanabilir. Bu durum, Şekil 6.4 'de ele alınan $Ra=0,16 \mu\text{m}$ ortalama yüzey pürüzlülük değeri altında yapılan analiz sonuçlarıyla aynıdır. Bu durumda seçilen pürüzlülük değerinin toplam ağırlık kaybı üzerine etkisi hız parametresinin değişimiyle elde edilen sonuçlardaki gibi ihmal edilebilecek kadar az olduğu sonucuna varılmaktadır. Şekil 6.1 'e kıyasla cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde genel olarak ağırlık kaybında bir değişim gözlemlenmezken, GX kompozitinde en fazla ağırlık kaybı değişimi görülmüş ve buna ek olarak hibrit yapıda da bir miktar artış gözlemlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin homojen bir yapıya sahip olmamasından dolayı bu durumun meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 6.6 Altı farklı kompozit malzemenin farklı kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları ($P=67 \text{ N}$, $V=2 \text{ m/s}$, $Ra=0,32 \mu\text{m}$).

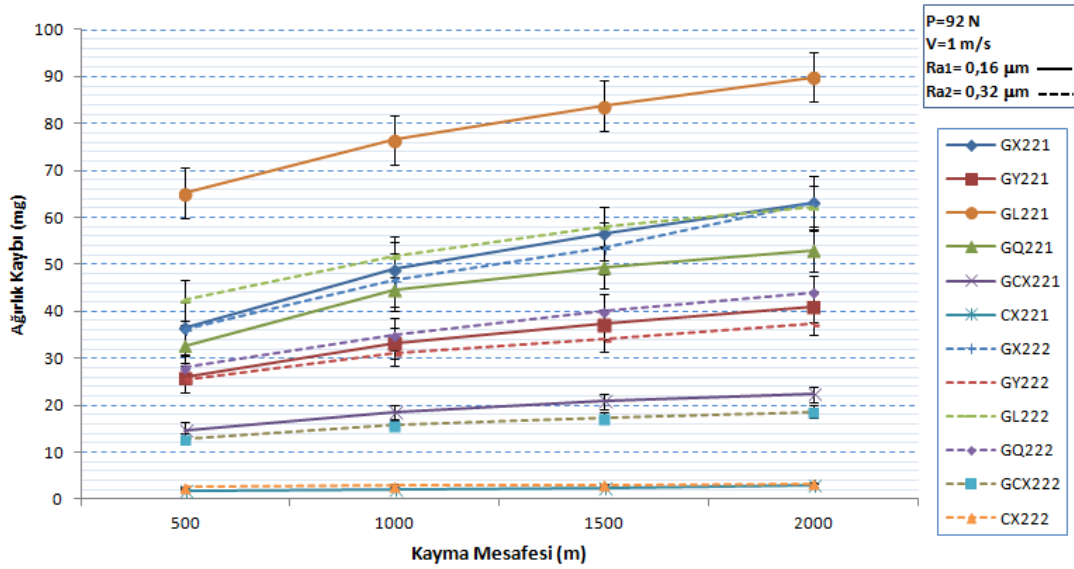
Şekil 6.6 'da verilen kayma mesafesi – ağırlık kaybı grafiği Şekil 6.5 ile karşılaştırıldığında karbon elyaf içeren kompozit malzemelerde, çalışmada ele alınan pürüzlülük ve hız değerleri için tüm kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları ve hatta değişimleri üzerine bir etkisi olmadığı görülmektedir. Kompozit malzemeler sadece cam elyaf takviyesi açısından değerlendirildiğinde ise hız ve pürüzlülük parametreleri açısından birbirine kıyasla farklı sonuçlar göstermektedir. GL kompozit malzemesi hız parametresi yönünden değerlendirildiğinde tüm kayma mesafelerinde ağırlık kaybı ve hatta değişimi açısından farklılık göstermemektedir. Fakat bu malzeme yüzey pürüzlülük parametresi açısından değerlendirildiğinde ilk

500 m deki ağırlık kayıpları aynı olmasına rağmen 2000 m sonundaki toplam ağırlık kayıplarında önemli ölçüde farklar olduğu görülmektedir. GY kompozit malzemesi hız parametresi açısından ele alındığında, GL malzemesinde olduğu gibi önemli ölçüde bir değişim göstermemekle beraber pürüzlülük parametresi açısından değerlendirildiğinde ise tüm kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları ve hatta ağırlık kaybı değişimlerinde bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum, GY malzemesinde hızın ve aşındırıcı diskin yüzey pürüzlülük değerleri değişiminin ağırlık kaybı üzerinde etkisi olmadığını göstermiştir. GQ malzemesi hız parametresi açısından ele alındığında, düşük hızda ilk 1000 m ‘deki her iki aşınma kademesinde ağırlık kaybının daha düşük olduğu görülmekte, sonraki kayma mesafelerinde ise ağırlık kaybı değişimlerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Fakat GQ malzemesi yüzey pürüzlülük parametresi açısından ele alındığında 1000 m ye kadar hemen hemen aynı olduğu, sonraki aşınma kademelerinde ise pürüzlülük değerinin artışıyla ağırlık kayıplarının az da olsa arttığı görülmüştür. GX malzemesi yüzey pürüzlülük parametresi açısından değerlendirildiğinde tüm kayma mesafelerinde ve toplam ağırlık kaybında birbirine göre farklı davranış göstermekte ve pürüzlülük değeri attıkça ağırlık kaybının da arttığı gözlenmiştir. GX malzemesini hız parametresi açısından değerlendirildiğinde ise hız arttıkça toplam ağırlık kaybının azaldığı sonucu elde edilmiştir.



Şekil 6.7 Altı farklı kompozit malzemenin farklı hız ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=92 N, $V_1=1$ m/s, $V_2=2$ m/s, $R_a=0,32$ µm).

Şekil 6.7 'de yük ve pürüzlülük parametreleri sabit tutulup hızın değişiminin ağırlık kaybına etkisi incelenmiştir. Kıyaslama sonucunda hız parametresinin artmasıyla birlikte her bir aşınma kademesinde, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin ağırlık kaybında önemli değişiklik gözlenmezken diğer tüm cam elyaf içeren kompozit malzemelerin toplam ağırlık kayıplarında azalma görülmektedir. Bu sonuç, yukarıdaki Şekil 6.4 'te yer alan grafiklerin kıyaslanmasıyla elde edilen sonucun aksini vermiştir. Bunun nedeninin değişen diğer yük ve pürüzlülük parametrelerinin aşınma mekanizması üzerinde yarattığı etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer sonuçlara Yaşar ve Arslan (2000) 'ın yaptığı çalışmalarda da rastlanmaktadır.



Şekil 6.8 Altı farklı kompozit malzemenin farklı pürüzlülük değeri ve kayma mesafelerindeki ağırlık kayıpları karşılaştırması (P=92 N, V=1 m/s, Ra₁=0,16 µm, Ra₂=0,32 µm).

Şekil 6.8 'deki grafikler karşılaştırıldığında artan yüzey pürüzlülük değeri ile birlikte her bir aşınma kademesinde, karbon elyaf takviyeli ve cam elyaf ihtiva eden GX kompozit malzemelerin ağırlık kayıplarında önemli değişiklik gözlenmez iken diğer tüm cam elyaf içeren kompozit malzemelerin ağırlık kayıplarında azalma saptanmıştır. Bu sonuç, yukarıda pürüzlülük parametresinin etkisini görmek için yapılan Şekil 6.5 'teki grafiklerinin kıyaslaması sonucuyla örtüşmemektedir. Bu durumun artan pürüzlülük değeri ile aşınma testi sırasında kompozit yapıdan ayrılan matris tozlarının, aşındırıcı diskin pürüzlü yüzeyindeki gözenekleri doldurup disk

yüzeyinde polimer film oluşumu ve bunun sonrasında sürtünme mekanizmasının polimer-polimer sürtünmesine dönüşüp, bu durumun da aşınma miktarını azaltma yönünde etki etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yaşar ve Arslan (2000) 'ın yaptığı benzer çalışmada da sürtünmenin polimer-polimer sürtünmesine dönüşmesinin aşınma hızını azaltma yönünde etki ettiği görülmüştür.

