

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLASTİK MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERDE  
DOKU BİLEŞENLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE  
ETKİSİ**

Metalurji ve Malzeme Müh. Burcu ŞARDAN

**F.B.E. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL**

**İSTANBUL, 2009**

<b>İÇİNDEKİLER</b>	<i>Sayfa</i>
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ÖNSÖZ.....	xv
ÖZET.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii

## **BİRİNCİ BÖLÜM**

1.KOMPOZİT MALZEMELER.....	1
1.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	5
1.2 Kompoziti Oluşturan Bileşenler.....	5
1.3 Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması.....	9
1.3.1 Matris Malzemelerine Göre Gruplandırılması.....	9
1.3.1.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK).....	10
1.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler.....	13
1.3.1.3 Polimer/ Plastik Matrisli Kompozitler ( PMK ).....	15
1.3.2 Takviye Malzemelerine Göre Kompozitlerin Gruplandırılması.....	16
1.3.2.1 Fiber (Elyaf ) Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	18
1.3.2.2 Tabaka Yapılı Kompozit Malzemeler.....	21
1.3.2.3 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	22
1.3.2.4 Çok Bileşenli (Hibrit = Melez ) Kompozitler.....	24
1.3.2.5 Diğer Destekleyici ve Dolgu Malzemeleri.....	26
1.4 Kompozit Malzemelerin Mikro Mekanik.....	28
1.4.1 Süreksiz Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	28
1.4.2 Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	33
1.4.3 SMC Üretim Yöntemi İle Üretilmiş Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	42

## İKİNCİ BÖLÜM

2. PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	47
2.1 Plastik Matris Malzemeleri.....	47
2.1.1 Termoplastikler.....	48
2.1.1.1 Polietilen.....	50
2.1.1.2 Polipropilen.....	50
2.1.2 Termosetler.....	51
2.1.3 Epoksi Reçine.....	52
2.1.4 Polyester Reçine.....	53
2.1.4.1 Doymamış polyester.....	54
2.1.5 Fenolik Reçine.....	57
2.2 Fiber Malzemeler.....	58
2.2.1 Karbon.....	58
2.2.2 Aramid.....	58
2.2.3 Kalsiyum Karbonat.....	58
2.2.4 Cam.....	59
2.2.4.1 Camlar ve Bileşimi.....	60
2.2.4.2 Cam Elyaf Oluşumu.....	60
2.2.4.3 Cam türleri.....	62
2.2.4.4 Cam elyafın diğer takviye elemanlarıyla karşılaştırılması.....	63
2.3 Plastik Matrisli Kompozit Üretim Prosesleri.....	65
2.3.1 Termoset Kompozitler İçin Üretim Prosesleri.....	66
2.3.1.1 El Yatırma (Prepreg) Prosesi.....	66
2.3.1.2 Püskürtme Yöntemi.....	71
2.3.1.3 Elyaf Sarma Prosesi.....	73
2.3.1.4 Profil Çekme Prosesi (Pultrision).....	75
2.3.1.5 Reçine Transfer Kalıplama Prosesi.....	78
2.3.1.6 Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Prosesi (SRIM).....	80
2.3.1.7 Baskı Kalıplama Prosesi.....	81
2.3.1.8 Rulo Sarım Prosesi.....	82
2.3.1.9 Termoset Reçinelerin Enjeksiyon Kalıplanması.....	82

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. HAZIR KALIP BİLEŞENİ YÖNTEMİ (SMC).....	84
3.1 SMC Matematik Modeli.....	84
3.2 SMC Malzemesinin Boylamasına (Uzunlamasına) Yönlü Çekme Davranış Modeli.....	84
3.3 SMC Üretim Teçhizatı.....	91
3.3.1 SMC Aleti Yapısı.....	91
3.4 SMC Üretim Aşamaları.....	91
3.5 SMC Pestil Yapısı.....	93
3.5.1 Polyester Reçineleri.....	95
3.5.2 Stiren Monomer.....	97
3.5.3 Sertleştiriciler- Peroksitler.....	97
3.5.4 İnhibitörler- Geciktiriciler.....	97
3.5.5 Dolgu Maddeleri.....	97
3.5.6 Kaydırıcılar.....	98
3.5.7 Kalıp Ayırıcılar.....	98
3.5.8 Kıvamlaştırıcılar.....	99
3.5.9 Diğer Katkılar.....	99
3.5.10 Pigment Pastalar.....	99
3.5.11 Islaticılar.....	100
3.6 SMC Kullanım Alanları.....	101

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. DENEY TEORİSİ.....	105
4.1 Plastik Matrisli Kompozitlerin Çekme Deneyi .....	105
4.2 Plastik Matrisli Kompozitlerin Eğme Deneyi .....	109
4.3 Plastik Matrisli Kompozitlerin Darbe Deneyi .....	113
4.3.a Çentiksiz Numuneler.....	117
4.3.b Çentikli numuneler.....	118
4.4 Su Absorpsiyon Deneyi .....	119
4.5 Yoğunluk Deneyleri .....	120

4.6 Yüzey Karakterizasyonu.....	121
---------------------------------	-----

## **BEŞİNCİ BÖLÜM**

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	124
5.1 Çekme Deneyi.....	125
5.2 Eğme Deneyi.....	130
5.3 Darbe Dayancı Deneyi.....	134
5.4 Yoğunluk Deneyleri.....	136
5.5. Sem Görüntüsünün İncelenmesi.....	139

## **ALTINCI BÖLÜM**

6. SONUÇLAR.....	143
KAYNAKLAR.....	145
ÖZGEÇMİŞ.....	150

## SİMGE LİSTESİ

$E_k$	Kompozit malzemenin elastisite modülü
$E_e$	Elyafın elastisite modülü
$E_m$	Matrisin elastisite modülü
$P$	Kompozite etkiyen kuvvet
$A_k$	Kuvvete dik kesit alanı
$\sigma_k$	Kompozitin dayanç değeri
$\sigma_e$	Elyafın dayanç değeri
$\sigma_m$	Matrisin dayanç değeri
$\sigma_U$	Kopma mukavemeti
$\sigma_Y$	Akma mukavemeti
$\varepsilon_e$	Elyafın koptuğu andaki şekil değişimi
$\varepsilon_m$	Matrisin koptuğu andaki şekil değişimi
$V_e$	Elyaf hacmi
$V_m$	Matris hacmi
$E_f$	Fiberin elastiklik modülü
$E_m$	Matrisin elastiklik modülü
$u_t$	Sertlik modülü

## KISALTMA LİSTESİ

MMK	Metal Matrisli Kompozit Malzemeler
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
PMK	Polimer/ Plastik Matrisli Kompozitler
LTK	Fiber (Lif) Takviyeli Kompozit Malzemeler
PS	Polisülfon
PPS	Pofiberenilen sülfid
PVC	Polivinilklorür
PE	Polietilen
PA	Poliamitler
ABS	Akrolinitrin-butadin-strin
PTFE	Politetra Fluorethylene
AYPE	Alçak Yoğunluklu Polietilen
YYPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CTP	Cam Lifi Takviyeli Plastik
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SRIM	Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Prosesi
SMC	Tabaka Kalıp Bileşeni
BMC	Hacimli Kalıp Bileşeni
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
STM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu

## ŞEKİL LİSTESİ

## SAYFA

1.1 Kompozit yapı ile geliştirilen gerilme- gerinim eğrisi.....	2
1.2 Kompozit malzemenin alüminyum ve çelik ile karşılaştırılması.....	3
1.3 Kompozit malzemelerin farklı uygulamalarda kullanılması.....	4
1.4 Kompozit malzemenin kesit görünüşü.....	6
1.5 Kompozit malzemeleri oluşturan malzeme grupları.....	6
1.6 Kompozitlerin Gruplandırılması.....	9
1.7 Matris malzemesi özellikleri.....	9
1.8 Dağılıma ile sertleştirilen bir MMK malzemenin şematik görünümü.....	10
1.9 Partikül takviyeli bir MMK malzemede matris ve partiküller.....	11
1.10 Kısa fiber veya whisker takviyeli ve sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin yapısı.....	12
1.11 Tek yönlü karbon fiberleri ile takviye edilen borosilikat matrisli bir seramik kompozit malzemede fiber hacim oranının bir fonksiyonu olarak Young modülünün değişimi.....	15
1.12 Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması.....	17
1.13 Kompozit malzemelerdeki yapı bileşimi.....	18
1.14 Fiber ve reçine kullanarak kompozit malzemenin üretilmesi.....	19
1.15 Sürekli ve kesikli Fiber takviyeli kompozitler.....	19
1.16 Elyaf takviye edilmiş kompozitlerin farklı morfolojileri .....	21
1.17 Fiber ve dokuma takviyeli kompozitlerde Fiberlerin kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler.....	21
1.18 Tabakalı bir kompozit yapısı (a) İzotropik, (b) Ortotropik yapı.....	22
1.19 a) Fiber ve b) tanecik takviyeli kompozit iç yapısı.....	23
1.20 Epoksi matrisli tek yönlü grafit ve cam elyaf hibrit kompoziti için cam fiber miktarı değişen malzemelerde yorulma dayanımının karşılaştırılması.....	24
1.21 Hibrit kompozitlerin çeşitleri.....	25
1.22 Kesikli ve sürekli elyafli kompozitlerde elyaf uzunluğunun fonksiyonu olarak çekme dayanımı oranlarının değişimi.....	28
1.23 Süreksiz elyaf kompozitlerde çekme gerilmesinin elyaf boyuna göre değişimi.....	29
1.24 Matris içine gömülmüş elyaf.....	29
1.25 Çekme yükü uygulandığında elyaf çevresindeki matriste görülen deformasyon örneği	31



1.26 Elyaf gerilim- pozisyon profilleri.....	32
1.27 Sürekli elyafli takviyeli kompozit malzemenin gerilme diyagramı.....	34
1.28 Kompozitte $\epsilon_e > \epsilon_m$ olduğu durumda $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramı.....	35
1.29 Kompozitte $\epsilon_e < \epsilon_m$ olduğu durumda $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramı.....	35
1.30 (a) Elyafın şekil değiştirme miktarının matrisin şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ( $\epsilon_e > \epsilon_m$ ) gerilme-şekil değiştirme diyagramı (b) ( $\epsilon_e > \epsilon_m$ ) durumundaki elyaf yüzdesi-gerilme diyagramı.....	37
1.31 (a) Matrisin şekil değiştirme miktarının elyafın şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ( $\epsilon_e > \epsilon_m$ ) gerilme- şekil değiştirme diyagramı (b) $\epsilon_e < \epsilon_m$ durumundaki elyaf yüzdesi – gerilme diyagramı.....	39
1.32 SMC yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemedeki gerilim dağılımının şematik gösterimi.....	42
2.1 Amorf (a) ve yarı kristalin (b) polimerlerde moleküler düzenlemeler.....	48
2.2 Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması.....	51
2.3 Epoksi Grubu.....	52
2.4 Doymamış polyester sentezi.....	54
2.5 Çapraz bağlı polyesterin kimyasal yapısı.....	55
2.6 Çapraz bağlı polyester sentezi.....	56
2.7 Fenol – Formaldehit polimer sentezi.....	57
2.8 Cam Elyafın kompozit içindeki SEM görüntüsü.....	59
2.9 Cam eritme.....	60
2.10 Cam elyaf oluşturma prosesi.....	61
2.11 Fiber boyları değişiminin RP kompozitlerin özelliklerine etkisinin karşılaştırılması....	63
2.12 Kompozitlerde kullanılan bazı malzemelerin özgül dayanımları.....	64
2.13 Kompozit üretiminde kullanılan hammaddelerin sınıflandırılması.....	65
2.14 El yatırma prosesi için vakum torbalama.....	68
2.15 Karbon / epoksi prepreg için klasik kür çevrimi.....	68
2.16 El yatırma prosesi.....	70
2.17 Küvet üretimi için robotlu püskürtme prosesi.....	72
2.18 Filament sarım prosesinin şematik ve gerçek görünüşü.....	73

2.19 Elyaf sarım işleminde sıyırıcı bıçak düzenlemesi.....	75
2.20 Profil çekme prosesinin gösterimi.....	76
2.21 Profil çekme yöntemi ile üretilmiş parçalar kullanarak üretilen cam lifi ızgara ve tırbazan sistemleri.....	77
2.22 RTM prosesinin şematik gösterimi.....	79
2.23 SRIM prosesinin şematik gösterimi.....	80
3.1 SMC malzemesinin bileşenlerinin şematik gösterimi.....	85
3.2 Boylamasına yapılan çekme yüklemesindeki SMC gerinimi.....	86
3.3 Süreksiz fiberlerin gerilim dağılımının hesaplanmasının teorik olarak şekillendirilmesi	88
3.4 SMC makinesinin şematik gösterimi.....	91
3.5 SMC işleminin şematik gösterimi.....	93
3.6 SMS kompozit ile diğer plastik malzemelerinin karşılaştırılması.....	94
3.7 Düşük profil mekanizması.....	95
3.8 SMC kompozit bileşiminin grafik gösterimi.....	96
3.9 SMC yöntemi ile üretilmiş otobüs koltuğu.....	101
3.10 SMC yöntemi ile üretilmiş çöp kutusu ve kamyon parçaları.....	101
3.11 SMC yöntemi ile üretilmiş uydu anteni, doğalgaz kutusu ve aydınlatma parçaları.....	102
3.12 SMC yöntemi ile üretilmiş malzemelere örnekler.....	102
3.13 SMC yöntemi ile üretilmiş otomobil parçaları.....	103
3.14 SMC yöntemi ile üretilmiş kamyon parçaları.....	103
3.15 SMC yöntemi ile üretilmiş toplu taşıma araç içi malzemeleri.....	104
3.16 SMC yöntemi ile üretilmiş otomobil gövdesi.....	104
3.17 SMC yöntemi ile üretilmiş Mercedes SLK tipi otomobil.....	104
4.1 Çekme deneyi düzeneğinin teorik olarak gösterilmesi.....	105
4.2 Gerilme-gerinim diyagramı.....	106
4.3 Çekme testi düzeneği.....	107
4.4 Kaşık numunesinin şematik görüntüsü.....	107
4.5 Çekme numunesinin TS EN ISO 527-4 'e göre ölçülendirilmesi.....	108
4.6 Üç noktadan eğilme testi düzeneği ve çalışma prensibi.....	110
4.7 TS EN ISO 14125'e göre 3 noktalı eğme deneyinin şematik gösterimi.....	110
4.8 Üç noktadan yükleme şeması.....	111
4.9 Tip 2, 3 noktalı eğme numunesi.....	111
4.10 Eğme deneyi düzeneği.....	112

4.11 Darbe Deneyi Şematik Gösterimi.....	113
4.12 Darbe deneyinin şematik gösterimi.....	114
4.13 Zwick Darbe Deneyi Aleti.....	114
4.14 Darbe deneyinde kullanılan numunenin boyutları.....	115
4.15 Numunenin deney makinesi üzerinde görünümü.....	116
5.1 Deney numunelerinin çıkarıldığı SMC plakası.....	124
5.2 Plakadan deney numunelerinin kesilmesinin şematik olarak gösterilmesi.....	125
5.3 YTÜ Laboratuvarındaki Mohr Federaf Çekme Cihazı.....	126
5.4 Deneyde kullanılacak çekme cihazının görüntüsü.....	127
5.5 Deney sırasında numunenin görünümü.....	128
5.6 Numune koştugu sırada çekme cihazının gösterdiği değerin kayıt edilmesi.....	128
5.7 Eğme deneyinde kullanılan cihazın görüntüsü.....	130
5.8 Eğme cihazının çenelerinin görünümü.....	131
5.9 Eğme cihazının çeneleri arasındaki uzunluğun ayarlanması.....	131
5.10 Eğme deneyi sırasında numunenin makineye yerleştirilmesi.....	133
5.11 Darbe Deneyinde kullanılan makinenin görüntüsü.....	134
5.12 Numune yerleşmeden önce ve yerleştikten sonra deney cihazının görüntüsü.....	135
5.13 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 50 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	139
5.14 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 200 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	140
5.15 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 350 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	140
5.16 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 750 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	141
5.17 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 1000 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	141
5.18 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 2000 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	142
5.19 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 3500 büyütmede elde edilen görüntüsü.....	142

## ÇİZELGE LİSTESİ

## SAYFA

1.1 Farklı kompozit malzeme sistemlerine örnekler.....	11
1.2. Paralel ve Dik doğrultularda bazı MMK ve PMK'lerin tipik özellikleri.....	13
1.3. Seramik ve seramik kompozitlerin tipik oda sıcaklığı mukavemetleri, kırılma toklukları ve termal şok dirençleri.....	14
1.5. Karbon-Cam-Polyester Kompozitlerin Özellikleri.....	27
1.6 Kritik kesikli elyaf uzunluğu ( $l_c$ ) ve kritik boy/çap ( $l_c/d$ ) değerleri.....	32
2.1 Tipik katkısız termoplastik reçinelerin özellikleri.....	49
2.2 Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri.....	49
2.3 Ticari Termoplastik Polimerlerin Tipik Özellikleri.....	51
2.4 Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	52
2.5 Kullanılan cam türleri.....	62
2.6 Cam elyafı cinslerinin kompozisyonları (% olarak).....	62
2.7 Bazı takviye türlerinin özellikleri.....	64
3.1 Çekme değerlerine göre SMC tipleri.....	96
4.1 3 noktalı eğme numunesinin birim uzunlukları.....	111
4.2 Deney numuneleri tipleri, boyutları ve destekler arası mesafeleri.....	115
4.3 Tabakalar arasında kesmeden kaynaklanan kusur gösteren malzemeler.....	118
5.1 Deneye tabi tutulan numunelerin hacimce % bileşimleri.....	124
5.2 Çekme dayanımının % fiber oranı ile değişimi.....	129
5.3 Çekme dayanımının hacimce % fiber oranının değişmesi ile elde edilen sonuçlar.....	129
5.4 Çekme dayanımının farklı fiber boylarında ve hacimlerinde değişimi.....	129
5.5 Çekme dayanımının farklı fiber boylarında ve hacimlerinde değişimi ile elde edilen sonuçlar.....	130
5.6 Eğme Testinin farklı fiber boylarına göre sonuçları.....	132
5.7 Eğme Testinin farklı fiber boylarına göre deney değerleri.....	132
5.8 Eğme Testinin farklı % fiber hacim oranlarına göre sonuçları.....	133
5.9 Eğme Testinin farklı % fiber hacim oranlarına göre deney değerleri.....	133

5.10 Farklı cam fiber boyutları ile hazırlanan numunelerin darbe dayancı test sonuçları.....	135
5.11 Farklı cam fiber boyutları ile hazırlanan numunelerin darbe dayancı değerleri..	135
5.12 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin darbe dayanım değerleri.....	136
5.13 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin darbe dayanım sonuçları.....	136
5.14 Numunelerin teorik yoğunluk değerleri.....	136
5.15 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin yoğunluk değerleri.....	137
5.16 Yoğunluk deneyi hesaplamaları.....	137
5.17 Farklı fiber boyutlarındaki numunelerin yoğunluk değerleri.....	138

## ÖNSÖZ

Günümüz şartlarında endüstriyel anlamda malzeme seçimi yapılırken bir çok kriter göz önüne alınmaktadır. Malzemeler; kullanılacağı yere göre sahip olması gereken mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler, enerji harcayan sistemlerde dayanım ve hafifliği bir arada sunabilmesi, kolay şekillendirilebilmesi, geri dönüşümü, çevreye olan etkileri ve tabii ki tüm bunların yanında uygun maliyetli olması gibi çok çeşitli açılardan değerlendirilmekte ve şartlara göre en uygunu seçilmektedir.