Buradaki parametrelerin ağırlık kaybına etkilerini daha detaylı olarak analiz edilebilmesi için SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir.

6.2 SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Aşınma yüzeylerinin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak aşınma davranışları hakkında daha iyi yorum yapabilmek için Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalürji Ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında JEOL JSM-6060 taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.

Bu çalışmada, yük değerinin 92 N ve kayma hızının 2 m/s olduğu iki farklı aşındırıcı disk yüzey pürüzlülük değeri ($R_a=0,16 \mu\text{m}$ ve $R_a=0,32 \mu\text{m}$) parametreleri kullanılarak yapılan altı farklı kompozit malzemenin aşınma testleri sonunda elde edilen numune yüzeylerinin SEM görüntüleri alınarak analiz edilmiştir. SEM görüntüleri toplam 2000 m kayma mesafesinde aşınma testine tabi tutulmuş numune yüzeylerinden alınmıştır. Farklı aşındırıcı disk yüzey pürüzlülük değerlerinde yapılmış aşınma testleri sonucunda hemen hemen ele alınan tüm kompozit malzemelerde pürüzlülük değerinin artmasıyla tüm kayma mesafesi kademelerinde ağırlık kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle bu parametrenin farklı kompozit yapıların aşınma davranışları üzerine etkileri mikro ölçekte, daha detaylı olarak incelemek için SEM görüntüleri alınmıştır.

SEM analizi öncesi polimer matrisli kompozit numunelerin iletkenliğini arttırmak için numuneler asetonla temizlendikten sonra aşınma yüzeyleri Au/Pd (Altın-Paladyum) ile kaplanmıştır.

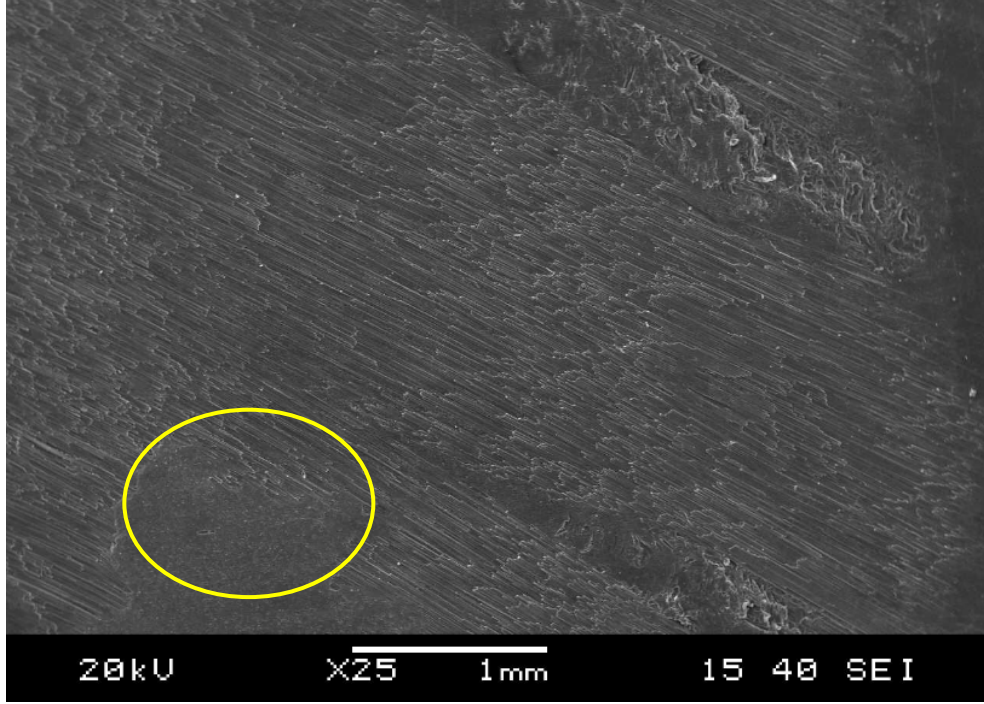


Şekil 6.9 Au/Pd kaplama öncesi kompozit numunelerinin aşınma yüzeylerinin görünüşü.

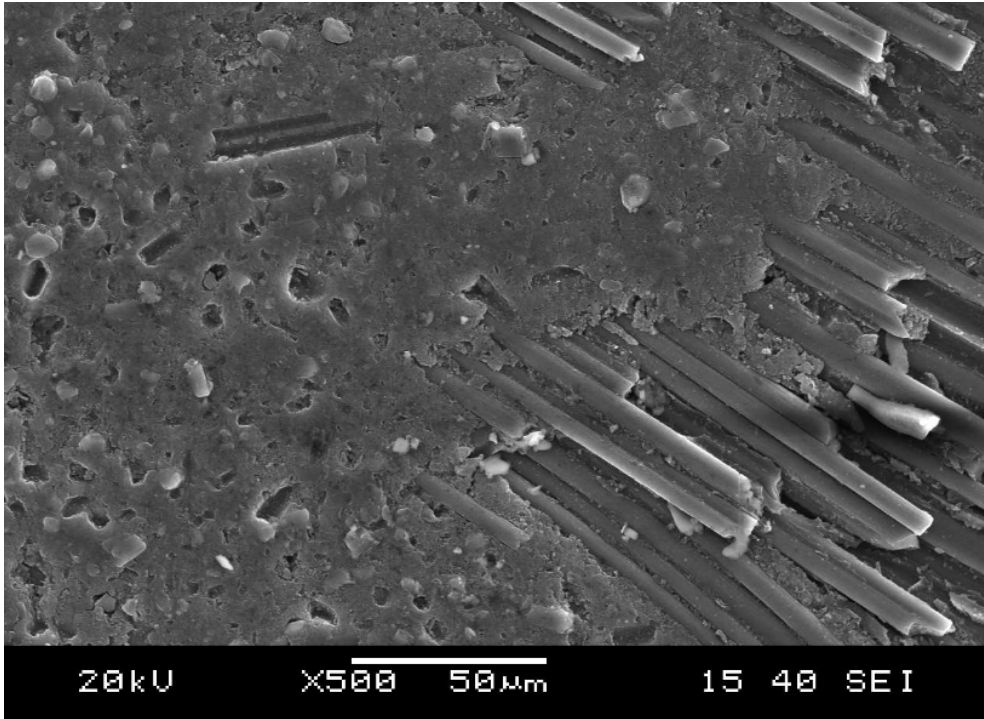


Şekil 6.10 Au/Pd kaplama sonrası kompozit numunelerinin aşınma yüzeylerinin görünüşü.

Aşınma testlerinde kayma süresince hem adhezif hem de abrazif aşınma mekanizmalarının etkisiyle toz şeklinde aşınma kalıntıları meydana gelmektedir. Numune ile aşındırıcı disk ara yüzeyinde sürtünme sonucu ortaya çıkan sürtünme ısısı matris malzemesinin termal yumuşamasına sebep olur ve bazı toz şeklindeki aşınma kalıntıları matris içerisine gömülür ve koruyucu bir tabaka oluşturur (Suresha, Kumar, Seetharamu, Kumaran, 2010).



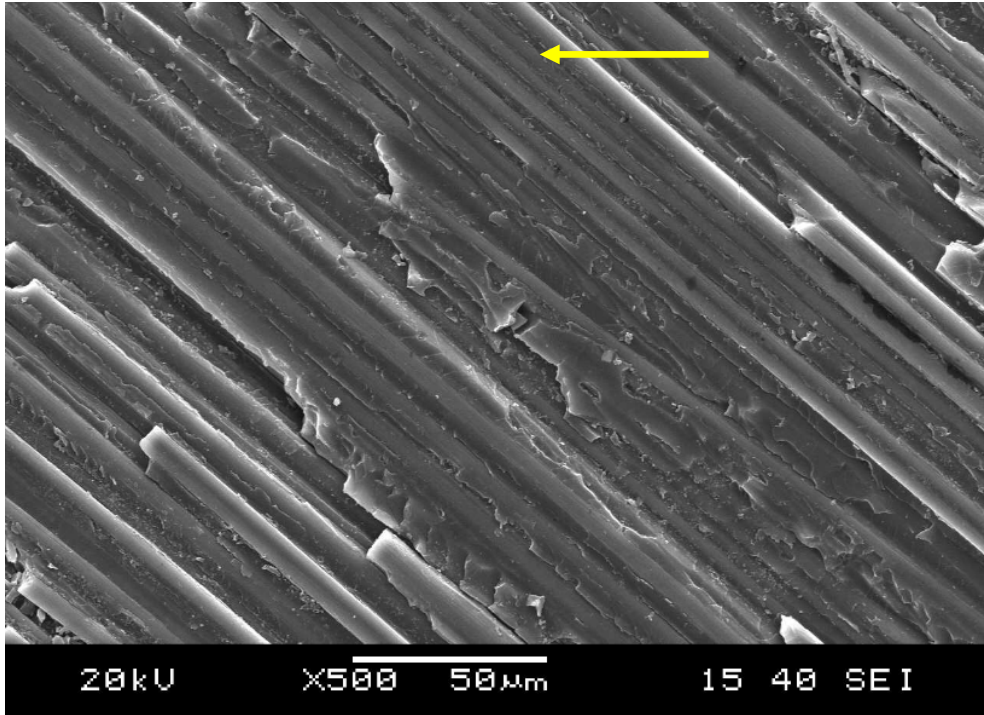
Şekil 6.11 CX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X25 büyütme).