Bu bağlamda; endüstride önemi giderek artmakta olan hibrit ( melez ) kompozitlerin ilk örneği olan SMC kompozitler incelenmiştir. SMC kompozitlerin bileşenleri, üretim yöntemleri, matematiksel modellenmesi araştırılmıştır. Deneysel bölümde yapılan çekme, darbe, 3 noktalı eğme ve yoğunluk testleriyle üstün mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmanın bir bölümü 2009 Karabük Üniversitesi 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu'nda sunulmuştur.

Bu konuda yaptığım çalışma süresince yardımını esirgemeyen ve desteğini sürekli hissettiren değerli hocam Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a ve bu projenin oluşmasında emeği geçen Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Burcu ŞARDAN

İstanbul, 2009

## ÖZET

Hibrit kompozit, matrisinde birden fazla filler veya fiber türü içeren; özellikleri bilinçli olarak istenilen yöne kanalize edilebilen kompozitlerdir. Plastik matrisli kompozitlerde yeni gelişmeler; fiber ve fillerlerin birlikte kullanılarak, daha ucuz ancak daha yüksek özellikte kompozit elde edilmesi yönündedir. Bu lisans üstü çalışmasında; sözü geçen temel ilkedan yola çıkarak; termoset plastik matrisli, E-camı fiber ve kalsit sistemi destekli üç bileşenli bir kompozitte, bileşenlerin değişimi ile, özelliklere yön verme ve optimum koşulları sağlama amaçlanmıştır.

E-camı, sürekli, kısa ancak tek yönlü, gelişigüzel dağılımlı, dokuma ve keçe şeklinde üretilmektedir. Kısa ve gelişigüzel dağılım türleri karışıma (blend) daha uygun türler olup, dokudaki hacim oranı ve dağılımı kompozit özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Kalsit sistemleri ise üretim maliyetini düşürücü, sertliği arttırıcı, izolatörlük vb ... gibi özellikleri değiştirdiğinden; fiberler ile dokuda birlikte bulunduğu; özelliklerin değişimi konuları üzerinde çalışılmaya değer yenilikçi ve özgün unsurlardır.

Üretim sırasında; karıştırma prosesi, pişirme süresi ve sıcaklığı (post-cure), kalıp biçimi (parça geometrisi) de özellikleri doğrudan etkileyen değişkenlerdir. Diğer taraftan fiberlerin dokuda dağılımı, yönlendirilmesi de parametreleri değiştiren önemli etkenlerdendir. Kuramsal çalışmaların yanında bunlarında mikroskopik analizlerle belirlenebilir olması, somut verilerin deneylerle görselleştirilmesi açısından önemli bir yer oluşturmaktadır.

Ham maddeler, temas kurulmuş üreticilerden sağlanarak ve uygun değişken paleti oluşturulup, numune gruplarının hazırlanması ile deneylere başlanacaktır. Bu amaçla Y.T.Ü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarından yararlanılacaktır. Deneyler laboratuvarında geniş olanaklar dâhilinde gerçekleştirilecektir. Deney çıktıları bilgisayarda analitik olarak elde edilip, somut değerlendirmelerle çalışma tamamlanacaktır.

## **Abstract**

Hybrid composite is that whose features can be deliberately canalized in intended way and contains more than one filler or fiber in its matrix. New developments in composites with plastic matrixs are that cheaper but better composites are produced by using fiber and filler together. In this master study, basic principle which is mentioned is started out and it is aimed that in three-component composite with thermoset plastic matrix, E-glass fiber and supported calsite system, features are guided and optimum features are provided with shift of components.

E-glass is produced as constant, short but unilateral, dispersion by chace, fabric and in shape of felt. Kinds of short and dispersion by chance are more convenient for blend and directly affects rate of volume in tissue and dispersion. Calsite systems are innovative and unique element which is worth o study about shift of its features when it is found with fibers in tissue because it changes features like depressing cost of production, enhancing rigidity, insulatory.

During the production, blending process, baking time and post-cure, shape are variables which directly affect features. Dispersion and direction of fiber on tissue is important factors to change parametres. It is important for visualising concrete datas with experiments that it can be defined by microscobic analyses.

Raw materials will be obtained from contacted producers, create convenient variable palet and experiments will be started with preparation of sample groups. For this purpose, Y.T.U. Laboratory of department of metallurgical and materials engineering will be used. Experiments will be carried out in laboratory with good facilities. Outputs of experiments will be analytically obtained from computer and study will be completed with concrete assesments.





## 1. KOMPOZİT MALZEMELER

İnsanoğlu; her türlü ihtiyacına uygun malzemeleri, zaman içerisinde geliştirerek kullanmıştır. Malzeme önce taş devri, daha sonra metallerin işlenmeye başlanması ile metal devri, aşamalarını geçmiştir. Günümüz uzay çağı aşamasında daha da gelişmeye ve ihtiyaçlarımıza cevap vermeye devam edecektir. (Şamiloğlu, 2007)

Malzemeler genellikle;

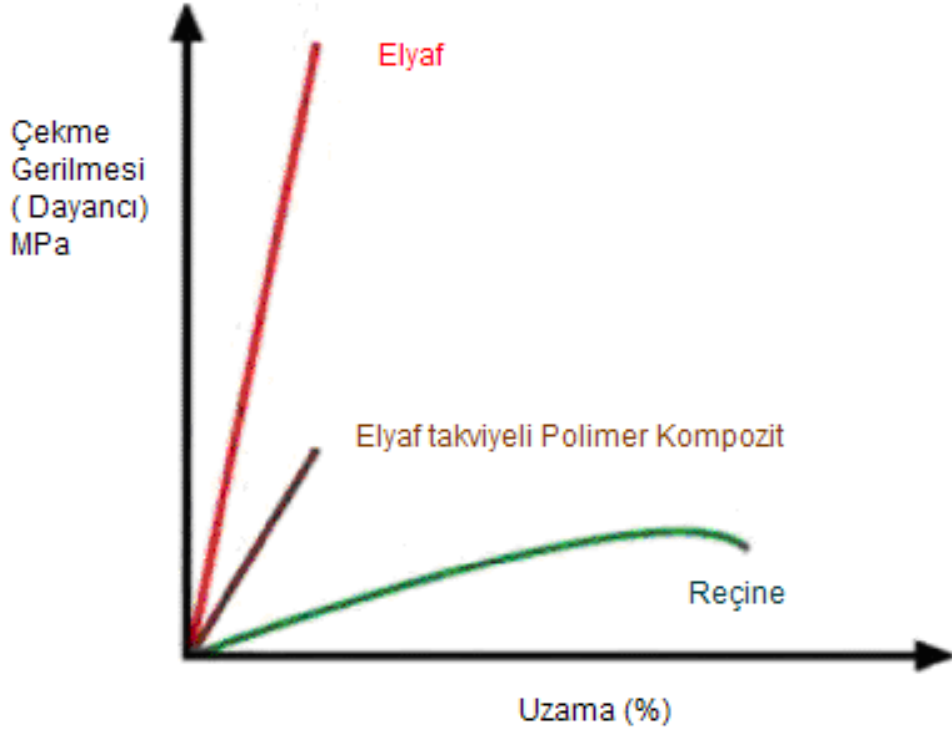
- Metaller,
- Seramikler
- Organik malzemeler

olarak üç ana gruba ayrılırlar. (Peix, vd., 2003; Mader vd., 2000; Lim vd, 1999)

Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. Bu üç ana grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzeme toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla, ara yüzeyde kimyasal bağ oluşturmaksızın makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, karma (kompozit) malzemeler olarak adlandırılan grup vardır. (Ersoy, 2005)

Kompozit malzeme; iki veya daha fazla malzemenin, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve faydalı bir malzeme oluşturmak için makro yapı da birleştirilmesi ile elde edilen yeni malzemelerdir. Makro yapıdan kasıt, malzemenin çıplak gözle veya büyüteçle görülebilecek boyutta olmasıdır. Alaşım, mikro yapıda bileşenlerden meydana geldiğinden bir kompozit malzeme kabul edilmemektedir. (Ersoy, 2005)

Genel olarak bir kompozit malzeme kendini meydana getiren malzemelerin her birinin özelliklerinden (mekanik, fiziksel), kalitesinden daha yüksek ve daha iyi özellikler elde etmek amacıyla makro boyutta birleştirilerek elde edilmiş bir yapıdır. Bu yapılar arasında her iki temel yapıda daha iyi özelliklere sahip ara yüzey ve ara fazlar elde edilebileceği gibi bazı özel durumlarda her iki malzemenin daha zayıf özellikler gösterebilen yapılarda oluşabilmektedir. (Ekrem, 2006)



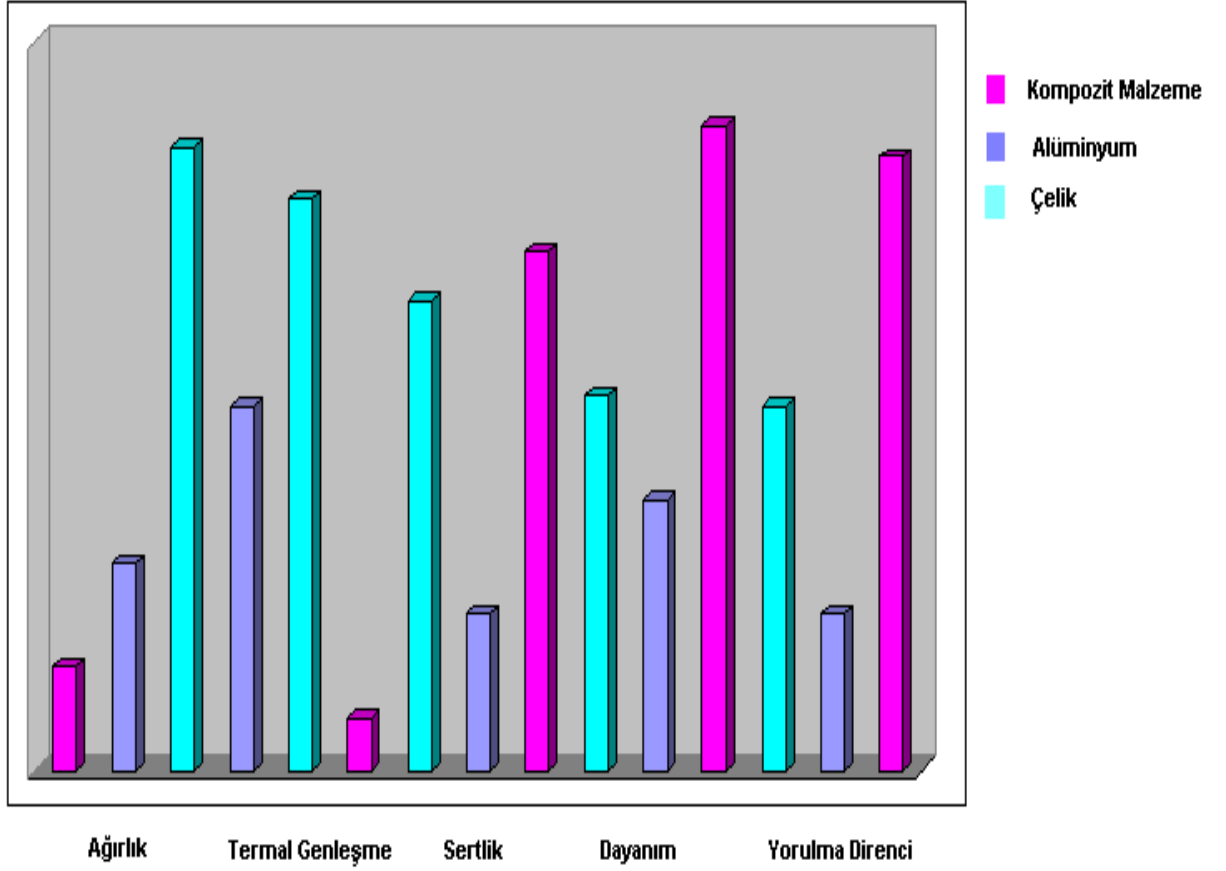
Şekil 1.1. Kompozit yapı ile geliştirilen gerilme- gerinim eğrisi (Demircioğlu, 2006)

Kompozit malzemeler oluşturulurken yüksek dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı, mükemmel aşınma direnci, korozyon direnci, ısı iletkenliği, düşük ağırlık, elektrik iletkenliği gibi özelliklerden bazılarının geliştirilmesi amaçlanır. Bütün bu özelliklerin birlikte geliştirilmesi beklenemez, özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri hesaplanabilir. (Ekrem, 2006)

Kompozitin ilk kullanımı çok eski yıllara dayanmaktadır. Örneğin; ağaç, kemik ve diş gibi doğal kompozit malzemeler insanlığın var oluşu ile birlikte kullanılmıştır. İnsanlar belki de saman ve çamuru karıştırıp kerpiç tuğlalar üretmeye başladıklarında ilk kompozit malzemeyi yapmışlardır. (Ersoy, 2005)

Günümüzün modern teknolojisi uzay, uçak ve otomotiv endüstrileri gibi ileri teknoloji alanında kullanılmak üzere hafif, üstün ve spesifik özelliklere sahip yeni malzemelere ihtiyaç duymaktadır.(Valery vd., 2001) Uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde, dayanç/ağırlık, dayanç/yoğunluk oranları gibi malzeme özelliklerinin önemli olduğu ağırlığa duyarlı alanlarda kullanılan malzemelerin dayanç sınırlarının zorlanması, belirli kurallar içinde farklı malzemelerin karıştırılarak özelliklerinin geliştirilmesini önemli kılmış ve bu alanda da önemli gelişmelere yol açmıştır.(Comte vd., 2006) Sahip oldukları mükemmel özelliklere rağmen, kompozit malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kullanımları endüstriyel olarak istenen seviyelere ulaşamamıştır. Ancak son yıllardaki gelişmelere bakarak

bu malzemelerin kullanımlarının hızla yaygınlaştığı ve bu hızın giderek artacağını söylemek mümkündür. Örneğin; enjeksiyonla kalıplama yöntemi, polimerik malzeme üretimi için, uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Proses hızlı, kolay ve ekonomiktir, bu nedenle polimerik malzemelerin üretiminde çok tercih edilen yöntemdir. Enjeksiyon yöntemi ile kısa fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi oldukça hızlı ve ekonomiktir. Genel olarak proses maliyetleri yüksek olan kompozit malzemeler, bu üretim yöntemi ile sanayide ve günlük kullanımdaki yerini hızla almaktadır. (Ersoy, 2005)



Şekil 1.2. Kompozit malzemenin alüminyum ve çelik ile karşılaştırılması

Dünya genelindeki takviyeli kompozit tüketiminin yaklaşık yarısına yakın bir pazara sahip olan A.B.D’de takviyeli kompozitlerin ürünlerin yaklaşık %90’ı cam elyaf ile takviye edilirken, %75’lik bir kısmında matris malzeme olarak doymamış polyeester kullanılmaktadır.



Şekil 1.3. Kompozit malzemelerin farklı uygulamalarda kullanılması. (Güçlü, 2007)

Sürekli fiber olarak en yaygın kullanılan malzeme ucuz olması nedeni ile cam fiberdir. Özellikle cam fiber ile matris arası yapışma gücünü arttıran silan bazlı ince film yapan kimyasalların sentezinden sonra kullanım alanları genişlemiştir.(Cinpinsky vd., 1996) Sanayi donanımlarında, tüketim mallarında, askeri ve havacılık sahasında geniş kullanım alanları bulmuştur. Esas anlamdaki gelişmeler 1960’larda karbon fiberli kompozitlerin üretimi ile başlamıştır. Karbon fiber poliakrilonitril (PAN) fiberin piroliz ve çekme sonucu hemen hemen saf ve yönlendirilmiş karbon haline gelmiş şeklindedir.(Cara vd., 2004) Ortalama 7-10 mikrometre çapında, % 1-2 uzaması olabilen, 3000 °C ye kadar dayanabilen, çekme mukavemeti çelikten fazla ve hafif ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) bir malzemedir. En önemli eksiği fiber eksenine dik yöndeki darbelere dayanıksız olmasıdır. Bu eksiklik fiberlerin açılı yerleştirilmeleri ya da çapraz katlı kompozitler şeklinde tasarımlar yapılarak, kumaş gibi dokunarak giderilmektedir. (Garmendia vd., 1995; Dwyer vd., 1996) Kullanılan diğer fiberler arasında aramid fiberleri sayılabilir. Bunlar basınç dayanımı isteyen alanlar da kullanılabilir. Silisyum karbür daha çok metal matrislerde kullanılmakla beraber polimerler için de uygun bir fiberdir. Bor fiberden daha ucuzdur. Bütün dolgu veya fiber malzeme onları bir arada tutan, koruyan matris ile sağlam bir dayanışma içinde olmalıdır. Matris ile uyuma yüksek performans istemeyen cam fiberli

malzeme için fazla kritik olmayabilir. Cam fiberler için doymamış polyester reçineler uygun matrisler oluşturur. (Ersoy, 2005)

### **1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları**

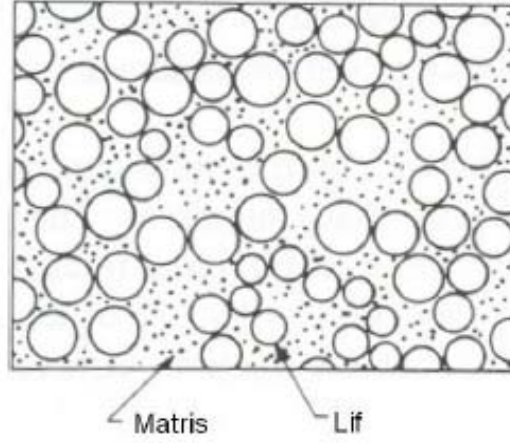
Kompozit malzemelerin avantajı bileşenlerin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerden biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır. Bu özellikler;

- Dayanım
  - Yorulmaya karşı dayanım
  - Aşınmaya karşı dayanım
  - Korozyona karşı dayanım
- Kırılma Tokluğu
- Yüksek Sıcaklık Özellikleri ( Bazılarının)
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Fiyattır. (Ersoy, 2005)

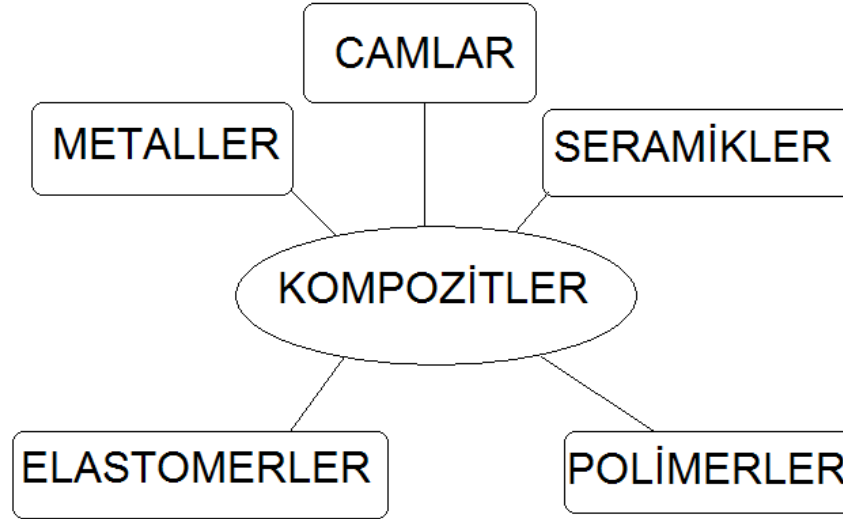
### **1.2 Kompoziti Oluşturan Bileşenler**

Kompozit malzemede, matris malzeme ile takviye elemanının birbiriyle iyi bir ara yüzey oluşturacak şekilde bir araya gelmesi için uygun bir ortamının oluşturulması gereklidir. Bu ortam içinde, uygun süre ve sıcaklıklar seçilmelidir. (Deniz, 2005)

Kompozit malzeme, genellikle takviye elemanı ve matris olmak üzere, en az iki malzemeden oluşur. Matris, kompozit malzemelerin birinci ana bileşenidir. Fiberlerin istenen başarıyı göstermesi uygun matris seçimine bağlıdır. (Deniz, 2005)



Şekil 1.4. Kompozit malzemenin kesit görünüşü (Agarwall, 2006).



Şekil 1.5. Kompozit malzemeleri oluşturan malzeme grupları (Schwartz, 1994)

Kompozitleri meydana getiren bileşen sınıfları çok değişik malzemelerden olabilmektedir. Şekil 1.5, kompozitlerin üretildiği malzeme gruplarını göstermektedir. Kompozitlerin üretim koşulları ve uygulamaları göz önüne alındığında Şekil 1.5'teki 5 sınıf malzemenin yanında daha birçok malzemenin de sayılabilmesi mümkündür. Kompozit sistemlerine bağlı olarak değişik sınıftaki malzemelerden en az iki grup bir araya getirilerek üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilmektedir (Schwartz, 1994). Kompozit terimi en geniş anlamda ele alındığında; polikristal birçok metal ve metal olmayan parçaların bir arada toplanması olarak ifade edilebilir. Bu nedenle kompozit malzeme terimini daha dar ve anlaşılır kalıplar içinde ele almak gerekir. (Sabancı, 2005)

Bir malzemenin kompozit sayılabilmesi için aşağıdaki özellikleri taşıması gerekmektedir;

- a) İnsan tarafından üretilmelidir,
- b) Farklı bileşenlerle beraber kimyasal olarak birbirinden farklı en azından iki malzemenin kombinasyonundan oluşmalıdır,
- c) Kompozit malzemeyi oluşturan ayrı malzemeler üç boyutlu olarak birleşmelidirler,
- d) Kompozit, kendisini meydana getiren bileşenlerin tek başlarına sahip olamayacakları özellikler göstermelidir. (Sabancı, 2005)

Hangi malzemenin kompozit, hangi malzemenin monolitik (:bütünsel) malzeme olduğunu ifade edebilmek için malzemelerin değişik sayıdaki yapı seviyelerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. (Sabancı, 2005)

Bunlar;

**Atomik Düzey:** Tek moleküllerin ve kristal hücrelerinin göz önüne alındığı bu seviyede tüm malzemeler, iki veya daha fazla sayıdaki farklı atomların bir arada bulunması durumunda kompozit olarak ifade edilir. Bu tanıma göre iki farklı atomun bir araya gelmesi, kompozit bir malzeme oluşması için yeterlidir. İki farklı element atomunun bir katı eriyik oluşturması halinde bile meydana gelen bileşik kompozit olarak tanımlanabilmektedir. Bu malzemeler saf elementler haricinde bileşikler, alaşımlar, polimerler ve seramiklerden oluşabilir. (Sabancı, 2005)

**Mikro Yapısal Düzey:** Kristal, faz, molekül ve bileşiklerin iki veya daha fazla sayıdaki kristal, molekül ve faz yapılarından meydana gelmesiyle oluşan malzemeler kompozit olarak tanımlanabilir. Bu tanımlama ile geleneksel olarak homojen ve monolitik olarak değerlendirilen çok sayıda malzeme kompozit olarak sınıflanabilmektedir. Yine bu tanımlama ile tüm metalik malzemeler içinde pirinçler, bronzlar gibi tek fazlı alaşımlar monolitik olarak ele alınmaktadır. Çok fazlı bir karbon alaşımı olan çelikler ve dökme demirler kompozit sınıfına girmektedirler. (Sabancı, 2005)

**Makro Yapısal Düzey:** Kaba olarak iki bileşenin oluşturduğu yapılardır. Bu yapılar matrisler, partiküller ve fiberleri kapsamaktadır. Kompozit olarak adlandırılan bu malzemeler farklı makro bileşenlerden oluşmaktadırlar. (Mei vd., 1996) Makro yapısal seviye tanımı birçok kompoziti içermesine rağmen genel olarak kompozit olarak bilinen bazı malzemeleri kapsamamaktadır. Daha kapsayıcı olması için bileşenlerin tabiatları ve iki karakteristikleri daha göz önüne alınmaktadır. (Sabancı, 2005)



Bu özellikler;

- i) Kompoziti oluşturan bileşenler genelde hemen hemen farklı kimyasal yapıya sahiptirler,
- ii) Birbirleri içinde çözünmezler. (Sabancı, 2005)

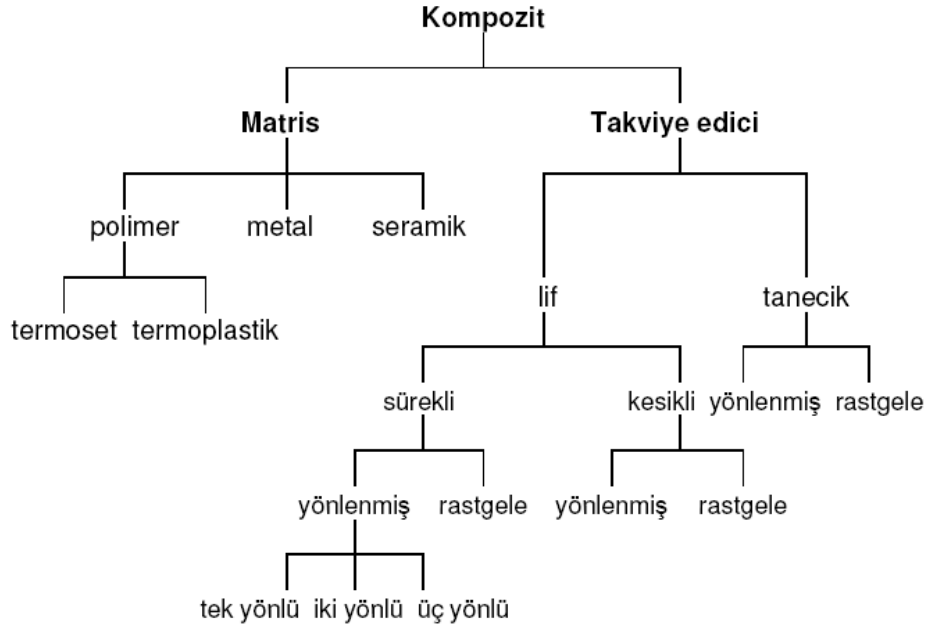
Bu şartlar altında hem yapısal olarak ve hem de malzeme bileşenlerinin kompozisyonu açısından kompozit malzemelerin tanımı aşağıdaki gibi yapılmaktadır; "Bir kompozit malzeme, temel olarak birbiri içinde çözünmeyen ve birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makro bileşenin karışımından veya birleşmesinden meydana gelen malzeme sistemidir." (Robert, 1999) Kompozit malzemelerin özellikleri;

- Bileşenler,
- Bileşenlerin dağılımı,
- Bileşenler arasındaki etkileşim,

faktörlerinden büyük ölçüde etkilenmektedir (Agarwall, 2006).

Kompozit malzemelerin özellikleri, bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranları toplamı olabilir yada bileşenler birbirini sinerjik bir şekilde etkiler ki bu durumda elde edilen kompozit malzemenin özellikleri, basit bir şekilde; bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranlar toplamı ile elde edilemez.(Wypych, 2000; Caprino vd., 1998) Bu nedenle kompozit malzemeyi bir sistem olarak tanımlarken, bileşenleri ve bileşenlerin özelliklerini belirtmenin yanı sıra, takviyenin geometrisinin de sistem için bir referans olarak belirtilmesi gereklidir. Takviyenin geometrisi, boyut dağılımı ile tanımlanabilir (Agarwal, 2006).

### 1.3 Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması

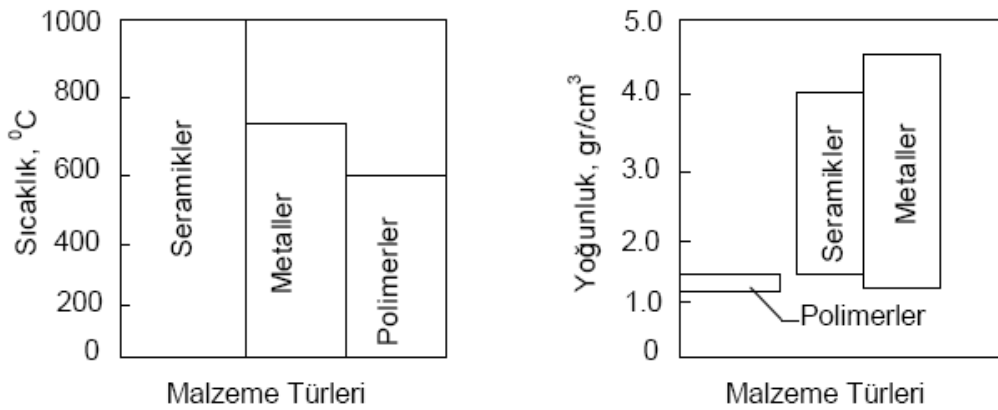


Şekil 1.6. Kompozitlerin Gruplandırılması (Demircioğlu, 2006)

#### 1.3.1 Matris Malzemelerine Göre Gruplandırılması

Kompozit malzemeler, en güzel şekilde matrislerine göre gruplandırılırlar. Matris malzemelerine göre kompozit malzemeler 3 gruba ayrılır;

- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 1.7. Matris malzemesi özellikleri (Deniz, 2005)

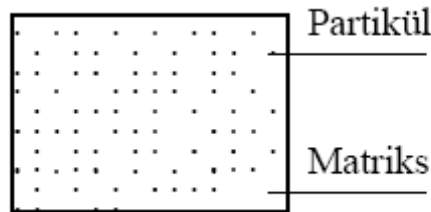
### 1.3.1.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) hakkındaki bilgiler daha eski yıllara dayanmasına rağmen, bu malzemelerin kullanımları son yıllarda, özellikle son 20 yılda oldukça yaygınlaşmıştır. (Chan-Park vd., 1996) MMK malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer bazı malzemelere göre küçümsenmeyecek üstünlükleri mevcuttur. MMK ' ler:

- a) Yüksek elastik modüle sahiptirler,
- b) Yüksek dayanç (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma) gösterirler.
- c) Yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
- d) Metallerin süneklik ve tokluk özellikler ile seramiklerin yüksek dayanç ve yüksek modül özelliklerini birleştirirler,
- e) Tekrar üretilebilir mikro yapı ve özelliklere sahiptirler,
- f) Düşük yoğunluk değerleri verirler,
- g) Sıcaklık değişikliklerine veya termal şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- h) Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzey akışlarına karşı düşük hassasiyete sahiptirler,
- i) Yüksek elektrik ve termal iletkenlik özellikleri mevcuttur . (Sabancı, 2005)

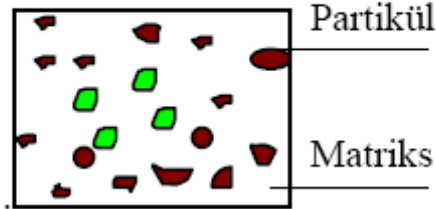
MMK' ler, genelde iki bileşenden meydana gelmektedirler. Bunlardan biri metal matris (genelde bir metal alaşımıdır), diğeri takviye malzemesidir (genel olarak bir metaller arası bileşik, bir oksit, karbür veya bir nitrür) .

**1.3.1.1.a Dağılma ile Sertleştirilmiş MMK Kompozit:** Bu kompozit, seçilen bir matris içerisinde çok ince partiküllerin dağıldığı yapı olarak karakterize edilir. Partikül boyutu 0.01  $\mu\text{m}$  den 0.1  $\mu\text{m}$  ye kadar değişebilir ve partikül hacim oranı % 1-15 arasında olur (Sabancı, 2005).



Şekil 1.8. Dağılma ile sertleştirilen bir MMK malzemenin şematik görünümü (Schwartz, 1994)

**1.3.1.1.b Partikül Takviyeli MMK Kompozit:** Bu tür kompozitlerde ilave edilen takviye malzemesinin boyutu 1  $\mu\text{m}$ 'den büyüktür ve ilave hacim oranları % 5-40 aralığındadır. (Sabancı, 2005).



Şekil 1.9. Partikül takviyeli bir MMK malzemedeki matris ve partiküller (Schwartz, 1994)

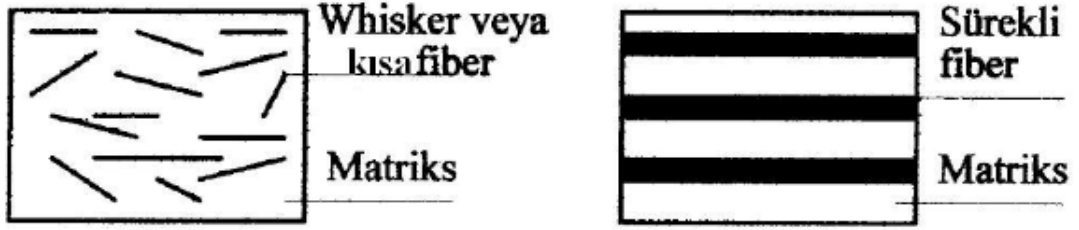
**1.3.1.1.c Fiber Veya Wisker Takviyeli MMK Kompozit:** Fiber takviyeli kompozit malzemelerde fiber uzunlukları 0.1  $\mu\text{m}$  ve 250  $\mu\text{m}$  aralığında olabilmektedir. Sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK' lerde takviye malzemesinin hacim oranı % 70 lere kadar arttırılabilmektedir. MMK' ler üzerindeki ilk çalışmalar sürekli fiberlerle takviye edilen malzemeler üzerine olmuştur ve bu malzemelerin uygulamaları havacılık alanında kendini göstermiştir. (Rosato vd., 2000) Bu malzemelerin kullanım alanları daha ucuz ve kolay fiber üretim teknolojisinin gerektiği şekilde gelişmemesinden dolayı sınırlı kalmıştır. Sürekli fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler aslında kompozit malzemelerin spesifik olarak belli bir sınıfını teşkil etmektedirler. (Sabancı, 2005)

Çizelge 1.1. Farklı kompozit malzeme sistemlerine örnekler (Rosato vd., 2000)

Matris Malzemesi	Katkı Malzemesi	Oluşturulan Kompozit Malzemenin Özellikleri
Termoset Termoplastik	Cam, Aramid, Karbon, Grafit, Whisker, Metal, etc...	Mekanik dayanç, Aşınmaya karşı direnç, Yüksek sıcaklıklara karşı direnç, Enerji Absorbsiyonu, Termal Stabilizasyon
Metal	Metal, Seramik, Karbon, Cam Fiber, etc...	Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç, Termal Stabilizasyon, etc...
Seramik	Metalik ve Seramik Partiküller ve Fiberler	Yüksek Sıcaklıklara Karşı Direnç, Kimyasal Direnç, Termal Stabilizasyon, etc...

Metallerin çoğunun aksine Şekil 1.10'da gösterilen sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropiktir. Anizotropikliğin derecesi fiber yönlenmesine bağlıdır. Metal matris yükü transfer ederken ve aynı zamanda yükü fiberlere iletirken, fiberlerin ana rolü ise yükü taşımaktır. Matrisin yükü transfer edebilmesi ve fiberlerin yükü taşımadaki başarısı

fiber/matris ara yüzeyindeki ıslanmanın başarısına bağlıdır. Ticari uygulamalarda dispersiyonla sertleştirilmiş ve partikül takviyeli MMK malzemeler kullanılırken, sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK'lerin uygulaması, havacılıktaki bazı uygulamalarla ve askeri uçakların bazı parçaları ile sınırlandırılmıştır. Bunların dışında istisna olarak sürekli paslanmaz çelik fiberlerle takviye edilen MMK malzemeler otomobil biyel kollarında da kullanılmaktadırlar. (Sabancı, 2005)



Şekil 1.10. Kısa fiber veya whisker takviyeli ve sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin yapısı (Schwartz, 1994)

Son yıllarda, MMK malzemelerin üretilmesinde ve daha pratik olarak uygulamaya aktarılmasında süreksiz olarak takviye edilmiş malzemeler tercih edilmektedir. Süreksiz takviye elemanları ile üretilen MMK'lerin dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi standart metalurjik proseslerle şekillendirilebilir olmaları da sayılmaktadır. Süreksiz olarak takviye edilmiş MMK'lerin kolay üretilebilir olmalarından dolayı son yıllarda çok değişik alanlarda bu malzemelerin kullanıldıkları tespit edilmiştir. Bu uygulamalara birkaç örnek vermek gerekirse; tenis raketleri, golf sopalarının kafaları SiCp/Al kompozitidir. Piston, biyel kolu gibi otomobil motor parçaları SiCw/Al ve Saffil Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kısa fiberleri/Al kompozitlerinden yapılmaktadır. (Sabancı, 2005)

MMK'lerin yüksek toklukları, yüksek sıcaklıklarda bile dayançlarını muhafaza edebilmeleri en açık ve en önemli avantajlarıdır. Gereken yüksek mekanik direnç, takviye malzemesinden sağlandığından dolayı, bir kompozit malzeme için matrisin yüksek sıcaklıklarda bile kararlı kalabilmesi mümkündür. Kuvvetli bir fiber/matris ara yüzey bağ mukavemeti için matrisin kayma mukavemetinin yüksek olması gerekmektedir. (Sabancı, 2005)

Seramikler yüksek elastiklik modüle, yüksek çekme basma ve kayma dayanımına, yüksek servis sıcaklığına sahiptir. Ayrıca, metallerin süneklik ve tokluğunu, seramiklerin yüksek dayanım ve yüksek elastik modül özelliklerini birleştirmelerinden dolayı son derece önemli mühendislik malzemeleri olmuşlardır. Bu üstünlüklerinin yanında tekrar üretilebilir mikro yapı, mekanik özellikler ve düşük yoğunluk değerlerine sahip olmaları açısından daha da

önem kazanmışlardır. Otomobil motorları için piston başları ve gaz türbin bıçakları gibi kullanımlara sahip bazı metal matris kompozit malzemelerin tipik özellikleri Çizelge 1.2’de verilmiştir. (Şamiloğlu, 2007)

Çizelge 1.2. Paralel ve Dik doğrultularda bazı MMK ve PMK’lerin tipik özellikleri (Şamiloğlu,2007)

Matris	Elyaf	Hacim Oranı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Elastiklik Modülü (GPa)		Basma Dayanımı (MPa)	
				boyuna	enine	boyuna	enine
Al	B	0,50	2,65	210	150	1500	140
Ti-6Al-4V	SiC	0,35	3,86	300	150	1750	410
Al-Li	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60	3,45	262	152	690	180
Epoksi	E-Cam (tek yönde)	0,60	2,00	40	10	780	28
Epoksi	2-D cam keçe	0,35	1,70	16,5	16,5	280	280
Epoksi	Boron (tek yönde)	0,60	2,10	215	24,2	1400	63
Epoksi	Karbon	0,60	1,90	145	9,4	1860	65
Polyester	Kısa Cam	0,70	1,80	55-138	--	103-206	--