Şekil 6.12 CX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme).

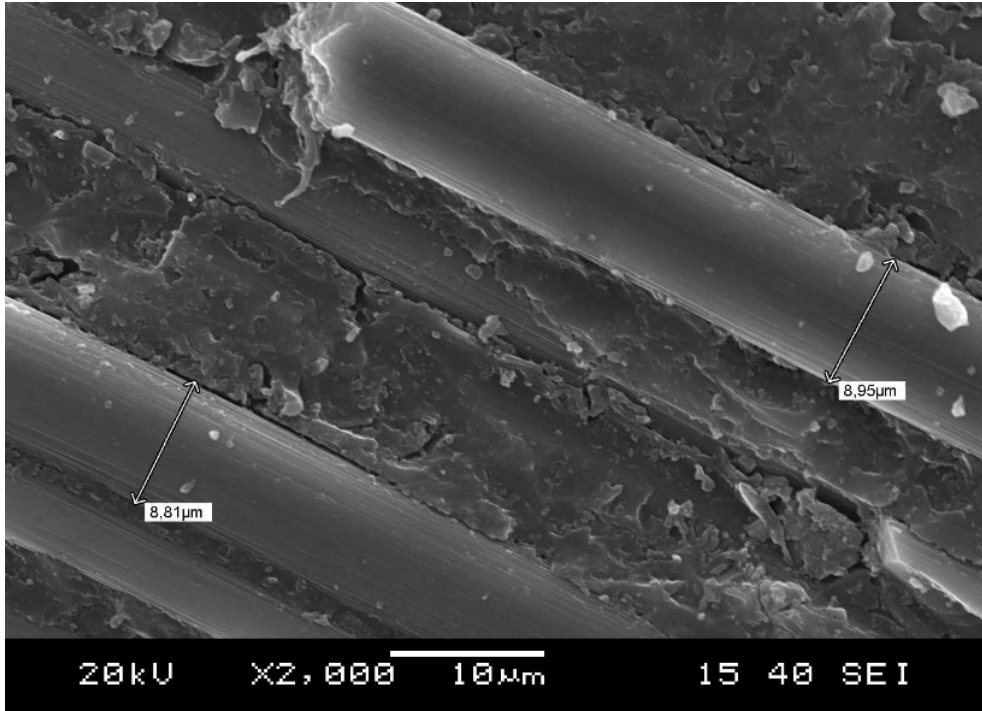
Karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli (CX) kompozit numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda alınan SEM görüntüleri Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 'de verilmiştir. Şekil 6.11 'de çember içinde belirtilen bölge Şekil 6.12 'de X500 büyütmede verilmiştir. Burada aşınma testi süresince numune yapısından ayrılan toz şeklindeki karbon elyaf ve matris kalıntılarından oluşan koruyucu tabaka görülmektedir. Bir önceki alt başlıkta incelenen aşınma performansı analizlerinde karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performansının en yüksek çıkmasının sebeplerinden bir tanesinin bu koruyucu film tabakasının olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.13 'te karbon elyaf takviyeli (CX) kompozit numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Ok yönü diskin kayma yönünü göstermektedir. Şekilde, karbon elyaflarında küçük kopmalar gözlenmesinin yanı sıra, elyafların reçineye iyi bir şekilde tutunduğu, reçinenin elyafları iyice sararak mekanik hasara (aşınma) karşı koruma görevini yerine getirdiği görülmektedir.



Şekil 6.13 CX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme).

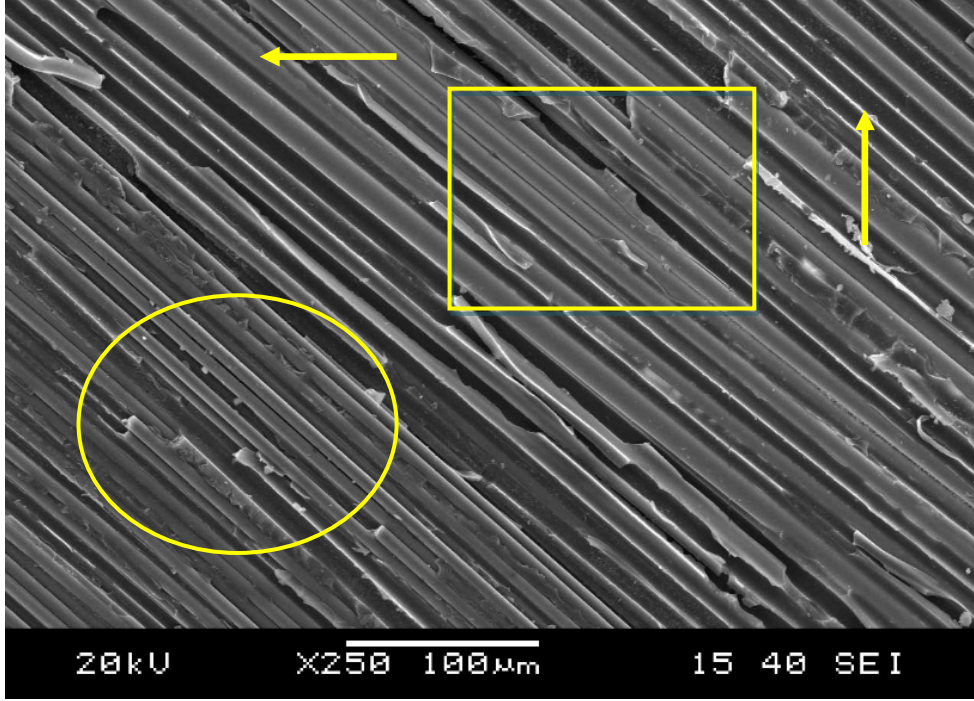
Şekil 6.14 'te karbon elyaf takviyeli (CX) kompozit numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X2000 büyütmede SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde elyaf yüzeyi mikro yapısına bakıldığında karbon elyaf yüzeyinin pürüzlü dokusu görülmektedir. X2000 büyütmede SEM cihazıyla yapılan ölçüm sonucunda karbon elyafların çapı yaklaşık 9 μm olduğu görülmüştür.



Şekil 6.14 CX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X2000 büyütme).