### 1.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

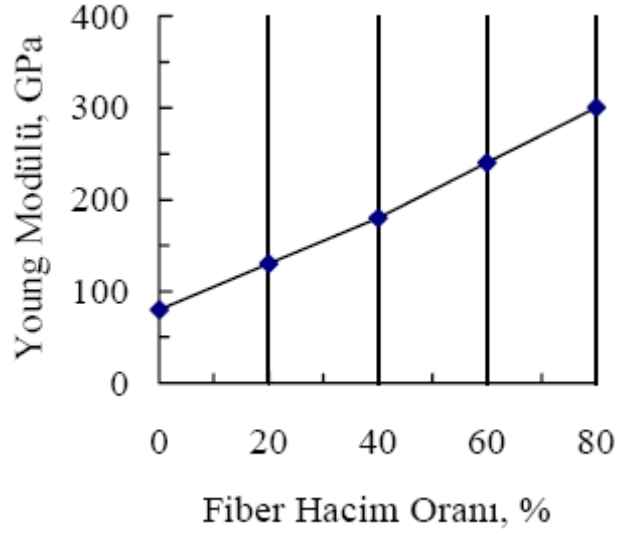
Seramik malzemeler, çok sert ve kırılmandır. Ayrıca düşük yoğunluk özellikleri vardır. Seramik malzemeler, termal şok direncinin ve tokluğunun düşük olduğu malzemelerdir. Dolayısıyla kullanımları sırasında ani hasar sergilediklerinden yüksek tahribata yol açabilirler. Seramik malzemelerin seramik elyaflar ile takviye edilmesi durumunda ani kırılmalara karşı dayanımları artarken tokluklarının da artırılması amaçlanmaktadır. Bu yüzden kırılma özelliği kontrol edildiği takdirde; bıçak, disk ve piston gibi araba ve uçak gaz türbinlerinin sıcak bölge parçaları için mükemmel malzemelerdir. (Şamiloğlu, 2007)

Seramik kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar 1970’li yıllarda başlamıştır. N. E. Claussen 1976 da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içine % 15 tetragonal ZrO<sub>2</sub> ilavesi sonucunda dönüşüm toklaşması meydana geldiğini ispatlamıştır. Çizelge 1.3’te çeşitli seramik kompozitlerin özellikleri verilmektedir. (Sabancı, 2005)

Çizelge 1.3. Seramik ve seramik kompozitlerin tipik oda sıcaklığı mukavemetleri, kırılma toklukları ve termal şok dirençleri (Chawla, 1998)

Malzeme	Mukavemet (MPa)	Kırılma Tokluğu $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	Termal Şok Direnci $K_{IC}$ (DT°C)
<b>Geleneksel Seramikler</b>			
SiO <sub>2</sub> esaslı ( Ör. Borosilikat Cam)	70	0,5	300
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	350-700	4	225
B <sub>4</sub> C	350	4	225
ZrO <sub>2</sub> (tamamen kararlı)	140-350	2,5	225
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (Sıcak prenslenmiş)	700-860	5	450
<b>Seramik Kompozitler</b>			
ZrO <sub>2</sub> kristalleri (kısmen kararlı)	1400	6	450
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hacimce % 10 ZrO <sub>2</sub> )	700	8	>900
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hacimce % 30 BN)	350	6-9	500
B <sub>4</sub> C (hacimce % 50 C)	200	3,5	1100
Cam-SiC fiber kompoziti	350	700	>900

Seramiklerin ve seramik kompozitlerin üstün özellikleri yıllardır bilinmesine rağmen kırılma tokluğu gibi uygulamada çok önemli olan mekanik özelliklerinin düşük olması bu malzemelerin çelik ve demir dışı alaşımların yerlerine kullanımlarını engellemiştir. Seramik malzemeler çok sert olduklarından özellikle aşınma uygulamaları için eşsiz malzemelerdir. Termal şok dirençleri ve gevrek olmaları bu malzemelerin düşük yoğunluklarına ve dolayısıyla yüksek spesifik özelliklerine rağmen kullanımlarını kısıtlamıştır. Son yıllardaki çalışmalar seramik kompozitlerin özellikle termal şok dayanımlarını ve kırılma tokluklarını yükseltmek üzerine olmuştur. Çizelge 1.3'te çeşitli seramik malzemelere SiC whisker ilavesinin kırılma mukavemetlerine ve kırılma tokluklarına etkisi gösterilmektedir. Şekil 1.11'den görüldüğü gibi seramik matrisli malzemelere SiC ilavesi kırılma dayanımlarını ve dolayısıyla kırılma tokluklarını önemli ölçüde arttırmaktadır. (Chawla, 1998).



Şekil 1.11. Tek yönlü karbon fiberleri ile takviye edilen borosilikat matrisli bir seramik kompozit malzemede fiber hacim oranının bir fonksiyonu olarak Young modülünün değişimi (Chawla, 1998)

Seramikler ve seramik kompozitler, yüksek teknoloji malzemeleri, ileri malzemeler veya ince seramikler olarak da isimlendirilmektedirler. Bu malzemelerin en önemli üstünlükleri aşağıdaki gibidir.

- Yüksek sıcaklık mukavemeti.
- Nispeten düşük yoğunluk.
- Yüksek elastik modül.
- Düşük termal genleşme katsayısı ve iletkenlik
- Korozyon ve oksidasyona karşı yüksek direnç.
- Aşınma ve erozyon direnci.
- Yüksek sertlik.(Sabancı, 2005)

### 1.3.1.3 Polimer/ Plastik Matrisli Kompozitler ( PMK )

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla komplekstirler. Matris olarak kullanılan polimerler, ucuz ve kolaylıkla çalışabilir malzemelerdir. Diğer taraftan düşük elastik modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Polimer matrisler, termoset ve termoplastik olmak üzere 2 gruba ayrılır. (Marissen vd., 1999; Vina vd., 1994) Termoplastik matrisler ısıtıldıklarında yumuşarlar ve ısıtılmış yarı sıvı haldeyken şekillendirilebilir veya kalıplandırılabilirler. Termoset matrisler bunu aksine ilk hallerinde genelde sıvıdır veya düşük ergime noktasındaki katılardır. Son ürüne yönelik olarak kullanıldığında termoset matrisler



bir katalizörün, ısının ya da her ikisinin yardımıyla sertleşme aşamasına geçerler. Sertleşme tamamlandıktan sonra katı termoset matrisler orijinal sıvı hallerine döndürülemezler. Termoplastik matrislerin aksine, sertleşme reaksiyonuna giren termosetler ısıtıldıklarında ergimezler ve akmazlar. Bir kez şekillendiğinde, yeniden şekillendirilemezler. Her iki matris türü de takviye edilebilir niteliktedir. (Şamiloğlu, 2007)

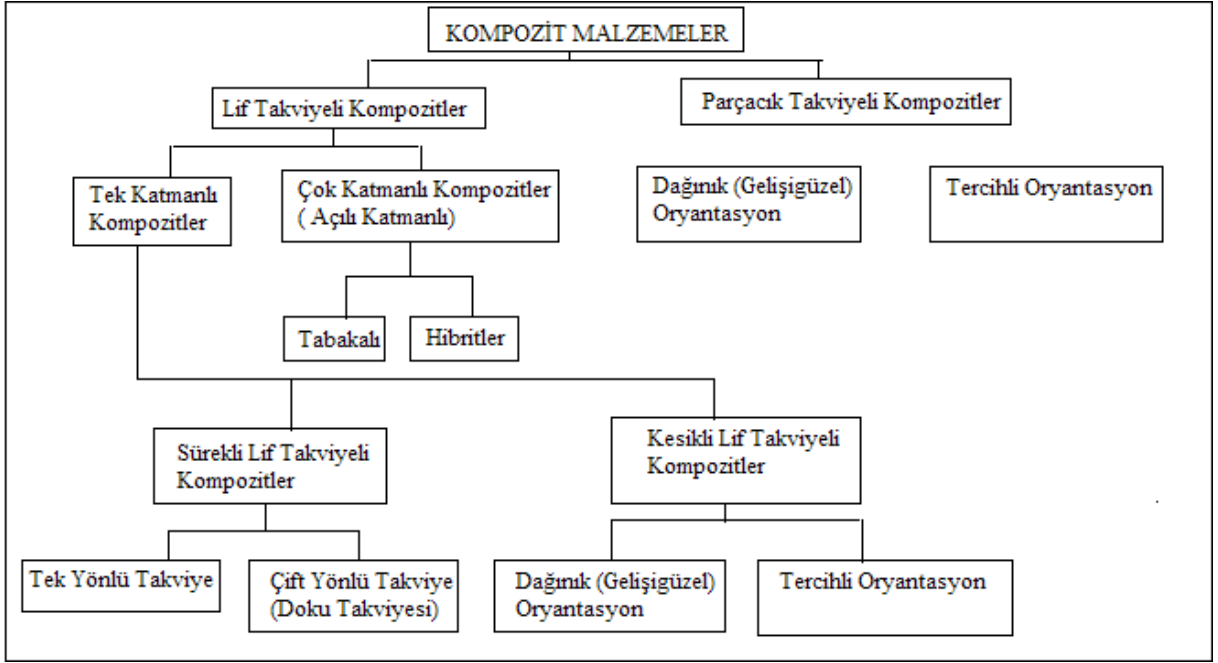
Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. Polimer matrisli kompozitlerle çalışırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden biri sıcaklık, diğeri nemdir. Özellikle bu iki faktörün beraber etkin olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde hidrotermal etkilerden dolayı düşüşler meydana geldiği belirtilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum metotlarıdır. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanlarının; cam fiber, kevlar fiber, boron fiber ve karbon fiberlerdir (Smallman vd., 1999).

Kompozit malzemelerin yapısı beraber incelendiğinde, ortak bir dayanım mekanizması olduğu görülür. Dayanım mekanizması, takviyenin geometrisine çok sıkı şekilde bağlıdır. Bu nedenle kompozit malzemeleri, örnek takviye biriminin geometrisi göz önüne alınarak sınıflandırmak uygundur.(Torres vd., 2000) Polimer matrisli kompozitler Bölüm 2’de daha detaylı açıklanacaktır.

### **1.3.2 Takviye Malzemelerine Göre Kompozitlerin Gruplandırılması**

Takviye malzemelerine göre sınıflandırılması;

- Fiber takviyeli kompozitler
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Dolgu kompozitler
- Tabakalı kompozitler olarak sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 1.12. Kompozit Malzemelerin Gruplandırılması

Temelde kompozit malzemeler, metalik, organik veya inorganik esaslı bileşenlerin kombinasyonundan oluşmaktadır. Kompozitlerde malzeme kombinasyonlarının sınırlanmamasına rağmen bileşenlerin şekilleri sınırlıdır. Bunun anlamı bir kompozit malzemenin ikiden fazla bileşen de içerebileceğidir.(Atodaria vd., 1999) Kompozitlerdeki bileşenler şekil olarak 5 sınıfta incelenmektedirler. Şekil 1.13.'de de görüldüğü gibi kompozitlerdeki bileşenler;

- i) fiberler,
- ii) partiküller,
- iii) levhalar,
- iv) tabakalar,
- v) dolgular olarak tanımlanmaktadırlar

Kompozitteki ana faz olan matrisin görevi fiber, partikül ve tabaka gibi yapı bileşenlerinin kendi bünyesinde homojen olarak dağılmasını temin etmektir. Fiberler, partiküller, tabakalar ve levhalar kompozitin iç yapısını oluşturan yapısal bileşenlerdir ve genelde ilave fazlar olarak kullanılırlar. Bunun dışında bu bileşenler matris olarak da kullanılabilirler. (Schwartz, 1994)



Partikül



Levha



Tabaka



Dolgu



Fiber

Şekil 1.13. Kompozit malzemelerdeki yapı bileşimi

Matrisin kompozit yapıdaki fonksiyonu; takviye elemanına yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için takviye elemanı ile matrisi bir arada tutmak yanında, çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Matris yapısı ayrıca, plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılgan çatlakların yayılmasını önlemek, plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirmek gibi fonksiyonları gerçekleştirebilmektedir. (Demircioğlu,2006)

### 1.3.2.1 Fiber (Elyaf ) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin en yaygın türü elyaf takviyeli kompozitlerdir. Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi olarak ilk sırayı cam almıştır. Matris malzeme olarak plastik reçineler en fazla kullanılan tür olup bunlardan da polyester ucuzluğu sebebiyle ilk sırayı almaktadır. Epoksi reçine ise yüksek mukavemet ve kimyasal dayanım sebebiyle uzay, havacılık, ev ve spor aletleri yapımına kadar çok geniş bir alanda kullanım imkanı bulmuştur. Grafit ve kevlar elyaf-epoksi kompozitler 'ileri kompozitler' olarak uzay ve havacılık

endüstrisinin temel malzemeleri olmuşlardır (ASM Handbook, 2001). Fiber (Lif) takviyeli kompozit malzemeler (LTK), farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. (Ersoy,2005)

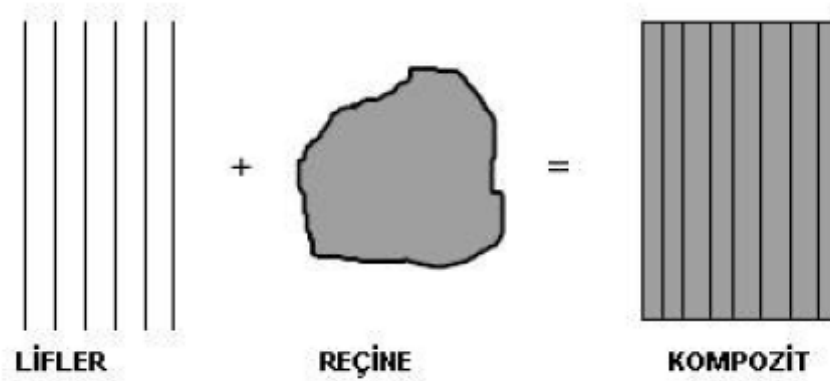
Takviye elemanının şekline göre şöyle sınıflandırılırlar;

1. Sürekli Fiber takviyeli kompozitler
2. Kesikli Fiber takviyeli kompozitler

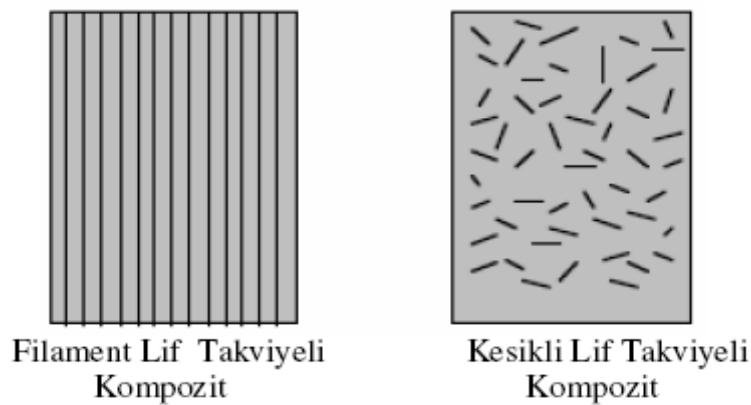
Yapıya bağlı olarak yapılan sınıflandırma ise,

1. Tek katlı kompozitler
2. Çok katlı kompozitler şeklindedir.

Kompozitler hakkında hatırlanması gereken önemli bir nokta; yükü fiberler taşımaktadır ve kompozit malzemenin dayanımı fiber eksenine doğrultusunda en büyük değerdedir. Yük doğrultusunda yapılan filament fiber takviyesi, matris malzemenin özelliklerini çok aşan özelliklerle sonuçlanmaktadır. Aynı fiber kısa fiber haline getirildiğinde (kesildiğinde), filament fiberlere göre daha düşük özellikler gösterirler (Şekil 1.14 ve 1.15). (Ersoy, 2005)



Şekil 1.14. Fiber ve reçine kullanarak kompozit malzemenin üretilmesi (Mazumdar, 2002).



Şekil 1.15. Sürekli ve kesikli Fiber takviyeli kompozitler (Mazumdar, 2002).

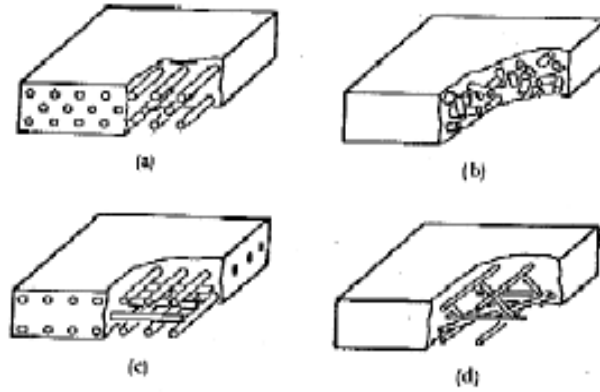
Fiber takviyeli kompozit malzemelerde bileşen malzemeler, moleküler boyutta birbirinden farklıdır ve mekanik olarak birbirinden ayrılabilirler. Kompozit malzemelerin son özellikleri, bileşen malzemelerin özelliklerinden daha iyidir (Mazumdar, 2002)

Tipik kompozit malzeme, takviye fiberlerinin Şekil 1.15'te görüldüğü gibi, matris içine yerleştirilmesiyle olur. Fiberler filament, kısa veya uzun fiber olabilir. Polimerik matrislerin kullanıldığı kompozitler daha yaygınlaşmıştır ve birçok endüstride kullanılmaktadır.

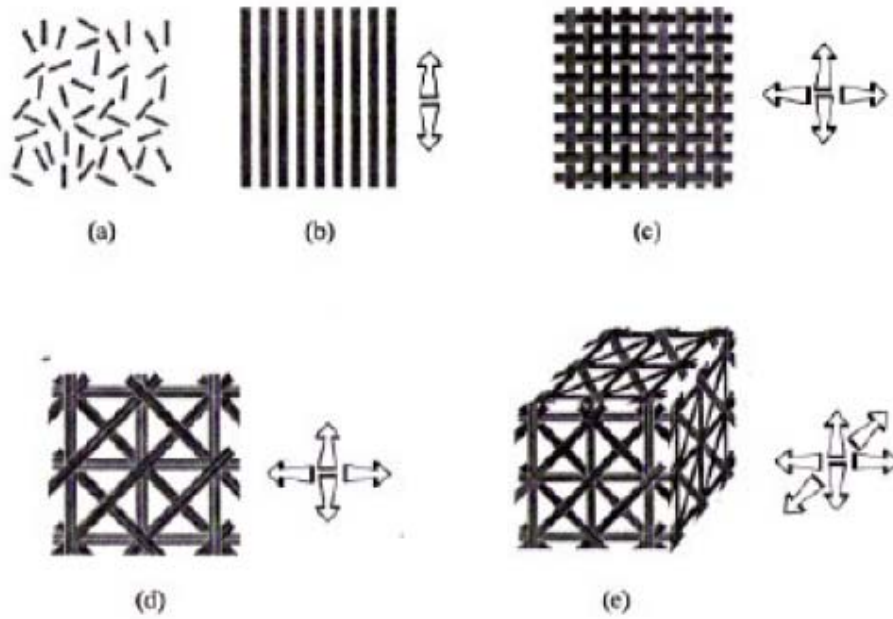
Matris (reçineler) termoset veya termoplastik olabilir. Takviye fiberleri, uzun filament fiberlerden, dokuma kumaş, kısa kesilmiş fiberler ve hasıra kadar değişik formlarda olabilirler. Her biçim ayrı özelliklerle sonuçlanır. Kompozit malzemenin özellikleri, fiberlerin kompozit içerisinde nasıl uzandığına çok kuvvetli biçimde bağlıdır. Bu kombinasyonların tümü ya da sadece biri kompozitlerde kullanılabilir. (Ersoy, 2005)

Elyaf formu; uygulama alanına (yapısal veya yapısal olmayan) ve kompozit malzeme üretim metoduna göre seçilir. Yapısal uygulamalar için filament veya uzun fiberler önerilir, yapısal olmayan uygulama alanlarında ise kısa fiberler tavsiye edilir. Enjeksiyon ve baskı kalıplamada kısa (kırpık) fiberler kullanılırken, elyaf sarma, profil çekme, rulo sarımda filament fiberler kullanılır. (Mazumdar, 2002).

Elyaf takviyeli kompozitlerde yumuşak ve sünek matris içine sert, dayanıklı ve elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Matris malzemesi, kuvveti elyaflara transfer ederek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Bu elyaf takviyeli kompozitlerde oldukça değişik takviye elemanları kullanılmaktadır. Elyaflar, örme veya şerit fitil şeklinde olabilmekle beraber tabakalar halinde yönlü elyaflar da kullanılır. Elyafların dayanımı kompozit yapının dayanımı açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların boy/çap oranları arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı da artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da dayanım açısından çok önemlidir. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmesi ile elyaflar doğrultusunda yüksek dayanç sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük dayanç elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Sürekli elyaflara göre kısa elyafli kompozitler, üretim işleminin hızlı ve maliyetinin düşük oluşu ve şekil değiştirme yeteneğinin yüksek olması nedeni ile tercih edilirler. (Ekrem, 2006)



Şekil 1.16. Elyaf takviye edilmiş kompozitlerin farklı morfolojileri (a) Sürekli tek yönlü elyaflar, (b) Gelişi güzel yönlendirilmiş sürekli elyaflar, (c) Ortogonal (enine ve boyuna) elyaflar, (d) açılı yerleştirilmiş elyaflar (Şamiloğlu, 2007)

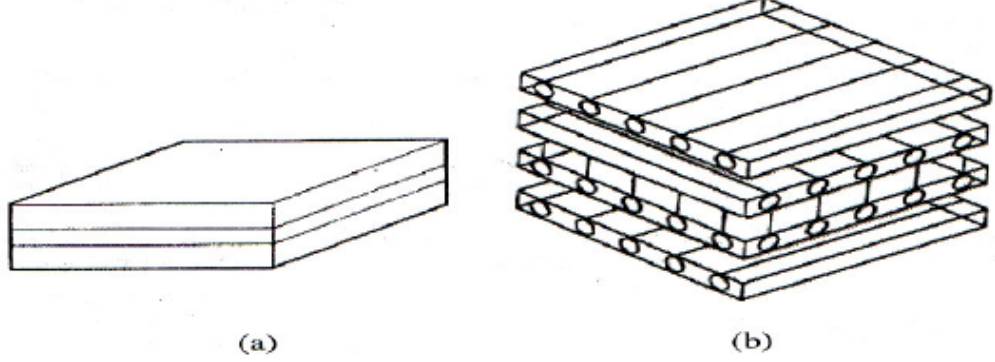


Şekil 1.17. Fiber ve dokuma takviyeli kompozitlerde Fiberlerin kompozit içerisine yerleşim biçimlerine örnekler (a) kesikli gelişi güzel, (b) sürekli tek yönlü, (c) sürekli düzlemsel iki yönlü, (d) sürekli düzlemsel üç yönlü, (e) üç boyutlu (oklar, mekanik dayanımın iyi olduğu yönleri gösterir.) (Demircioğlu, 2006)

### 1.3.2.2 Tabaka Yapılı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozitler Şekil 1.18’de gösterildiği gibi, temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönleredeki tabakaların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı (laminat)

kompozitlerin elde edilmesiyle oluşmaktadır. Laminetler, matris içerisine rasgele yönelmiş elyaflar, tek yönlü elyaflar veya farklı elyaf takviyeli tabakalardan oluşabilir. Bu kompozitler de tabakaların dayanımı, rijitlik, korozyon direnci, yalıtkanlık gibi özellikleri geliştirilebilir. (Şamiloğlu, 2007)



Şekil 1.18. Tabakalı bir kompozit yapısı (a) İzotropik, (b) Ortotropik yapı (Şamiloğlu, 2007)

### 1.3.2.3 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir veya birkaç farklı malzemenin matris görevi görerek oluşturduğu kompozitlerdir. Beton bunlara en iyi örneklerden biridir. Metal veya metal olmayan malzemeler kendi içerisinde değişik kompozitler oluşturabilir ve sınıflandırılabilirler. Son yıllarda özellikle inşaat sektöründe betonarme içerisine çok değişik fiber uygulamaları uygulanmakta ve geliştirilmektedir. (Şamiloğlu,2007)

Parçacık takviyeli kompozitlerde takviye malzemesinin boyutları, takviye malzeme özelliklerinin, kompozit malzemeye olan katkısını belirler. Aynı zamanda uzun boyutlara sahip takviye elemanı, oluşan çatlakların büyümesini engeller. Bu nedenle fiberler, matrisin kırılma dayanımını geliştirmek için etkili takviyelerdir.(E.M.H. Vol.1, 1987) Parçacıklar genelde kırılma dayanımını geliştirecek bir etki göstermezler. Bunun yanında lastik türü malzeme parçacıkları, özellikle gevrek matrislerde kırılma dayanımını artırmaktadır. (Ersoy, 2005)

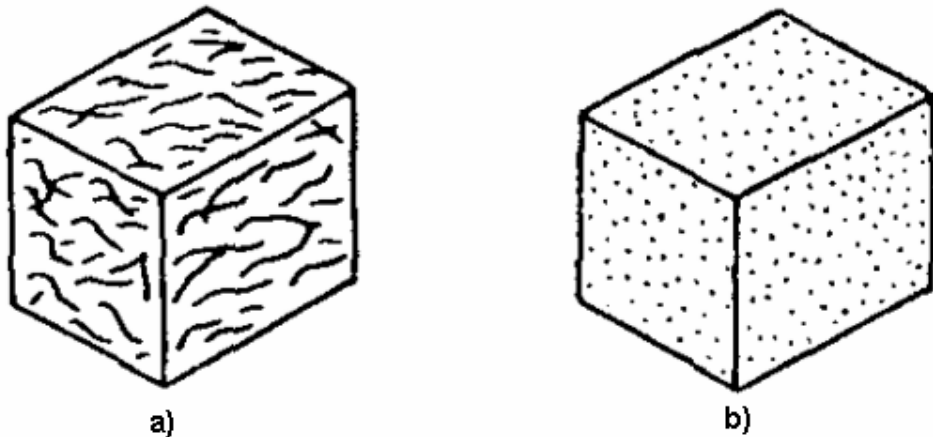
Parçacıklar matrise kıyasla doğalarındaki sertlik nedeniyle, matrisin plastik deformasyonunda bazı kısıtlamalara neden olur. Parçacıklar da yükü paylaşmaktadır. Fakat fiberlerin yük eksenine paralel olarak yerleştirildiği kompozitlere kıyasla bu, çok düşük bir seviyededir. Bu nedenle parçacıklar, kompozitin sertliğini arttırmada etkili olurken, dayanımı arttırmada fazla bir etkiye sahip değildirler. Parçacık dolgular, her ne kadar yaygın olarak ısı ve elektriksel iletkenliği değiştirmek, yüksek sıcaklık performansını geliştirmek, sürtünmeyi azaltmak, aşınma dayanımını arttırmak, makinede işlenebilirliğini geliştirmek, yüzey sertliğini arttırmak ve büzülme (çekme)yi azaltmak amaçları için kullanılsa da, birçok durumda sadece maliyeti

azaltmak için kullanılırlar. İnorganik dolgular oldukça etkili şekilde, yüzey sertliğini artırmak, büzülmeyi azaltmak, alev yavaşlatıcılığını artırmak, renk sağlamak, görünümü geliştirmek, ısı ve elektriksel iletkenlikleri değiştirmek ve en önemlisi maliyeti düşürmek amaçlarıyla, diğer istenen özelliklerden önemli bir taviz vermeden kullanılmaktadırlar. (Agarwall, 1980)

Birçok önemli ticari elastomerler karbon siyahı veya silis ile dolgu yapıldığında uzayabilirliğini (elastikiyetini) önemli ölçüde korurken, mukavemet ve aşınma dayanımı gelişmektedir. (Ersoy, 2005)

İnce tabakalar etkili bir takviye için cazip özellikler göstermektedirler. Öncelikle 2 D (2 boyutlu) geometriye sahiptirler ve bu nedenle tek yönlü takviyelendirilmiş Fiberlerle kıyaslandığında, kendi düzlemlerinde her yönde eşit dayanım gösterirler. Tabakalar paralel olarak yatırıldığında Fiberlerden ya da küresel parçacıklardan daha sıkı paketlenirler. Mika tabakalar elektrik ve ısı izolasyon uygulamalarında kullanılır. Mika tabakaların camsı bir matrise gömülerek oluşturulduğu kompozitler, kolay işlenebilir ve elektriksel uygulamalarda kullanılabilir. Alüminyum tabakalar genelde boya ve diğer kaplamalarda, kendilerini kaplama yüzeyine paralel bir şekilde yönlendirir ve olağanüstü iyi özellikler verir. Gümüş tabakalar iyi bir iletkenlik gerektiğinde kullanılırlar. (Agarwall, 1980)

Parçacık dolgulu malzemede performansı etkileyen çok değişik unsurlar vardır. Bunların içinde, parçacık boyutları boyut dağılımları, yüzey enerjileri (yapışma etkisi nedeniyle), hacimsel oranlar, homojen dağılıp dağılmadıkları, eksen oranı denilen parçacığın iki ana eksen uzunluğunun oranı, üretim sırasında eksenlerin yönlenme miktarı, tek-tek ve birbirleriyle bağımlı olarak kompozit özelliklerini etkiler. Bu konularda şimdiye kadar yapılan çalışmalar sağlam bir teoriye dayanmaktadır. Ancak, bu karşılıklı ilişkiler yumağı bazen en güçlü bilgisayar kullanılarak yapılan modellemelerde bile bize ön tahmin yapma imkanı vermeyebilir. Bu tip kompozitlerde, örneğin, katı roket yakıtlarından dolgulu PVC malzemeye kadar geniş bir alanda araştırmalar devam etmektedir. (Ersoy, 2005)



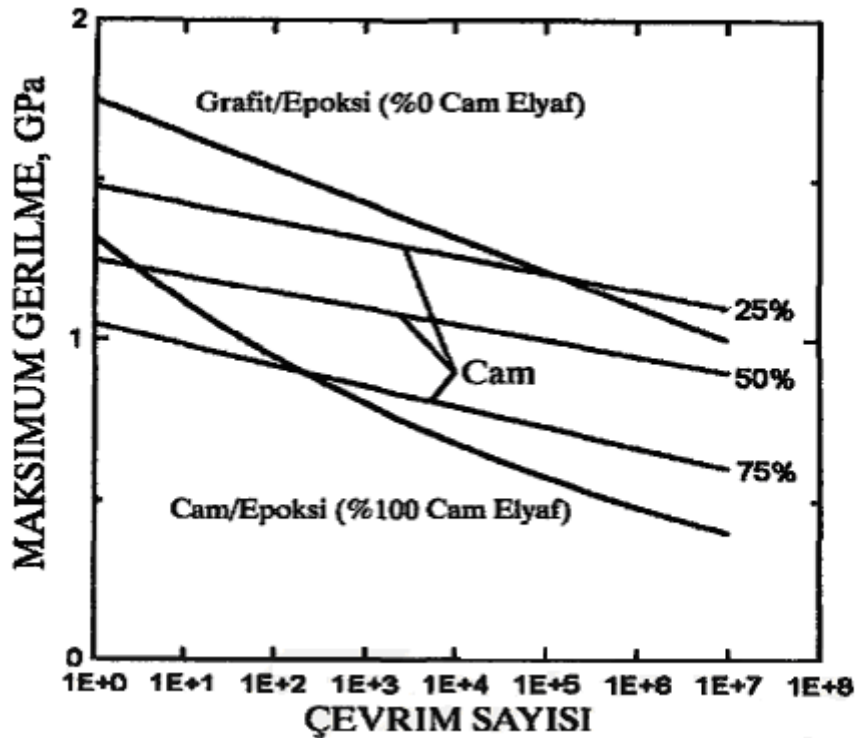
Şekil 1.19. a) Fiber ve b) tanecik takviyeli kompozit iç yapısı



Tanecik takviyeli kompozitlerde, takviye amacıyla kullanılan malzemenin üç yöndeki boyutları arasında önemli ve belirgin bir fark yoktur. Pul, pelet, granül, küre, disk gibi geometrilerdeki veya şekilsiz küçük kırıntılar bu grupta yer alır. (Demircioğlu, 2006)

#### 1.3.2.4 Çok Bileşenli (Hibrit = Melez ) Kompozitler

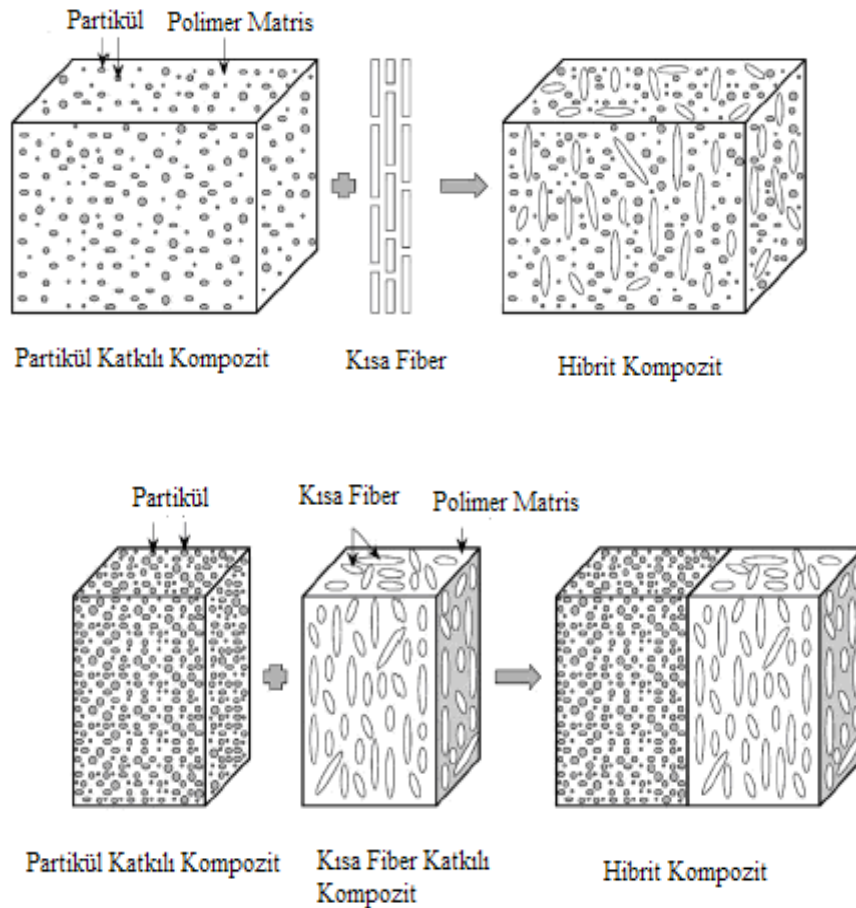
Hibrit kompozitler, aynı matris içinde değişik en az bir başka tip elyaf içeren yapılardır. Hibrit, çeşitli tip elyaflarda mevcut olan özelliklerin bir araya getirilerek, istenilen özellikte yapıların oluşturulmasıdır. Örneğin aramid elyaf, rijitliğin iyi olması nedeni ile grafit elyaf da yorulma direncinin iyi olması sebebiyle, bu iki elyaf birleştirilip istenilen özellikte kompozit malzeme yapılabilir. (Derrien vd., 2000; Smith vd., 1996; Derrien vd., 2000) Örneğin helikopter pervanesinde grafit ve cam hibriti karışımı kullanılmaktadır. Grafit elyafı pahalı olduğu için maliyeti azaltmak amacıyla, içine istenilen özellikleri verecek miktarda cam elyaf yerleştirilerek amaca uygun kompozit malzeme üretilir. Şekil 1.20'de reçinesi epoksi olan, tek yönlü grafit ve cam hibrit kompozit örnekleri görülmektedir. Sadece takviye elemanı olarak cam elyaf yerleştirilirse, yorulma dayanımı en düşük düzeyde olur. Malzemeye grafit elyaf takviye edildikçe yorulma dayanımı artar. (Harris 2000; Kelly 2004)



Şekil 1.20. Epoksi matrisli tek yönlü grafit ve cam elyaf hibrit kompoziti için cam fiber miktarı değişen malzemelerde yorulma dayanımının karşılaştırılması ( Mallick, 1988)

Termoset ve termoplastik reçinelerinin desteklenmesinde kullanılan grafit , kevlar veya cam fiberleri değişik kombinasyonlar şeklinde birlikte kullanılabilirler . Böylece, iki veya daha fazla farklı fiberlerden oluşan karma (melez) fiberler veya hibritler, elde edilen kompozit malzemeler de hibrit kompozitleri şeklinde adlandırılırlar. (Gibson vd., 1994) Pekiştirici bileşenlerinin faydalı özelliklerinin birlikte kazanılması kompozit malzemenin çok daha dengeli olmasını sağlar.

Hibrit kompozitlerde termoset veya termoplastik reçineler kullanılabilir. Epoksi reçineleri hibrit uygulamasının en çok kullanıldığı termoset türü plastikler olup bunu termoset polyesterler izler. (Hull, 2004) Epoksi reçineleri bileşimlerine bağlı olarak düşük, orta veya yüksek çekme modülü gösterebilirler. Hibrit uygulamaları için çekme modülü orta değerlerde kalanlar en çok tercih edilenlerdir. Polimid reçineleri, kullanım sıcaklığının 250 °C civarında olduğu uygulamalarda hibrit kompozitleri için matris malzemeleri olarak kullanılırlar.



Şekil 1.21. Hibrit kompozitlerin çeşitleri. (Shau-Yun vd., 2002)

Termoplastik reçinelerin hibrit yapıli kompozitlerde kullanımı nispeten yenidir . Naylon , polisülfon(PS) , pofiberenilen sülfite (PPS) , polibutilen teraftalat (termoplastik polyester ) reçineleri hibrit kompozitleri için matris malzemeleri olarak kullanılabilirler. (Kim vd., 1997)

Hibrit kompozitleri için değişik fiber – reçine kombinasyonları vardır. Epoksi ve polyester reçineleri ile grafit, keklar ve cam pekiştiricilerinin kullanıldığı sistemler endüstriyel bir öneme sahiptir. Matris malzemesinin iki farklı özellikteki fiberle pekiştirilmesi önemli avantajlar sağlayabilir. Örneğin, grafit fiberlerinin çekme mukavemeti ve modüllerinin yüksek olmasına karşılık darbe dirençleri düşüktür. Kevlar fiberlerinin ise darbe özellikleri yüksek fakat grafit oranla çekme modülleri düşüktür. Bu iki fiber birlikte Epoksi reçinesi gibi bir matriste kullanıldığında, yüksek mukavemet, yüksek modül ve yüksek tokluk özellikleri birlikte kazanılır.(Derrien vd., 2000) Böylece pekiştirici fazlardan birinin zayıf olan özelliği diğer bileşen tarafından dengelenir. Polyesterlerde cam ve grafit fiberlerinin birlikte kullanılması optimum mekanik özelliklere sahip kompozitlerin ekonomik bir şekilde kullanılmasını sağlar. Grafitin yüksek mukavemet ve modülü mekaniksel özelliklerini artırırken, cam pekiştiricilerinin ucuzluğu maliyeti düşürür.