Şekil 6.15 'te karbon ve cam elyaf takviyeli (GCX) hibrit kompozit numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X250 büyütmede SEM görüntüsü verilmiştir. Bu görüntüde iki ayrı bölge görülmektedir. Birincisi dikdörtgen içine alınan cam elyaf takviyesinin olduğu bölge, diğeri ise çember ile belirtilen karbon elyaf takviyesinin olduğu bölgedir. Yatay ok ile diskin kayma yönü gösterilmiştir. Düşey okla işaret edilen bölgede, toplam 2000 m kayma mesafesinde, uygulanan yük ve kayma hızı parametreleri altında yapılan aşınma testleri sonunda cam elyafların bütün halde matris yapıdan ayrıldığı görülmektedir. Kompozit yapıdan büyük parçalar halinde

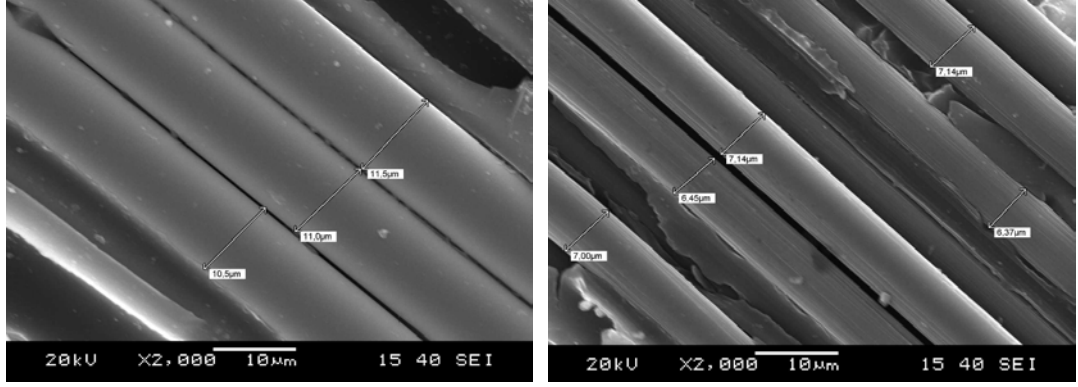
ayrılan cam elyaflar, aşınma testleri sonunda ölçülen ağırlık kaybı miktarının fazla olmasına sebep olarak, kompozit yapının aşınma performansını olumsuz etkilediği görülmüştür.



Şekil 6.15 GCX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).

Hibrit elyaf takviyeli kompozit yapıların aşınma performansı incelendiğinde, karbon elyaf takviyeli (CX) kompozit malzemelere göre daha düşük, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin aşınma performanslarından daha iyi olduğu bir önceki alt başlıkta görülmüştür. Bunun sebebinin, cam elyafların aşınma performansı ve kompozit yapı içerisindeki elyafların matrise tutunma şekliyle kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.16 (a) cam elyafların X2000 büyütmedeki görüntüsü verilmiştir. Görüntüde elyaf yüzeyi mikro yapısına bakıldığında cam elyafların pürüzsüz yüzeyi görülmektedir. X2000 büyütmede SEM cihazıyla yapılan ölçüm sonucunda karbon elyafların çapı yaklaşık 9 µm, cam elyafların çapı ise yaklaşık 12 µm olduğu görülmüştür.

Karbon elyaf yüzeyi mikro yapısına bakıldığında pürüzlü dokusu görülmektedir (Şekil 6.16 (b)).

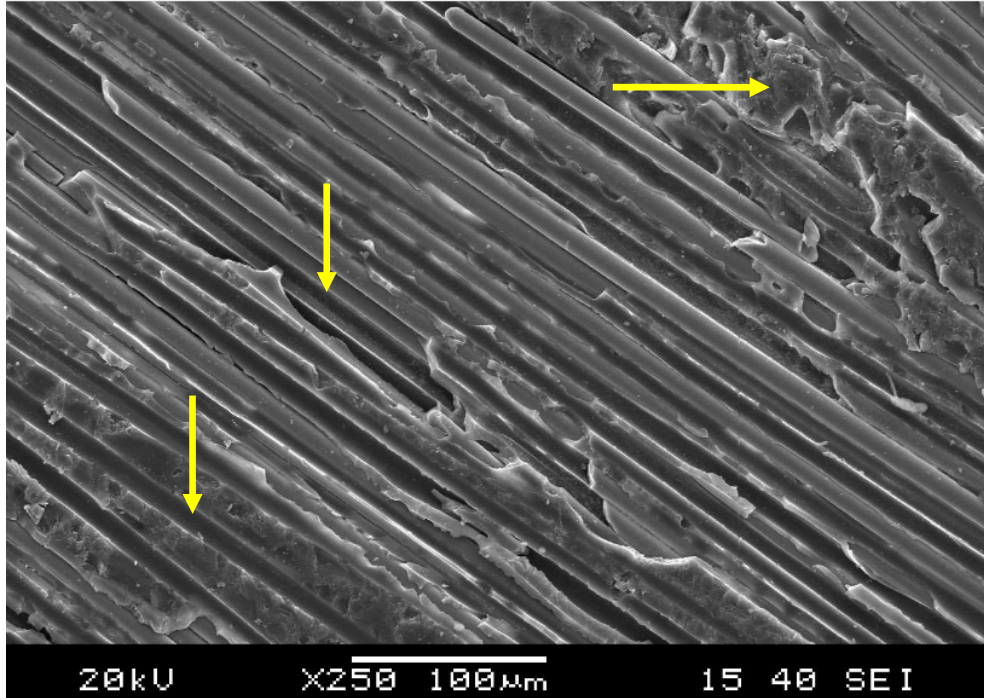


(a)

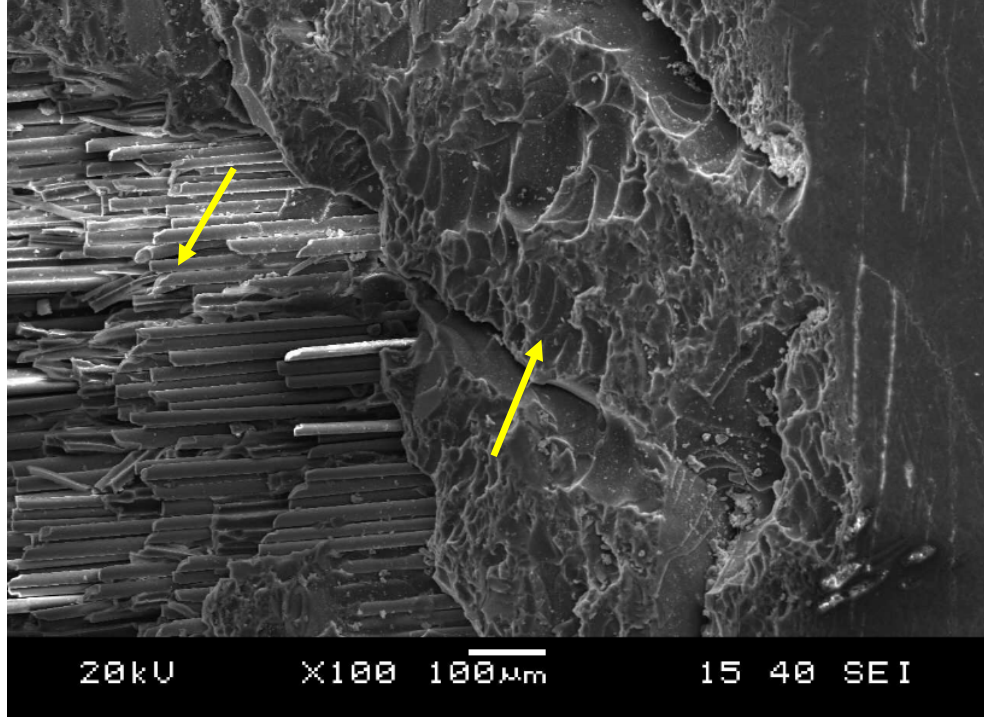
(b)

Şekil 6.16 GCX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X2000 büyütme), (a) Cam elyaf yüzeyi (b) Karbon elyaf yüzeyi.

Şekil 6.17 'de aşınma testleri sonrasında yapıdan büyük halde ayrılan cam elyafların matris malzemesinde bıraktığı izler dikey yöndeki oklarla işaret edilmiştir. Yatay ok ile belirtilen bölgede ise matris birikmesi görülmekte ve yapının homojen bir şekilde olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.17 GCX numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,32$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).