Hibritler değişik formlarda kullanılabilirler. Farklı pekiştiriciler ayrı ayrı tabakalar halinde kullanılabilereği gibi iki pekiştiricinin birlikte dokunmasıyla elde edilen karışımlarda kullanılabilir. (Jendli vd., 2004)

Hibrit kompozitleri basınçlı kalıplama , transfer kalıplama , profil çekme, flaman sarma, enjeksiyonla kalıplama , kalıpta ve otoklavda torbalı kalıplama teknikleriyle üretilebilirler. Uçaklarda kullanılan Epoksi – bor – grafit , otomotiv endüstrisinde kullanılan Epoksi – grafit – keklar ve epoksi – bor – grafit kompozitleri plastik matrisli hibrit kompozitlerine tipik örnek teşkil eder. (Sanjay vd., 2002)

### 1.3.2.5 Diğer Destekleyici ve Dolgu Malzemeleri

Plastiklerin pekiştirilmesinde cam , karbon , bor , keklar fiberleri ve bunlardan elde edilen çeşitli tekstil ürünlerinin yanı sıra , daha az oranlarda olmak üzere talk, bazı oksitler, karbonatlar, silikatlar ve metal gibi inorganik malzemelerle polipropilen, akrinoritril, polyester, keten gibi organik esaslı pekiştiriciler veya dolgu malzemeleri kullanılır. Talk, kristal suyu içeren bir magnezyum silikat ( $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) olup iğnesel şekilli partiküller, plakalar veya mikro boyutlu fiberler şeklinde polivinilklorür (PVC) ve polipropilen termoplastiklerinde ısıl distorsiyon sıcaklığını arttırmak amacıyla kullanılır. (Güleşen, 2005) Kalsiyummetasilikat termoplastiklerde ısıl kararlılığı artırıcı bir etkiye sahiptir. Silikonlu bileşiklerde kaplandıda polipropilenin eğme ve çekme mukavemetini bir miktar arttırabilir. Kalsiyum karbonat, poliolefinlerin ve PVC'nin rijitliğini düşük seviyelerde arttırır, çekilme miktarını düşürür. Esas kullanım amacı maliyeti düşürmektir. Potasyum titanat whiskerleri

ABS lastiği, polipropilen, naylon, PVC gibi termoplastiklerin pekiştirilmesinde kullanılır.  
(Daniel vd., 1994)

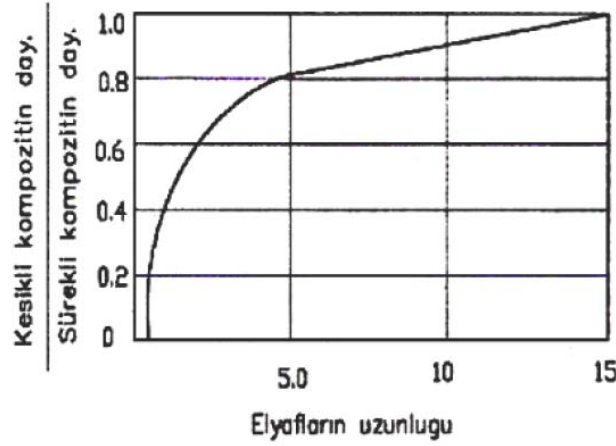
Çizelge 1.5. Karbon-Cam-Polyester Kompozitlerin Özellikleri

<b>Karbon-Cam Oranı</b>	<b>Çekme Mukavemeti kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Young Modülü kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Eğme Mukavemeti kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Eğme Modülü Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Tabakalararası Kayma Mukavemeti kg/cm<sup>2</sup></b>
0/100	6169	0,41x10 <sup>6</sup>	9636	0,36x10 <sup>6</sup>	673
25/75	6536	0,65x10 <sup>6</sup>	10830	0,65x10 <sup>6</sup>	755
50/50	7036	0,91x10 <sup>6</sup>	12440	0,80x10 <sup>6</sup>	773
75/25	8229	1,26x10 <sup>6</sup>	12869	1,26x10 <sup>6</sup>	846

## 1.4 Kompozit Malzemelerin Mikro Mekanığı

### 1.4.1 Süreksiz Elyafı Takviyeli Kompozit Malzemeler

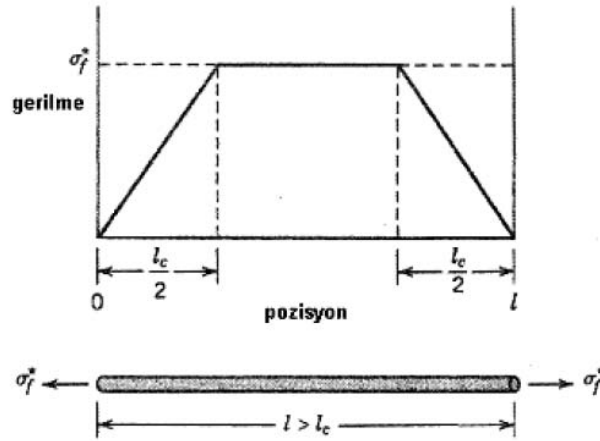
Çoğu kompozitler; kırılmış, kısa boylu ve whiskerlar ( kılcal ) şeklinde kesikli elyaf içerirler. Bu şekildeki kompozitler aynı elyaf hacim oranlarında sürekli elyaf takviyeli kompozitlerden daha düşük dayanım verir. Ancak daha uzun kesikli elyaflardan oluşan kompozit daha dayanıklıdır. Çok uzun elyaflar için dayanım sürekli elyaf takviyeli kompozitlere yaklaşmaktadır. (Demircioğlu, 2006)



Şekil 1.22 Kesikli ve sürekli elyafı kompozitlerde elyaf uzunluğunun fonksiyonu olarak çekme dayanımı oranlarının değişimi.

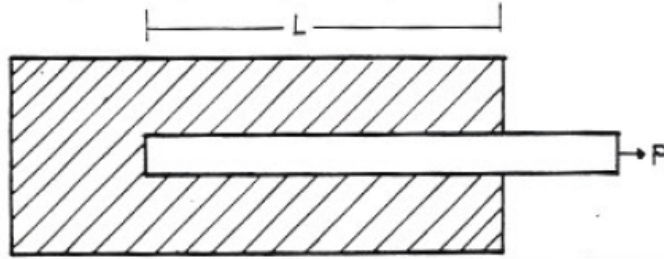
Tek yönlü sürekli elyaf takviyeli kompozitlere bir kuvvet uygulandığında kompozit önce elastik olarak deforme olur. Bunun sonucu olarak da kompozitte meydana gelen uzama miktarları,  $\epsilon_m < \epsilon_f$ , elyaf  $< \epsilon_f$  yani ;  $\epsilon_m = \epsilon_c = \epsilon_f$  ile aynıdır.

Mühendislik uygulamaları için geliştirilen kompozit malzemelerin çoğunda süreksiz elyaflar kullanılır. (Strong, 2008) Elyaf malzemenin boyunca uzamadıklarından elyafı matris arasındaki bağ orta kısımlara göre daha düşük oranlarda gerilme taşıyan elyaf uçlarında kopar. Böylece süreksiz bir elyaftaki çekme gerilmesi, elyaf uzunluğuna göre Şekil 1.23'te gösterildiği gibi değişecektir.



Şekil 1.23 Süreksiz elyaf kompozitlerde çekme gerilmesinin elyaf boyuna göre değişimi

Şekil 1.23'ten görüldüğü gibi elyaflardaki gerilme uçlarda düşük olup belirli bir mesafede maksimum değerine ulaşmakta ve elyafın orta kısımlarında sabit kalmaktadır. Gerilmenin uç kısımlarda düşük olması nedeniyle mukavemet hesaplamalarında elyafın maksimum gerilmesi yerine ortalama gerilmesinin alınması gerekir. Süreksiz elyaf kompozitlerde, elyaflar genellikle elastik davranış gösterirler. Elyafların elastik, matrisin elastik veya plastik davranmaları durumuna göre kompozit malzemeye gelen gerilmenin elyaflara ne şekilde transfer edildiğini anlamak için Şekil 1.24'te gösterilen sistemi göz önüne alarak  $d_e$  çapındaki bir elyafın, matris içerisinde  $l$  mesafesine kadar yer aldığı ve matris ile kusursuz ara yüzey bağı oluşturduğunu kabul edelim. (Demircioğlu, 2006)



Şekil 1.24 Matris içine gömülmüş elyaf

Elyafa bir çekme gerilmesi uygulandığında elyaf-matris ara yüzeyinde kayma gerilmesi oluşur. Bu kayma gerilmesine göre elyafın üzerine etkileyen kuvvet Eş 1.1'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot l \cdot \tau$$

$$(1.1)$$

Elyaf-matris ara yüzeyindeki kayma gerilmesinin maksimum değeri  $\tau_{\max}$ , elyafın kopma gerilmesi  $\sigma_f$  ile gösterildiğinde elyaf üzerindeki çekme kuvveti arttırılırsa matristen ayrılmadan ( ara yüzeyde sıyrılmadan ) kopabilmesi için Eş 1.2'deki gibi olmalıdır.

$$2.\pi.r_e.l.\tau_{\max} > \pi.r_e^2.\sigma_f \quad (1.2)$$

$d_e = 2r_e$  alındığında bu koşul;

$$l/d_e = \sigma_f / 4 \tau_{\max} \quad (1.3)$$

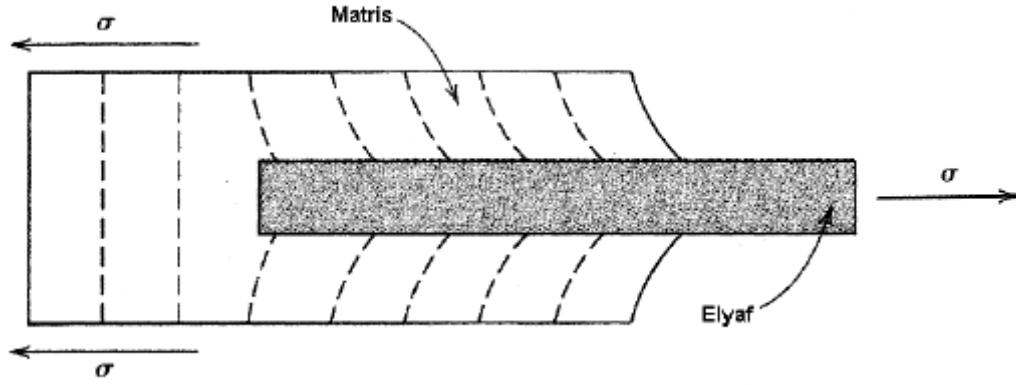
şeklinde yazılabilir.  $l/d_e$  oranı “ şekil oranı” olarak adlandırılır. Bu oran elyafın matristen ayrılmadan kopabilmesi için gereken değerdir. Eş 1.3 elyafın mukavemet artışında etkili olması için yeterince ince ve uzun olması gerektiğini göstermektedir.

Ara yüzeydeki kayma gerilmesi yüksek olduğunda  $l/d_e$  oranının küçülmesi mümkündür. Şekil 1.25'e göre elyafın çekme mukavemetinde  $l = l_c / 2$  mesafesine ulaşıldığından, Eş 1.3'te  $l$  yerine  $l = l_c / 2$  yazılarak;

$$l_c / d_e = \sigma_f / 2\tau_{\max} \quad (1.4)$$

$l_c / d_e$ ; “kritik şekil oranı” olarak adlandırılır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, bileşenlerinin özelliklerine ve uygulanan yükün matris tarafından elyaflara iletme derecesine bağlıdır. Bu iletim temel olarak elyaf ve matris arasındaki bağ ile sağlanır. Kesikli elyaflarda elyaf matris arasındaki bağ elyafın sonunda kesilmektedir. Bu, her bir elyafın sonunda, matristen elyafa bir yük transferi olmaması anlamına gelir. Şekil 1.25'te elyaf yönü boyunca uygulanan çekme yükünde elyaf çevresindeki matriste meydana gelen deformasyona örneği gösterilmiştir. Deformasyonun elyafın sonuna doğru azaldığı görülmektedir. (Demircioğlu, 2006)

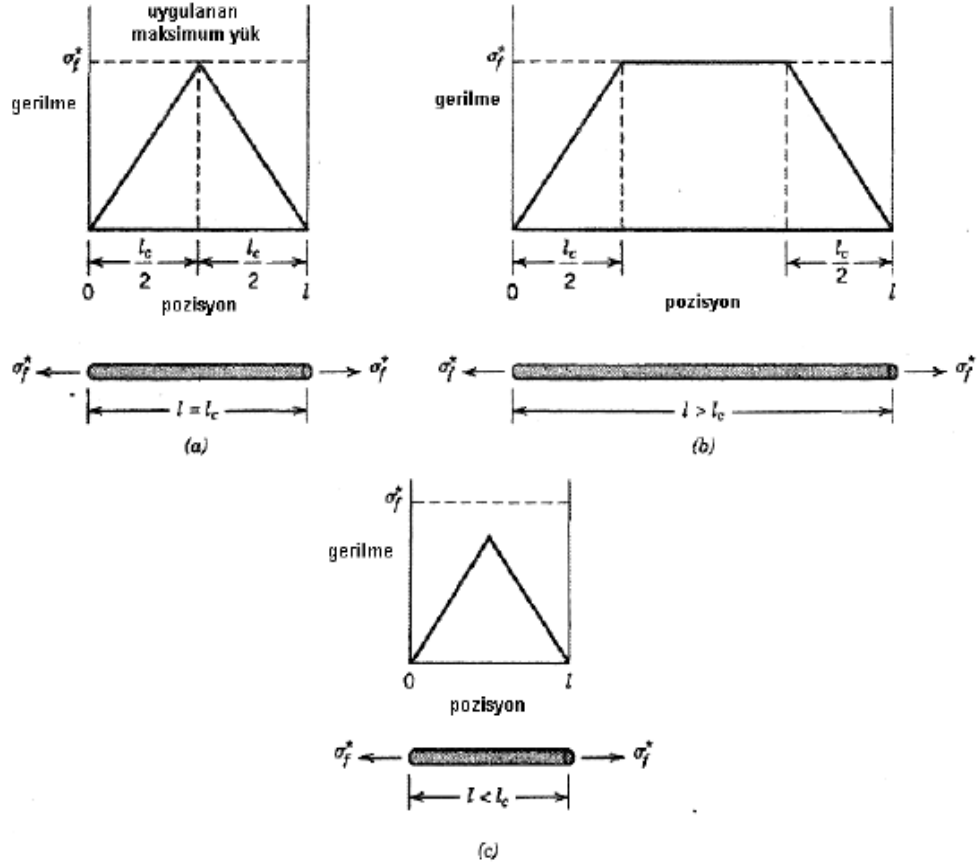


Şekil 1.25 Çekme yükü uygulandığında elyaf çevresindeki matriste görülen deformasyon örneği

Yukarıda anlatıldığı gibi, eğer elyaf takviyesinin boyu çok kısa olursa, matristen elyafa yük aktarılamaz veya yükün çok küçük bir kısmı aktarılabilir. Bu da kompozit malzemede elyaf takviyelendirme ile anlamlı bir dayanım artışı sağlanamaması anlamına gelir. (Demircioğlu, 2006)

Kompozit,  $\sigma_f$ 'e eşit bir gerilmeye maruz kalırsa, Şekil 1.25'te gösterildiği gibi gerçek elyaf boyu ile kritik elyaf boyu arasındaki ilişkiye göre üç farklı durum oluşur. Şekil 1.26 elyaf gerilim-pozisyon profillerini, elyaf uzunluğuna göre verilmektedir. Elyaf uzunluğu kritik uzunluğuna,  $l_c$ , eşit olduğunda, maksimum elyaf yüküne sadece elyafın aksenal merkezinde ulaşılır. ( Şekil 1.26.a) Elyaf uzunluğu kritik uzunluktan büyük olduğunda, elyaftaki gerilme uçlarda düşük olup belirli bir mesafede maksimum değerine ulaşmakta ve elyafın orta kısımlarında sabit kalmakta, elyaf daha fazla maksimum kuvvet taşımaktadır. (Şekil 1.26.b) Elyaf uzunluğu kritik elyaf uzunluğundan küçük olduğunda ise maksimum elyaf gerilmesine ulaşamaz, yeterli miktarda yük taşınamaz. ( Şekil 1.26.c)





Şekil 1.26 Elyaf gerilim- pozisyon profilleri

Tüm yukarıda anlatılanlardan dolayı, elyaf boyu, kritik elyaf boyundan ne kadar uzun olursa kompozitin dayanım ve tokluğuna o kadar katkıda bulunacağı açıktır. Sürekli elyaf ( $l > l_c$ ) takviyeli kompozitlerin süreksiz elyaf takviyeli kompozitlere göre daha iyi dayanım göstermeleri de bundan dolayıdır. Çizelge 1.6'da farklı kompozit sistemlerin kritik boy/çap oranları ve kritik kesitli elyaf uzunlukları verilmektedir. (Demircioğlu, 2006)

Çizelge 1.6 Kritik kesikli elyaf uzunluğu ( $l_c$ ) ve kritik boy/çap ( $l_c/d$ ) değerleri

Matris Cinsi	Kayma Dayancı	Elyaf Türü	Mukavemet	Elyaf Boyu-Çapı	Boy/Çap Oranı
Gümüş	55	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20800	2-0,38	189
Bakır	76	Tungsten	2900	2000-38	19
Alüminyum	80	Boron	2800	100-1,75	18
Epoksi	40	Boron	2800	100-3,5	35
Polyester	30	Cam	2400	13-0,52	40
Epoksi	40	Karbon	2600	7-0,23	33

### 1.4.2 Sürekli Elyafı Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin elastisite modülü ;

$$E_k = E_0 \cdot V_0 + E_m \cdot V_m \text{ 'dir.} \quad (1.5)$$

Kompozitin elastisite modülü gerilme ve şekil değiştirme cinsinden yazılırsa ;

$$E_k = \sigma_k / \varepsilon \text{ olur.} \quad (1.6)$$

Aynı şekilde elyafın ve matrisin elastisite modülü;

$$E_e = \sigma_e / \varepsilon \text{ ve } E_m = \sigma_m / \varepsilon \quad (1.7)$$

Kompozite etkiyen kuvvet P, ve kuvvete dik kesit alanını  $A_k$  ile gösterilirse;

$$P = \sigma_k \cdot A_k \text{ olur.} \quad (1.8)$$

Bu eşitlikte elastisite modülü gerilme cinsinden yazılırsa;

$$\sigma_k / \varepsilon = (\sigma_e / \varepsilon) \cdot V_e + (\sigma_m / \varepsilon) \cdot V_m \quad (1.9)$$

elde edilir.

$$\varepsilon = \varepsilon_k = \varepsilon_e = \varepsilon_m$$

olduğu kabul edilirse, kompozit malzemelerin mukavemet değeri karışımlar kanununa göre verilebilir.