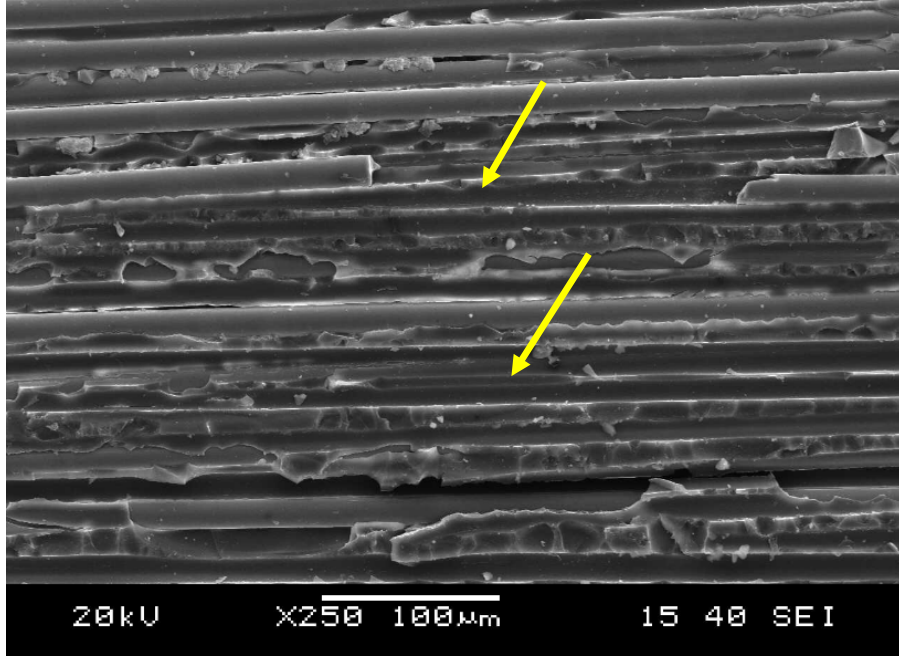


Şekil 6.18 GL numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme).

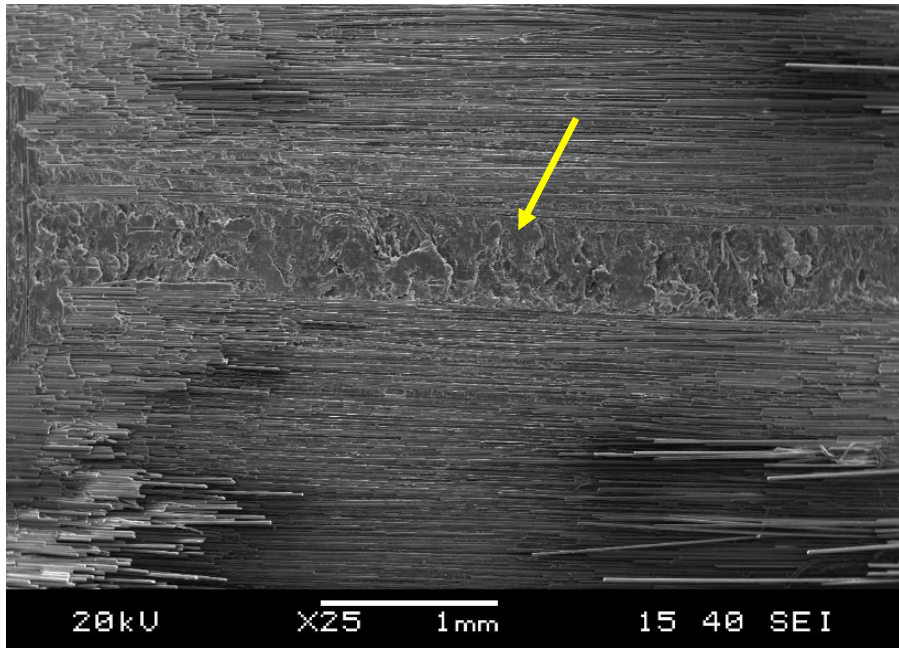
Sürtünme ve ağırlık kaybını etkileyen temel parametreler uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesidir. Normal yük, kayma hızı ve aşındırıcı disk yüzey pürüzlülük değerinin, altı farklı kompozit malzemenin aşınma testleri sonrasındaki, ağırlık kaybı üzerine etkisi bir önceki alt başlıkta incelenmiştir.

Aşınma, elyaf takviye elemanlarından ziyade epoksi reçinede meydana gelmektedir. Şekil 6.18 'de $0^\circ/90^\circ$ elyaf dizilimine sahip cam elyaf takviyeli (GL) kompozit numunesinin $P=92$ N, $V=2$ m/s, $Ra=0,16$ μm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X100 büyütmede SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüde, ilk aşınma kademesinde matris malzemesinin yapıdan ayrılarak büyük bir ağırlık kaybına yol açtığı görülmektedir. Bir önceki alt başlıkta incelenen kompozit yapıların ağırlık kaybı analizleri sonucunda toplam ağırlık kaybının en fazla olduğu yapının GL olduğu görülmüş ve bu toplam ağırlık kaybının büyük bir kısmının ilk 500 m aşınma kademesinde (alışma süresi) gerçekleştiği vurgulanmıştır. Şekil 6.18 'de elde edilen görüntü bu sonucu desteklemektedir. Benzer bir çalışmada, cam elyaf takviyesi kullanılarak elde edilen

kompozit malzemeler farklı yükler altında aşınma testine tabi tutulmuş ve sonucunda aşınmanın elyaf takviyesinden ziyade matris malzemesinde meydana geldiği görülmüştür (Pıhtılı, 2009).



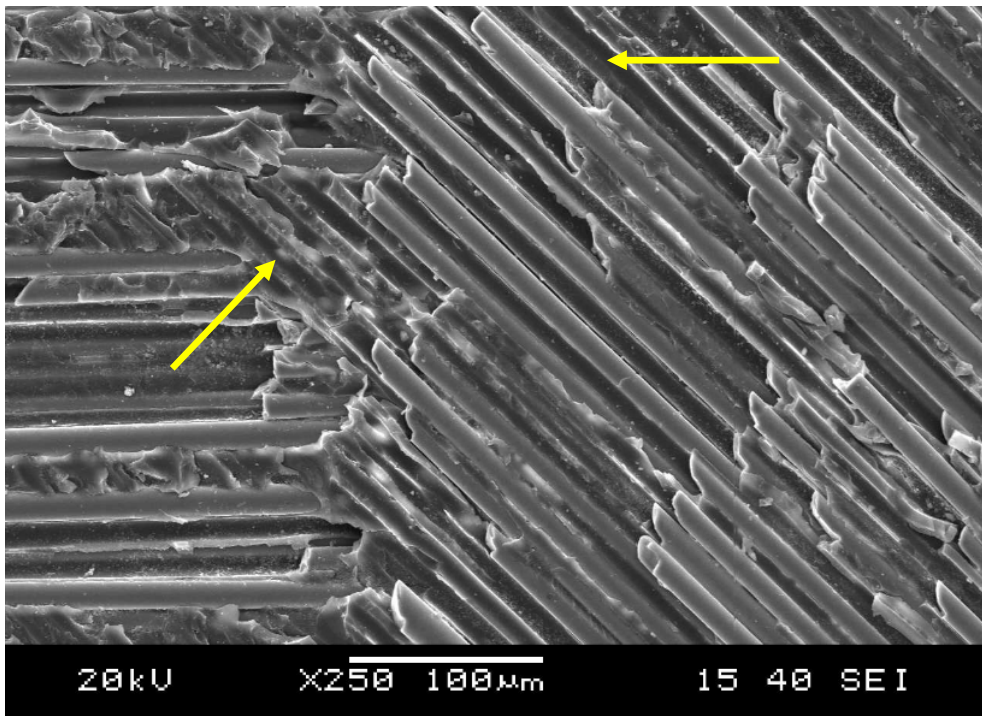
Şekil 6.19 GL numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).



Şekil 6.20 GL numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X25 büyütme).

Şekil 6.19 'da GL numunesinin aşınma testleri sonunda, kompozit yapıdan uzun bir şekilde ayrılan cam elyafların, matris üzerinde kalan izleri görülmektedir. Elyafların yapıdan büyük parçalar halinde ayrılması, ağırlık kaybı miktarının fazla olmasına sebep olarak, kompozit yapının aşınma performansını olumsuz etkilemiştir.

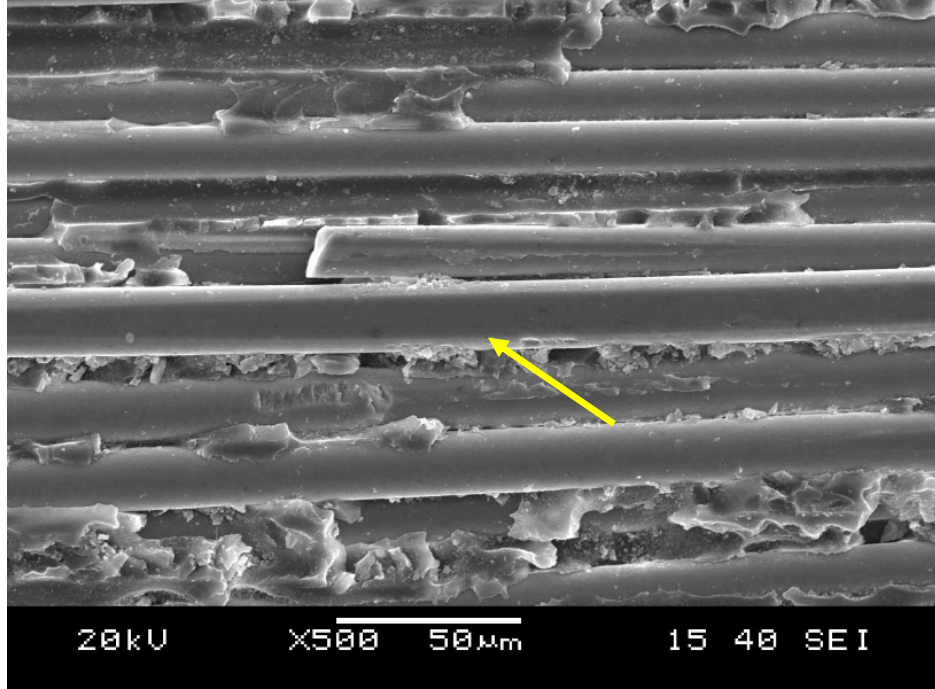
Şekil 6.20 'de GL numunesinin aşınma testleri sonunda, ok ile işaret edilen bölgede matris birikmesi görülmüş, kompozit yapıyı oluşturan reçine ve elyafların yapı içerisindeki dağılımlarının homojen bir şekilde olmadığı anlaşılmıştır.



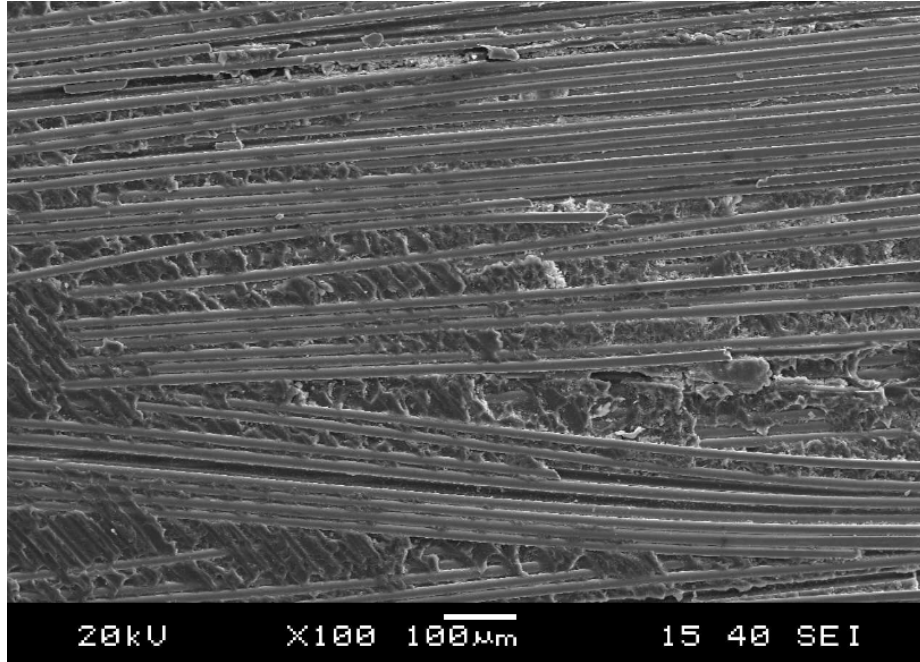
Şekil 6.21 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).

Büyük yüklerde, aşınma sonucu yapıdan ayrılan matris elemanı, elyaflı bölgenin açıkta kalarak kayma temas aşınmasına sebep olduğu kadar elyaf kırılmalarına sebep olmaktadır (Pıhtılı, 2009). Şekil 6.21 'deki GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X250 büyütmedeki SEM görüntüsünde, kompozit yapıdan ayrılan matris malzemesinin elyafları açıkta bırakması, elyafları mekanik hasara karşı koruyamadığı ve sonunda elyaf kırılmalarının gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 6.22 'deki görüntüde ise hem elyaf aşınma yüzeyi hem de elyaf kırılmaları görülmektedir.

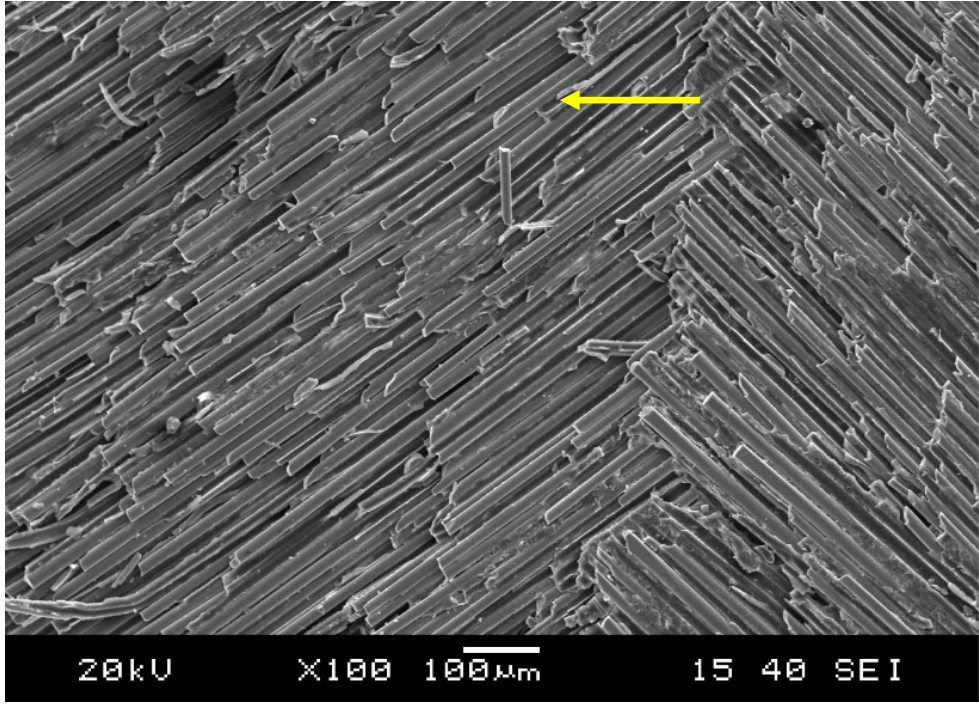


Şekil 6.22 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,16 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme).



Şekil 6.23 GQ numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme).

Şekil 6.23 'te GQ numunesinde elyafların yapı içerisinde belirli bir düzende olmadığı ve matris birikmesinin olduğu bölgeler görülmektedir. Kompozit yapıyı oluşturan reçine ve elyafların yapı içerisindeki dağılımlarının homojen bir şekilde olmadığı anlaşılmıştır. Bu durumun kompozit malzemenin aşınma performansının sürekli aynı olmayabileceği sonucunu göstermektedir.