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m \quad (1.10)$$

$$V_m = 1 - V_e \quad (1.11)$$

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e) \quad (1.12)$$

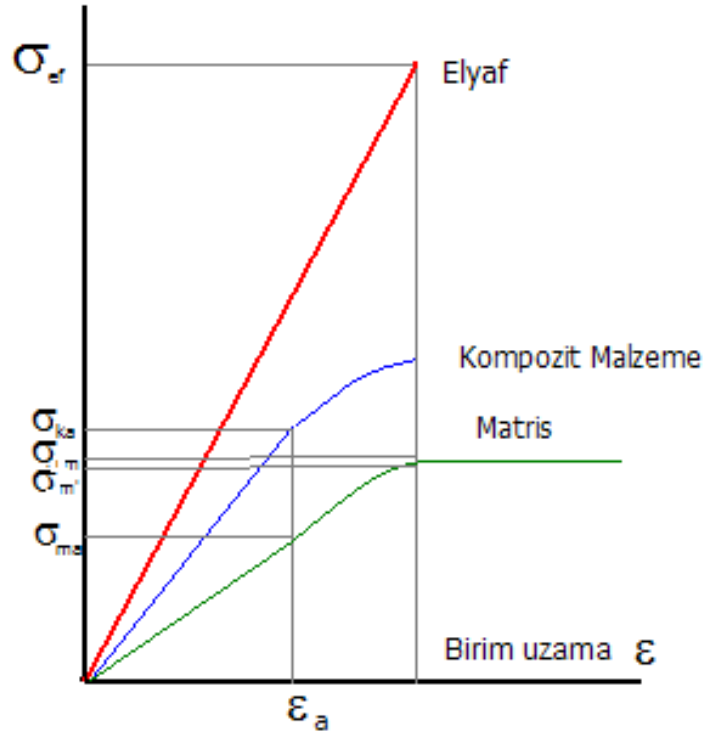
bulunur. Burada ;

$\sigma_k$  = kompozitin dayanç değeri

$\sigma_e$  = elyafın dayanç değeri

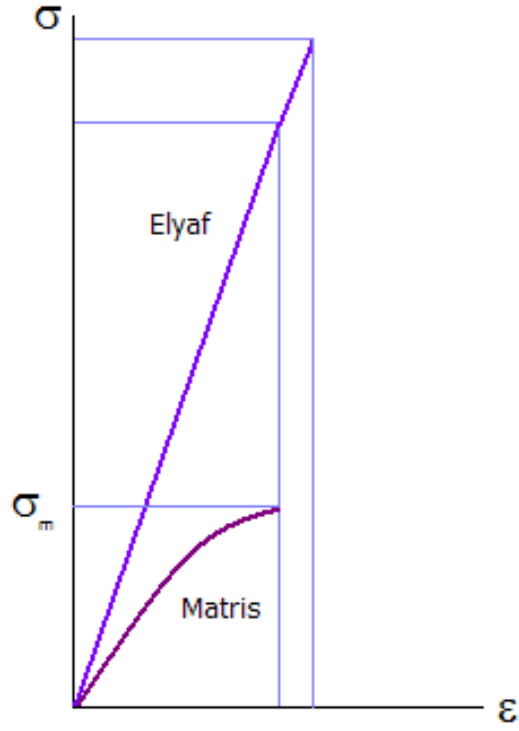
$\sigma_m$  = matrisin dayanç değeri

Kompozitin gerilme ifadesi, Şekil 1.27’de verilmiştir. Fakat unsurların incelenmesi için gerilme-şekil değiştirme diyagramı basit bir modeldir. (Sakin, 1994)

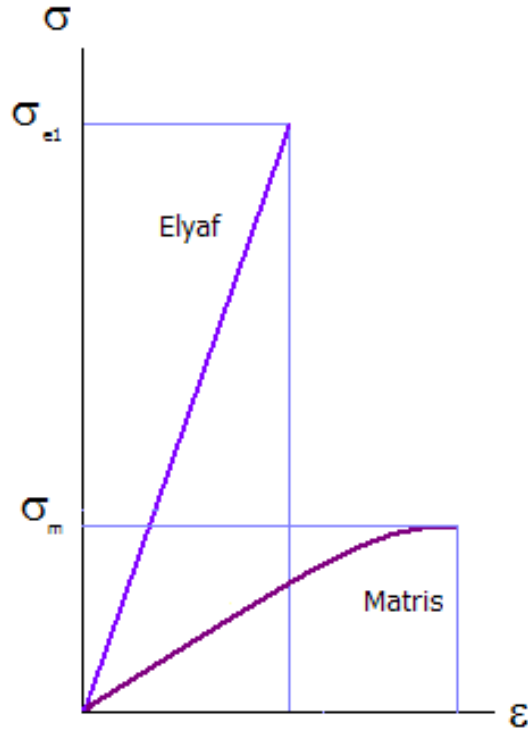


Şekil 1.27 Sürekli elyafla takviyeli kompozit malzemenin gerilme diyagramı

Şekil 1.28 ve Şekil 1.29 ‘da Hooke Kanunu’na göre, elyaf ( fiber) ve matris için, gerilme-şekil değiştirme eğrileri görülmektedir. (Sakin, 1994)



Şekil 1.28 Kompozitte  $\epsilon_e > \epsilon_m$  olduğu durumda  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramı



Şekil 1.29 Kompozitte  $\epsilon_e < \epsilon_m$  olduğu durumda  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramı

$\epsilon_e$  = Elyafın koptuğu andaki şekil değişimi

$\epsilon_m$  = Matrisin koptuğu andaki şekil değişimi

$\sigma_m$  = Elyaf lar koptuğ unda matristeki gerilme

$\sigma_{e1}$  = Matris koptuğ unda elyaflardaki gerilme

Kompozit malzemedeki kopma olayı incelenirken değ iş ik durumlar ortaya ç ıkabilir. Ç ünkü kopma anında elyaftaki ve matristeki uzamalar eş it olmamaktadır. Ş ekil 1.28'de görü ldü ğ ü gibi elyaf,  $\epsilon_e$  kadar uzadıktan sonra kopmaktadır, matrisin kopma uzaması elyafın kopma uzamasından fazladır. Matris bu durumda kopmaz ancak malzeme bu gerilmeyi de taşıyamaz. Elyaf koptuğ u anda matristeki gerilme  $\sigma_m$  değ erindedir ve bu da maksimum gerilmenin altında bir değ erdir. Ş ekil 1.28'de ise matrisin koptuğ u andaki uzaması, elyafın uzaması, elyafın uzamasından daha azdır. Bu durumda kompozit gerilmesini veren ifade ş u ş ekli alır;

$$\sigma_k = E_e \cdot \epsilon \cdot V_e + E_m \cdot \epsilon \cdot (1 - V_e) \quad (1.13)$$

$\epsilon$  = Matrisin ve ya elyafın koptuğ u andaki en düşük uzama miktarıdır.

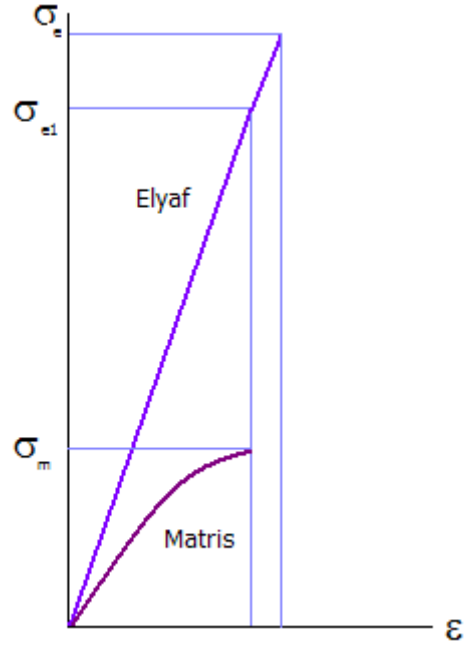
Kompozit malzemenin gerilmesini veren ifade bu iki duruma göre ař ağıdaki ş ekillerde verilebilir;

İlk olarak elyaf kopuyorsa ;  $\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot (1 - V_e)$

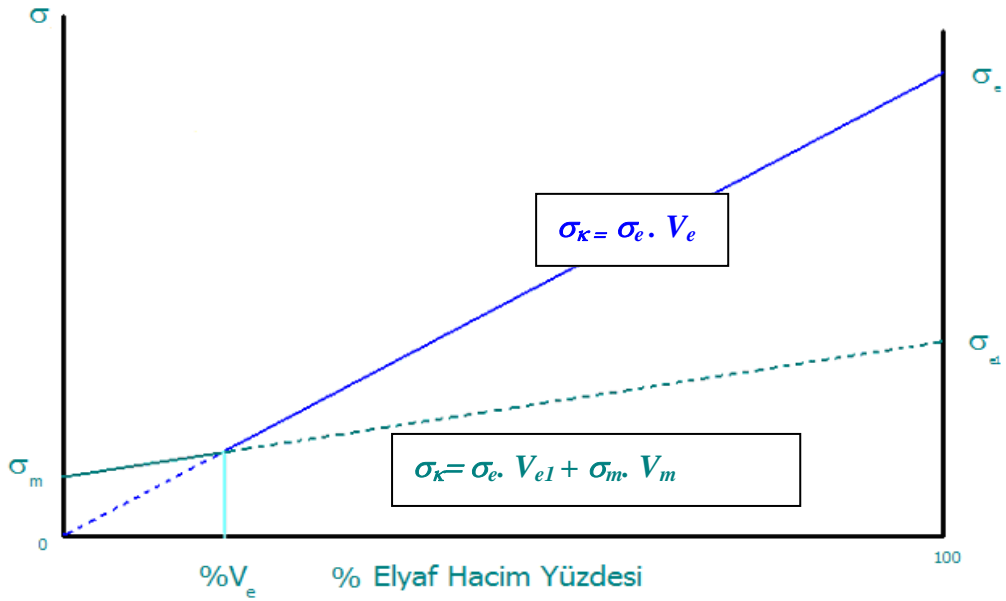
İlk olarak matris kopuyorsa;  $\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e)$

Kompozit malzemenin gerilme durumunu bir kaç değ iş ik ş ekilde tanımlayabiliriz;

- İlk kez matrisin kopma durumuna göre
- İlk kez elyafın kopma durumuna göre
- Maksimum yük taşıma kapasitesine göre



(a)



(b)

Şekil 1.30 (a) Elyafın şekil değiştirme miktarının matrisin şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ( $\epsilon_e > \epsilon_m$ ) gerilme-şekil değiştirme diyagramı (b) ( $\epsilon_e > \epsilon_m$ ) durumundaki elyaf yüzdesi-gerilme diyagramı

Şekil 1.30.'da  $\epsilon_e > \epsilon_m$  durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilen elyaf miktarı çok düşük tek yönlü kompozit ele alınır, kompozitin mukavemeti matrisin mukavemetine eşit kabul edilir. Kompozitin uzaması, matrisin kopma uzamasına eşit olduğunda kopar ve yük

elyaflara aktarılır. Elyaf miktarları da ( hacimsel olarak ) az olduğunda bu yük altında kopar. Bu durumda kompozitteki gerilme:

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m \text{ 'dir.} \quad (1.14)$$

Eğer elyaf miktarı fazla ise matrisin kopması kolay fark edilmez. Taşıdığı küçük miktarlardaki yük elyaflara transfer edilir, ancak bu önemsiz bir durumdur. Kompozitin yükü , elyaflar kopma uzamasına ulaşmıncaya kadar taşır ( teorik olarak ). Bu durumda kompozitteki gerilme ;

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e \quad (1.15)$$

Bu daha basit bir durumdur. Çünkü matris yükü elyaflara transfer etmeyecek kopma daha önce gerçekleşecektir. Şekil 1.30. (b)'de kompozitteki gerilmenin, elyafın hacimsel yüzde miktarlarına göre nasıl değiştiği görülmektedir. Bu iki durum için ortak nokta yukarıdaki eşitliklerden bulunabilir;

$$\sigma_e \cdot V_e = \sigma_{el} \cdot V_e + \sigma_m \cdot V_m \quad (1.16)$$

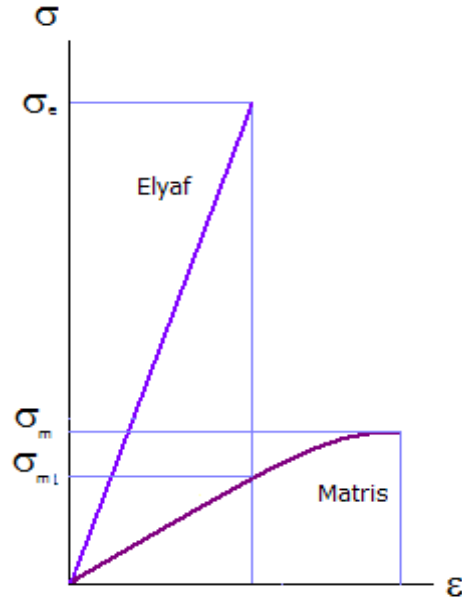
$$V_m = (1 - V_e) \text{ idi}$$

$$\sigma_e \cdot V_e = \sigma_{el} \cdot V_e + \sigma_m \cdot (1 - V_e) \quad (1.17)$$

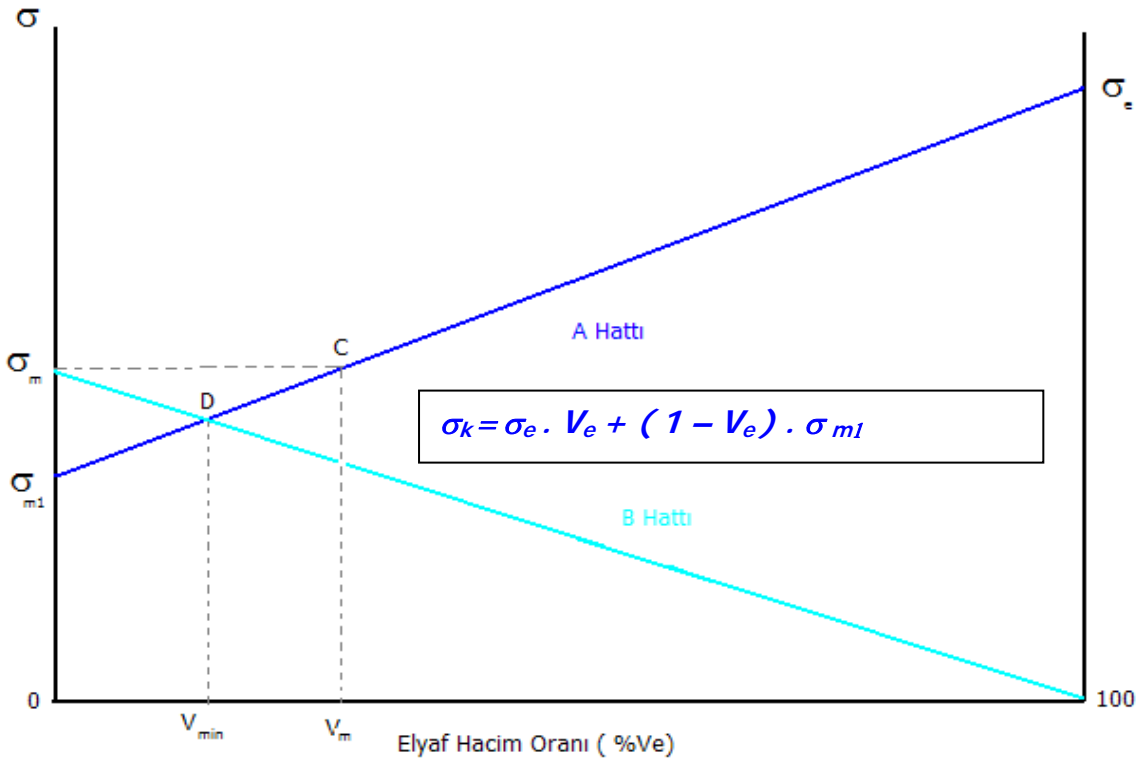
$$\sigma_{el} \cdot V_e + \sigma_m - \sigma_m \cdot V_e = \sigma_e \cdot V_e \quad (1.18)$$

$$\sigma_m = V_e \cdot (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{el}) \quad (1.19)$$

$$V_e = \sigma_m / (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{el}) \quad (1.20)$$



(a)



(b)

Şekil 1.31 (a) Matrisin şekil değiştirme miktarının elyafın şekil değiştirme miktarından büyük olduğu durumda ( $\epsilon_c > \epsilon_m$ ) gerilme-şekil değiştirme diyagramı (b)  $\epsilon_c < \epsilon_m$  durumundaki elyaf yüzdesi – gerilme diyagramı

Şekil 1.31’de  $\epsilon_c > \epsilon_m$  durumunda gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilen, tek yönlü, elyaf yüzdesi az olan bir kompoziti düşünelim. Elyafın kopma uzaması, matristen az olduğundan,



matrisin kopma uzamasına erişilmeden elyaf kopacaktır. Ancak kompozit yükü, matrisin kopma uzamasına erişilinceye kadar taşıyacaktır. Ancak, elyaf miktarının az olmasına rağmen kompozitin mukavemeti gerçekte azalacaktır. (Sakin, 1994)

Bu kez elyafın kompozit içindeki hacimsel yüzdesinin fazla olduğunu kabul edelim. Yine önce elyaflar kopacaktır, ancak oranın fazla oluşu ve yüksek modüllerden dolayı yükün büyük bir oranını taşımaktadırlar. O halde, kompozitin, matrisin mukavemetinden daha düşük mukavemet değerine sahip olduğu durumlarda, elyaf miktarı için kritik bir değer vardır. Bu durum Şekil 1.31. (b)' de verilmiştir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye etkisinin gerçekleşmesi için bulunması gereken minimum bir elyaf hacim oranı vardır. Bu değer altında yani çok az elyaf ile yapılan takviyelerde, daha rijit olan ve kuvveti tümüyle taşımak zorunda kalacak olan lifler kırılacaktır. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti taşıyacak olan matris kesitini de azalttığından dayanım düşüşlerine de neden olacaktır. Malzeme dayanımının en düşük olduğu noktadaki elyaf hacim oranı  $V_{min}$  ile gösterilir. (Sakin, 1994)

A hattı aşağıdaki eşitliği ifade eder.  $V_e > V_{min}$  ise yükü elyaf ve matris ortak olarak taşırlar. Bu durumda kopma dayanımı:

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m \quad (1.21)$$

Bu eşitlik, basit karışımlar kanunu eşitliğidir.  $\sigma_{m1}$  ise elyaf koptuğu anda matristeki gerilmedir. B hattı ise matris yüzde miktarına göre gerilimdeki değişimi ifade eder.  $V_e < V_{min}$  ise yükü matris taşıyacağından kopma dayanımı;

$$\sigma_k = \sigma_m \cdot V_m = \sigma_m \cdot (1 - V_e) \quad (1.22)$$

Grafikteki C noktası  $V_{krit}$  olarak bilinir ve kompozitin mukavemetinin, matrisin mukavemetine eşit olduğu hacimsel elyaf yüzdesini ifade etmektedir. D noktasını kompozitin mukavemetini minimum yapan hacimsel yüzdesini vermektedir. D noktası ile belirtilen  $V_{min}$  değeri kompozitin mukavemetini veren yukarıdaki eşitliklerden bulunur.