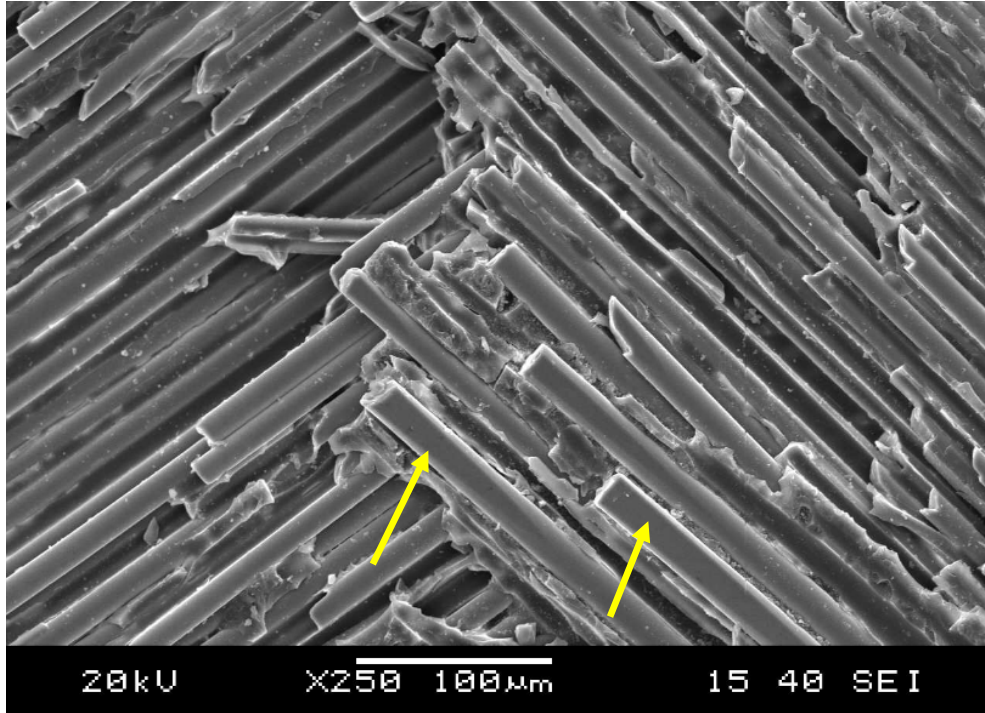


Şekil 6.24 GX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X100 büyütme).

Şekil 6.24 'teki GX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X100 büyütmedeki SEM görüntüsünde ok kayma yönünü göstermektedir. GX kompozit yapı içerisinde cam elyaflar -45°/45° dizilime sahiptirler. Şekil 6.24 ve Şekil 6.25 'teki görüntüde, aşınma yolu üzerindeki ilk -45° katmanındaki elyafların tamamen koptuğu ve yapıdan ayrıldığı, sonrasında alttaki 45° elyaf dizilimine sahip örgü tabakasının aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Elyafların 0° (kayma yönüne paralel) dizilimlerinde aşınma daha çok elyafların çekme gerilmesi sonucu kayma yönünde olduğu, -45°/45° dizilimine sahip elyaflarda aşınma ise elyafların eğme

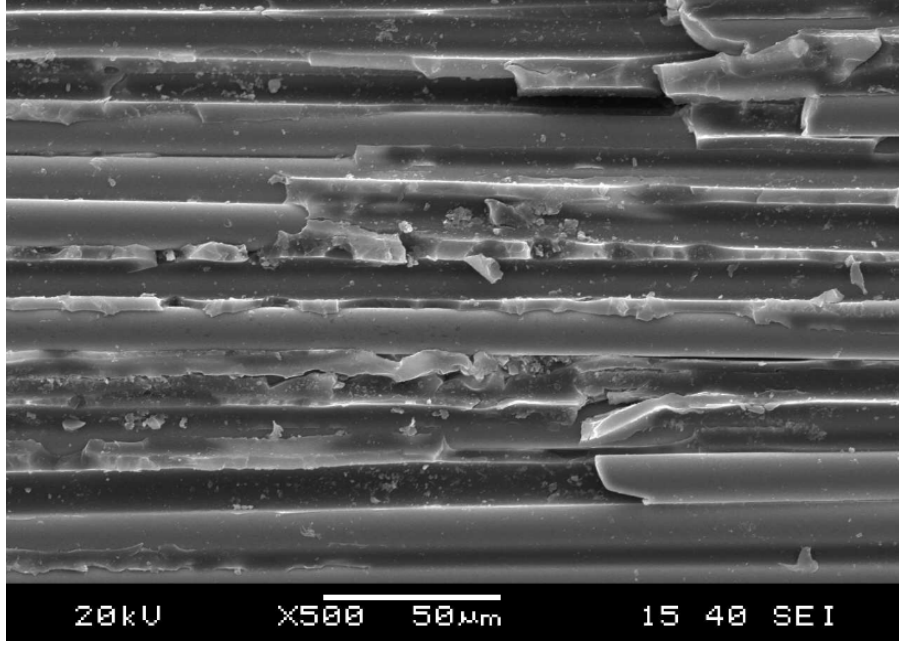
kuvvetinin etkisiyle kırılarak yapıdan ayrılması şeklinde olduğu düşünülmektedir. Benzer bir çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerde elyaf doğrultusunun tribolojik özelliklere etkisi araştırılmış ve kayma doğrultusuna paralel konumda aşınmanın daha çok elyafların çekme sonucu kayma yönünde kopması şeklinde, anti paralel konumda ise aşınmanın elyafların eğme kuvveti etkisiyle kırılarak matris yapıdan uzaklaşması şeklinde olduğu görülmüştür. Elyafların eğme mukavemetinin çekme mukavemetinden daha düşük olması bu durumu ortaya çıkarmaktadır (Yaşar, Arslan, 2000).

Şekil 6.25 'te aşınan elyaf yüzeylerindeki aşınma izleri oklarla gösterilmiştir.



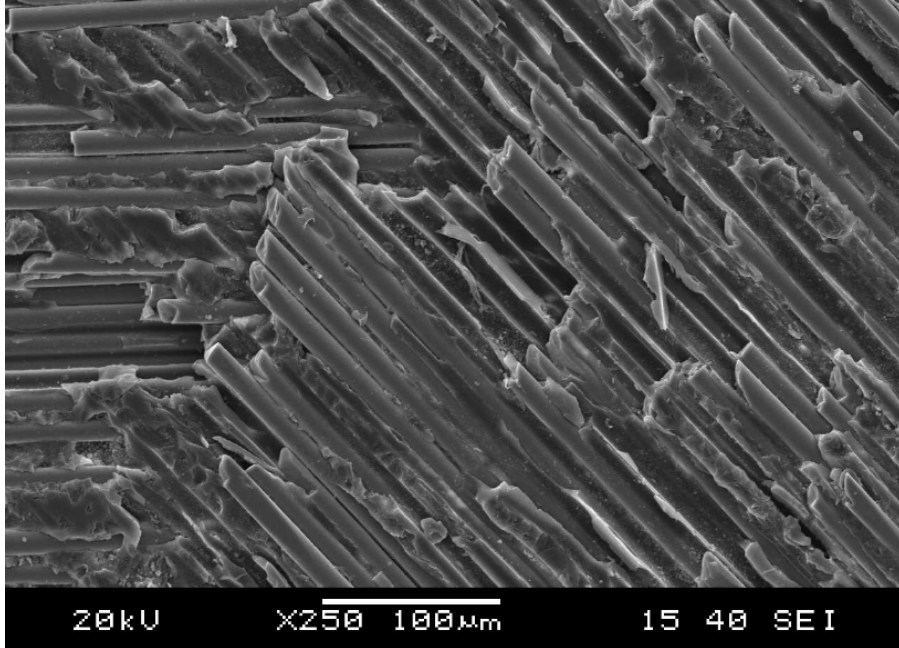
Şekil 6.25 GX numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).

Şekil 6.26 'da GY numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında toplam 2000 m kayma mesafesi sonunda aşınma yüzeyinden alınan X500 büyütmedeki SEM görüntüsünde elyafların bütün bir şekilde koparak yapıdan ayrılması görülmektedir.



Şekil 6.26 GY numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X500 büyütme).

Uygulanan yük ve kayma hızı parametreleri altında aşınan matris malzemesinin elyaflardan ayrılması ve yüzeyde birikinti oluşumunun yanı sıra kırılan elyafların yapıdan ayrılması Şekil 6.27 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.27 GY numunesinin P=92 N, V=2 m/s, Ra=0,32 µm parametreleri altında 2000 m kayma mesafesi sonundaki aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü (X250 büyütme).

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

7.1 Sonuç Ve Öneriler

Bu çalışmada, kuru kayma aşınması şartlarında örgü kumaş şeklinde biaxial cam elyaf ($0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $-45^{\circ}/45^{\circ}$), triaxial cam elyaf ($-45^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}$), quadriaxial cam elyaf ($0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}$), biaxial karbon elyaf ($-45^{\circ}/45^{\circ}$) ve cam ile karbon elyaflardan oluşan biaxial hibrit elyaf ($-45^{\circ}/45^{\circ}$) takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerin aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARIM) kullanılmıştır.

Disk üzerinde blok (block on roller) aşınma test yöntemi kullanılarak, farklı kayma mesafelerinde, farklı yük (67N ve 92N), kayma hızı (1 m/s ve 2 m/s) ve aşındırıcı disk yüzey pürüzlülüğü ($R_a=0,16 \mu\text{m}$ ve $R_a=0,32 \mu\text{m}$) parametrelerinin kombinasyonu altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonunda ağırlık kaybı olarak aşınma miktarları ölçülerek, aşınma performansı analizleri yapılmış ve bu sonuçları daha detaylı incelemek için SEM analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kompozit malzemelerin aşınma performansı, uygulanan yük, kayma hızı, aşındırıcı disk yüzey pürüzlülüğü ve kayma mesafesi gibi parametrelere bağlı olduğu görülmüştür.
- Elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristikleri elyaf malzemesine bağlı olduğu görülmüştür.
- Karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin, tüm kayma mesafelerinde her bir deney parametresi kombinasyonu için aşınma performansı, cam elyaf takviyesi içeren kompozit malzemelere göre çok daha yüksek olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu sonucun, karbon elyaflarının kendinden yağlama özelliğine, yüksek dayanıma ve katılığa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Aşınma testleri sonucunda yapılan incelemelerde, uygulanan yükün kompozit malzemelerin aşınma davranışları üzerindeki etkisi, hız parametresine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Deneyleerde kullanılan aşındırıcı diskin yüzey pürüzlülük değeri parametresinin kompozit malzemelerin aşınma performansı üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.
- Farklı elyaf dizilimine sahip cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kendi aralarında aşınma performansları incelendiğinde, toplam ağırlık kaybı açısından GL kompozit malzemesinin aşınma performansı her durumda en kötü olduğu görülmüştür.
- Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında en iyi aşınma performansı GY malzemesinde olduğu belirlenmiştir.
- Hibrit elyaf takviyeli kompozit yapılarda aşınma performansının, karbon elyafli kompozit yapılara göre düşük, cam elyaf takviyeli yapılara göre yüksek olduğu görülmüş ve her iki elyafın da özelliklerini taşıdığı görülmüştür.
- Aşınma testlerinde kayma süresince hem adhezif hem de abrazif aşınma mekanizmalarının etkisiyle açığa çıkan toz şeklinde aşınma kalıntıları, numune ile aşındırıcı disk ara yüzeyinde sürtünme sonucu ortaya çıkan sürtünme ısı ile birlikte matris malzemesinin termal yumuşamasına sebep olur. Bazı toz şeklindeki aşınma kalıntıları matris içerisine gömülmesiyle oluşan koruyucu tabakanın kompozit malzemelerin aşınma davranışını önemli ölçüde etkilediği düşünülmektedir.
- Aşınma olayı, elyaf ve matris malzemelerinin aşınmasının yanı sıra elyaf kırılması ve kopan elyaf partiküllerinin yapıdan ayrılarak abrazif etkisi ile meydana gelmektedir. Abrazif etkinin artması, aşınma miktarını da arttırdığı düşünülmektedir.

Bu çalışma, yapılan literatür araştırması sonucu incelenen çalışmalarla desteklenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar esas alınarak bundan sonra yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından aşağıdaki öneriler verilebilir.

- Farklı elyaf dizilimine sahip kompozit malzemelerin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmek için aynı elyaf dizilimine sahip farklı elyaf türünden malzemelerin aşınma davranışları incelenebilir.
- Kompozit malzemelerin yataklama elemanı olarak kullanıldığı yerlerde farklı sıcaklıklarda aşınmanın etkisini anlayabilmek için sıcaklık, aşınmayı etkileyen bir parametre olarak incelenebilir.
- Sıcaklığın aşınma üzerine olan etkisini tam olarak anlaşılabilmesi için sıcaklık ölçümü yapılabilir veya sıcaklık kontrol altına alınacak şekilde düzenek tasarlanabilir.
- Bu çalışmada kullanılan takviye elamanları için farklı matris malzemeleri kullanılarak aşınma performansları incelenebilir.
- Bu çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin farklı aşınma ortamlarında (abrazif, yüksek sıcaklık vb.) aşınma performansları incelenebilir.
- Hız parametrelerinin aşınma performansı üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için testler daha farklı hızlarda yapılabilir.
- Kayma mesafeleri daha geniş aralıkta incelenebilir.

KAYNAKLAR

Agarwal, B.D., Broutman, L.J., ve Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis And Performance Of Fiber Composites* (3rd ed.). New Jersey: John Wiley ve Sons, Inc.

Akkurt, M. (1982). *Makine Elemanları Cilt II*. İstanbul: Birsen Kitapevi Yayınları.

Arıcasoy, O. (2006). Kompozit Sektör Raporu. *İstanbul Ticaret Odası Yayınları, 1*, 4-15.

Basavarajappa, S., Ellangovan, S., ve Arun, K.V. (2009). Studies on dry sliding wear behaviour of graphite filled glass-epoxy composites. *Materials And Design, 30*, 2670-2675. Retrieved May 06, 2010, from Elsevir database.

Hufenbach, W.A., Stelmakh A., Kunze, K., Böhm, R., ve Kupfer, R. (2012). Tribomechanical properties of glass fibre reinforced polypropylene composites. *Tribology International, 49*, 8-16. Retrieved May 06, 2012, from Elsevir database.

Jones, M.R. (1999). *Mechanics Of Composite Materials* (2nd ed.). Philadelphia: Taylor ve Francis, Inc.

Kaw, A.K. (2006). *Mechanics Of Composite Materials* (2nd ed.). Boca Raton: CRC press.

Kishore, P., Sampathkumaran, S., Seetharamu, S., Vynatheya, S., Murali, A., ve Kumar, R.K. (2000). SEM observations of the effects of velocity and load on the sliding wear characteristics of glass fabric-epoxy composites with different fillers. *Wear, 237*, 20-27. Retrieved May 06, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.

- Kukureka, S.N., Hooke C.J., Rao, M., Liao, P., ve Chen, Y.K. (1999). The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact. *Tribology International*, 32, 107-116. Retrieved July 23, 2009, from Elsevir database.
- Larsen, T.Q., Andersen, T.L., Thorning, B., ve Vigild, M.E. (2008). The effect of particle addition and fibrous reinforcement on epoxy-matrix composites for severe sliding conditions. *Wear*, 264, 857-868. Retrieved July 23, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.
- Mallick, P.K. (2008). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing And Design* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product End Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Pihtili, H. (2009). An experimental investigation of wear of glass fibre-epoxy resin and glass fibre-polyester resin composite materilas. *European Polymer Journal*, 45, 149-154. Retrieved July 23, 2010, from Elsevir-ScienceDirect database.
- Pihtili, H., ve Tosun N. (2002). Investigation of the wear behaviour of a glass-fibre-reinforced composite and plain polyester resin. *Composites Science And Technology*, 62, 367-370. Retrieved May 06, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.
- Pihtili, H., ve Tosun N. (2002). Effect of load and speed on the wear behaviour of woven glass fabrics and aramid fibre-reinforced composites. *Wear*, 252, 979-984. Retrieved May 06, 2009, from Elsevir-ScienceDirect database.
- Sharma, M., Rao, I.M., ve Bijwe, J. (2010). Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber-polyetherimide composites.

Tribology International, 43, 959-964. Retrieved April 21, 2011, from Elsevir database.

Staab, G.H. (1999). *Laminar Composites*. Heinemann: Butterworth- Heinemann.

Suresha, B., Kumar, K.S., Seetharamu, S., ve Kumaran, P.S. (2010). Friction and dry sliding wear behavior of carbon and glass fabric reinforced vinyl ester composites. *Tribology International*, 43, 602-609. Retrieved May 06, 2012, from Elsevir database.

Yaşar, İ., ve Arslan, F., (2000). Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozitlerde Elyaf Hacim Oranı Ve Elyaf Doğrultusunun Tribolojik Özelliklere Etkisi. *Turkish Journal Of Engineering And Environmental Sciences*, 24, 181-191.