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m \quad (1.23)$$

$$\sigma_k = \sigma_m \cdot V_m \quad (1.24)$$

$V_{min}$  değerini bulmak için iki bağıntı eşitlenerek,  $V_e = V_{min}$  yazılır ve,

$$\sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m = \sigma_m \cdot V_m \quad (1.25)$$

$$V_m = 1 - V_e \quad (1.26)$$

$$\sigma_c \cdot V_c + \sigma_{m1} \cdot (1 - V_e) = \sigma_m \cdot (1 - V_e) \quad (1.27)$$

$$V_e \cdot (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{m1}) = \sigma_m - \sigma_{m1} \quad (1.28)$$

$$V_{\min} = (\sigma_m - \sigma_{m1}) / (\sigma_e + \sigma_m - \sigma_{m1}) \quad (1.29)$$

$V_{\text{krit}}$  değeri de benzer eşitliklerden yararlanılarak hesaplanır;

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot V_m \quad (1.30)$$

C noktasında  $\sigma_k = \sigma_m$

$$\sigma_m = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} \cdot (1 - V_e) \quad (1.31)$$

$$\sigma_m = \sigma_e \cdot V_e + \sigma_{m1} - (\sigma_{m1} \cdot V_e) \quad (1.32)$$

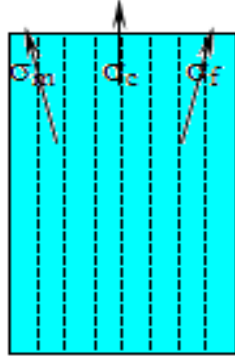
$$\sigma_m - \sigma_{m1} = V_e \cdot (\sigma_e - \sigma_{m1}) \quad (1.33)$$

$$V_{\text{krit}} = (\sigma_m - \sigma_{m1}) / (\sigma_e - \sigma_{m1}) \quad (1.34)$$

Şekil 1.31 (b)'den de görüldüğü gibi kompozit malzemenin dayanımının matrisin dayanımından büyük olması için, en az  $V_{\text{krit}}$  kadar elyafla takviye edilmelidir. (Sakin, 1994)

### 1.4.3 SMC Üretim Yöntemi İle Üretilmiş Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

SMC yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemelerin elastiklik modülü, çekme dayanımı, kopma dayanımı gibi mekanik özellikleri, çekme deneyi sonuçlarıyla bulunabileceği gibi, kompozitteki bileşenlerin oranları ve elastiklik modülleri belli olduğu durumlarda karışımlar kuralı ( the rule of mixture ) yardımıyla da bulunabilir.(Ünal, 2006)



Şekil 1.32 SMC yöntemi ile üretilmiş kompozit malzemedeki gerilim dağılımının şematik gösterimi

Eşit gerinim koşulunun ( $\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$ ), geçerli olduğu durumlarda fiberlere paralel yöndeki zorlama (1.35) eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$\sigma_{II} = \sigma_c = \sigma_f + \sigma_m \quad (1.35)$$

Fiberin elastiklik modülünün, matris elastiklik modülünden büyük olması durumunda ( $E_f > E_m$ ), yükün büyük bir kısmı fiberlerce taşınır. (Ünal, 2006)

Fibere gelen yük ( $P_f$ ), fiber gerilimi ( $\sigma_f$ ) ve fiber alanının ( $A_f$ ) çarpılmasıyla hesaplanır, (36) eşitliğindeki gibi,

$$P_f = \sigma_f \cdot A_f \quad (1.36)$$

matrise gelen yük ( $P_m$ ) ise, matris gerilimi ( $\sigma_m$ ) ve matris alanının ( $A_m$ ) çarpılmasıyla hesaplanır, (1.37) eşitliğindeki gibi ifade edilir

$$P_m = \sigma_m \cdot A_m \quad (1.37)$$

Toplam yük ( $P$ ), matris ve fibere gelen yüklerin toplamıyla bulunur.

$$P = P_f + P_m \quad (1.38)$$

1.36 ve 1.37 eşitlikleri, 1.38 eşitliğinde yerine konulduğunda, toplam yük, 1.39 eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$P = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (1.39)$$

Eşit gerinim koşulu olduğu için, elastiklik modülü de, 40 eşitliğine göre hesaplanır. Eşitlikteki  $A$ , toplam alanı simgelemektedir.

$$E_{II} = \varepsilon_f \cdot \frac{A_f}{A} + \varepsilon_m \cdot \frac{A_m}{A} \quad (1.40)$$

Matris ve fiber alanlarının, toplam alana bölünmesiyle, bileşenlerin hacimce oranları bulunur ve 1.40 eşitliği, 1.41 eşitliğiyle de ifade edilir. (Ünal, 2006)

$$V_f = A_f / A \text{ ve } V_m = A_m / A \quad (1.41)$$

$$E_{II} = \varepsilon_f \cdot V_f + \varepsilon_m \cdot V_m + \dots \quad (1.42)$$

1.42 eşitliği aynı zamanda karışımlar kuralı olarak da bilinir. Bu eşitliğe bakıldığında matris içindeki fiber oranının artmasıyla kompozitin elastiklik modülünün de lineer olarak artacağı görülmektedir. Ancak plastik matrisli kompozitlerde de aynı özellik görülmesine rağmen, zamanla matriste oluşan çökelmeler (gerilme altında gevşeme gibi.) ile dayanım düşse bile, orjinal eğriye paralel bir eğri elde edilir. (Ünal, 2006)

1.42 eşitliği,  $A$ 'ya bölünerek, gerilme eşitliği (1.43) elde edilir.

$$\sigma_{II} = \sigma_f \cdot \frac{V_f}{A} + \sigma_m \cdot \frac{V_m}{A} \quad (1.43)$$

$V_f + V_m = 1$  olduğu için,

$$\sigma_{II} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m \quad (1.44)$$

Üzerine, fiberlere paralel yönde zorlama gelen bir kompozit, yükün artmasıyla birlikte; önce matriste kopma gösterir. Kopan matristeki yükün tamamı fiberlere transfer olur ve daha sonra fiberler kopar. (Ünal, 2006)

$$\frac{P_f}{P_u} = \frac{E_f}{E_m} \cdot V_f \quad (1.45)$$

Fiberlere dik yönde bir zorlama olması durumunda, zorlamanın yönündeki gerilmeler, dik yöndeki gerilmenin, elastiklik modülüne bölünmesiyle hesaplanıp, 1.46 ve 1.47 eşitlikleriyle ifade edilirler. (Ünal, 2006)

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_{\perp}}{E_f} \quad (1.46)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_{\perp}}{E_m} \quad (1.47)$$

zorlama yönündeki toplam gerinim,

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_f + \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_f \cdot V_f + \varepsilon_m \cdot V_m \quad (1.48)$$

1.46 ve 1.47 eşitlikleri, 1.48 eşitliğinde yerine konulduğunda,

$$\varepsilon_{\perp} = V_f \cdot \frac{\sigma_{\perp}}{E_f} + V_m \cdot \frac{\sigma_{\perp}}{E_m} \quad (1.49)$$

$\sigma_{\perp} = \varepsilon_{\perp} \cdot E_{\perp}$  gösteriminden yararlanılarak, 1.50 eşitliği elde edilir.

$$E_{\perp} = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_f} \quad (1.50)$$

Bu tür zorlamalarda matrisine gelen gerilme büyük olduğundan uygulamaya yönelik çalışmalarda matrisin poisson oranı ( $\gamma_m$ ) da dikkate alınmalıdır.

$$E_{\perp} = \frac{E_f \cdot E'_m}{E_f \cdot V_f + E'_m \cdot V_f} \quad (1.51)$$

$$E'_m = E_m / (1 - \gamma_m^2) \quad (1.52)$$

Sonuç olarak, bu tür kompozitlerin elastiklik modülü,

$$E_C = E_f \cdot V_f + E_p \cdot V_p + E_m \cdot V_m + \dots \quad (1.53)$$

Çekme dayanımı ( $\sigma_C$ ),

$$\sigma_C = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_p \cdot V_p + \sigma_m \cdot V_m + \dots \quad (1.54)$$

Kayma modülü ( $G_C$ ),

$$G_C = G_f \cdot V_f + G_p \cdot V_p + G_m \cdot V_m + \dots \quad (1.55)$$

Kayma modülü, parçacık hacim oranının artmasıyla artar. Bu tür kompozitin şekillendirilebilme kabiliyeti ( $\eta$ , viskozite), kayma modülü ile orantılıdır.

$$\frac{\eta_c}{\eta_m} = \frac{G_c}{G_m} \quad (1.56)$$

Kompozitin şekil değiştirme kabiliyeti

$$\eta_c = \eta_m (1 + 2,5.V_p + 14,1.V_p^2) \quad (1.57)$$

eşitlikleriyle hesaplanır. (Ünal, 2006)

## 2. PLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİTLER

### 2.1 Plastik Matris Malzemeleri

Polimer zincirlerinden oluşan bir kütle (polimer madde) ısı şeklinde enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde artışlar meydana gelir. Başlangıçta polimer zincirinin küçük parçalarında oluşan bu hareketlilik, ısı arttıkça giderek büyük parçaları kapsar ve tümüne yayılır. Bu konumda polimer zincirleri birbiri üzerinden kaymaya başlayacak ve katı polimer, ergiyerek akacaktır.

Polimerleri şekillendirirken; polimer malzemenin belli sıcaklık değerlerinde sıvı hale geçmesi olayından yararlanır. Böylece karışım, daha sonra ters işlemle (sıcaklığın azaltılması ile) soğutulup katılaştırılmakta ve plastik parça kalıptan çıkartılarak kullanıma sokulabilmektedir. Bazı plastiklerde istenildiğinde bu katı plastik, tekrar ısıtılıp ergitilebilir-soğutulup katılaştırılabilir ve tamamen fiziksel ve tersinir olan bu dönüşüm tekrarlanabilir. Bu tür plastiklere; (Latince ısı ile şekillendirilebilen anlamına gelmek üzere) "*termoplastik*" adı verilmektedir. Çok yaygın kullanılan polimerlerin hemen hepsi (PE, PVC, PS gibi) termoplastiktir. (Ekrem, 2006)

Bunun yanı sıra, ısı ile farklı bir davranış gösteren ikinci grup polimer ailesi de bulunmaktadır. Isı ile bir kez şekil verildikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozunan bu grup "*termoset*" polimerlerdir ve bunlar ısıtıldıklarında yumuşamaz ve ergimezler. Isının yükselmesine karşın ilk katı konumlarını korurlar. Ancak polimer sistemini oluşturan polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtılmaya karşı bir sınır değere kadar direnebilir. Belli yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığında bağlar kopabilir ve termoset malzeme bozularak tersinmez şekilde tepkime verir. Yani termoset plastikler, klasik yöntemle (ısıtılıp soğutulularak) şekillendirilemezler. Bunlar, özel olarak şekillendirilecekleri kalıpta tepkimeye sokulup termoset malzeme üretimi sağlanabilir. (Ekrem, 2006)

Polimerlerin ticari ve teknik bakımından önemli olmasının sebepleri şöyle sıralanır. (Ekrem, 2006)

- a) Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa sahip olması ve dayanım/yoğunluk oranının iyi olması,
- b) Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
- c) Polimerleri üretmek için daha az enerjiye gerek duyulması,
- d) Polimerlerin yaygın şekilde kompozit malzemelerde kullanılması.

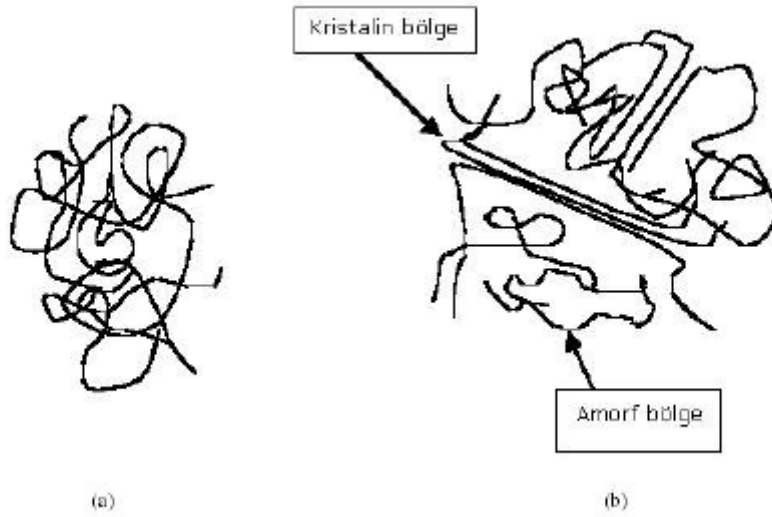


Polimerlerin bu avantajlarına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. Bunları da şöyle özetleyebiliriz.

- a) Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- b) Düşük elastik modüle sahip olmaları,
- c) Sınırlı yükleme şartlarına sahip olmalarıdır. (Ekrem, 2006)

### 2.1.1 Termoplastikler

Termoplastik malzemeler, genellikle sünek ve termoset malzemelerden daha sert malzemelerdir. Yapısal olmayan uygulamalarda dolgu ve takviye kullanmaksızın yaygın şekilde kullanılırlar. Termoplastikler ısı ile eritilebilir ve soğutma ile katılaştırılırlar. Bu da onlara tekrar şekil verdirilebilme kabiliyeti sağlar. Termoplastik moleküller çapraz bağlanma yapmadıklarından esnektirler ve yeniden şekillendirilebilirler. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi termoplastikler amorf veya yarı kristalin yapıda olabilirler. Amorf termoplastiklerde moleküller gelişigüzel düzenlenmiş bir yapıdadır. Kristalin bölgede ise moleküller sıkı paketlenmiş düzenli bir yapıdadır. (Dave vd., 2000)



Şekil 2.1 Amorf (a) ve yarı kristalin (b) polimerlerde moleküler düzenlemeler (Mazumdar, 2002)

Moleküllerin karmaşık yapısı nedeniyle plastiklerin % 100 kristalizeye ulaşmaları mümkün değildir. Bazı termoplastiklerin özellikleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Düşük katılık ve dayanım değerleri sebebiyle; yapısal uygulamalarda dolgu ve takviye elemanlarına gereksinim duyarlar. Termoplastikler, genellikle termosetlere göre özellikle yüksek

sıcaklıklarda, düşük dayanım gösterirler. Termosetlere göre çözeltilere karşı daha kolay etkilenebilir yapıdadırlar.

Çizelge 2.1 Tipik katkısız termoplastik reçinelerin özellikleri (Ersoy, 2005)

Reçine Malzemesi	Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Çekme Modülü GPa (10 <sup>6</sup> psi)	Çekme Dayanımı GPa (10 <sup>6</sup> psi)
Naylon	1,1	1,3 - 1,35 ( 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 )
Polikarbonat	1,2	2,1 - 2,8 ( 0,3 - 0,4 )	55 - 70 ( 8 - 10 )
Asetal	1,4	3,5 ( 0,5 )	70 ( 10 )
Polietilen	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 )

Termoplastik reçineler, oda sıcaklığında katı haldedirler. Bunlarda çizgisel molekül zincirleri birbirine zayıf metaller arasında Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Rijit bir yapıya sahip değildirler. Isıtılırsa yumuşar ve erirler. (Çizelge 2.2) Soğutulunca yeniden sertleşirler. Sıcaklık arttıkça viskoziteleri düşer. Sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda viskozite hali yüksektir. Bu nedenle ara yüzey bağı termoset'e göre daha zordur. Birçok cinsleri olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılanları şunlardır. (Ekrem, 2006)

- 1) Polietilen (PE)
- 2) Polipropilen
- 3) Naylonlar (Poliamitler) (PA)
- 4) Polikarbonatlar
- 5) Polivinilklorürler (PVC)
- 6) Akrolinitrin-butadin-strin (ABS)
- 7) Politetra Fluorethylene (PTFE)
- 8) Termoplastik Polyesterler

Çizelge 2.2 Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri

Malzeme Özellikleri	Akrilik	ABS	PTFE	PA
Elastiklik Modülü (MPa)	2800	2100	425	700
Çekme Dayanımı (MPa)	55	50	20	70
Kopma Uzaması (%)	5	10-30	100-300	300
Özgül Ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	1,2	1,6	2,2	1,14
Ergime Derecesi ( °C)	200		327	260

### **2.1.1.1 Polietilen**

1990'lı yılların verilerine göre Polietilen, ambalaj sanayinde kullanılan plastiklerin yaklaşık üçte ikisini oluşturmaktadır. Polietilenin yoğunluğuna bağlı olarak değişik türleri mevcuttur. Alternatif olarak etilen polar komonomerlerle de kopolimerize edilebilir. Bu kopolimerler, başlıca EVA (etilen vinil asetat), EAA (etilen akrilik asit), EMA (etilen metakrilik asit)'dır. Büten, hekzen, okten ve metilpenten ise lineer alçak yoğunluklu polietilen için çok düşük derişimlerde bulunabilen (apolar) komonomerlerdir. Özellikle PE homopolimerlerin karıştırılmaları ile çok sayıda ürün çeşidi elde edilebilmesi mümkündür. Polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nispeten kolay, gerilmeye karşı dayançlı ve dayanıklı olup düşük sıcaklıklara hassas değildir. Geniş bir sıcaklık aralığında kullanılmasının yanı sıra su buharına karşı mükemmel bir bariyerdir. Buna karşılık, gaz, aroma ve yağ geçirgenliği açısından vasat özelliktedir. (Ekrem, 2006)

### **2.1.1.2 Polipropilen**

Polipropilen filmler 1960'lı yıllardan beri var olup, polietilen gibi fiyatı düşük olan polimerlerdir. Polipropilenin su buharı bariyer özelliği iyi (AYPE ve YYPE arasında) ancak gaz ve aromayı geçirmeme özelliği vasattır. Polipropilen hayvansal yağlara karşı polietilenden daha iyi bir bariyerdir. Ayrıca 165° C gibi polietilene oranla çok daha yüksek olan ergime sıcaklığı nedeni ile yaklaşık 140°C'a kadar kullanılabilir. Kristalleşmenin ani soğutma ile engellenebilmesi durumunda, ısı geçirgenliği de polietileninkinden oldukça büyüktür. (Ekrem, 2006)

Çizelge 2.3 Ticari Termoplastik Polimerlerin Tipik Özellikleri

Özellikler	Yüksek Yoğunluklu Polietilen	Alçak Yoğunluklu Polietilen	Polipropilen
Özgül Ağırlık ( g/cm <sup>3</sup> )	0,94-0,96	0,91-0,92	0,90-0,91
Kırılma İndisi	1,54	1,51	1,49
Kopma Dayanımı (MPa)	22-39	Tem.16	30-40
Uzama (%)	15-100	90-650	250-700
Elastiklik Modülü (MPa)	560-1050	120-245	900-1400
Çentikli Darbe Dayanımı (Nm/cm)	0,80-6,4	>8,6	0,32-3,2
Yanma Hızı	Çok Yavaş	Çok Yavaş	Yavaş
Güneş Işığının Etkisi	Etkilenir	Yüzeyde Çatlama	Etklenir
Kuvvetli Asit-Baz Etkisi	Dayanımlı	Dayanımlı	Dayanımlı
Saydamlık	Opak	Opak	Opak

### 2.1.2 Termosetler

Termosetler, küçük monomer moleküllerin kimyasal reaksiyonlarla birbirine bağlı uzun polimer moleküller haline gelmesi ile ortaya çıkarlar. Bu reaksiyonların gerçekleşebilmesi için katalizörlere, iyileştirme malzemelerine, ısıya ve mikrodalga gibi dış etkenlere ihtiyaç vardır. Kovalent bağların üç boyutlu olarak örgü şeklinde ortaya çıkması ile termoset malzemeler oldukça katıdır. Verilen şekil kalıcıdır. Bu nedenle kimyasal reaksiyon işlemi geri dönüşüzdür. Bundan dolayı yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaları bile yumuşamayı sağlayamaz. Termoset reçineler kırılğandır. Takviye malzemesi olarak nadiren kullanılırlar. İyi sünme direncine sahiptirler. Sıcaklık arttıkça dayanç ve modülü azalır. Kimyasal dirençleri oldukça iyi malzemelerdir. Kompozit malzemelerde en çok kullanılan reçineler; epoksiler, polyesterler ve fenoliklerdir. Epoksi-matris kompozitler en iyi mekanik özelliklere sahiptirler. (Ekrem, 2006)



Şekil 2.2 Termoset moleküllerin kür işlemi sırasında çapraz bağlanması (Ersoy, 2005)

Çizelge 2.4'te bu reçinelerin özellikleri gösterilmektedir. (Ekrem, 2006)

Çizelge 2.4 Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri(Ekrem, 2006)

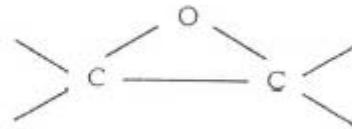
Malzeme Özellikleri	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastiklik Modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme Dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma Uzaması (%)	3-6	42	1,5-2
Isıl İletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl Genleşme (1/ °C)	45-65	55-100	68

Bu reçineler uzun ömürlüdürler ve oldukça pahalıdırlar. Polyester kompozitler, epoksilere yakın elastik özellikler gösterirler. Buna karşılık dayançları daha düşüktür. (Ekrem, 2006)

### 2.1.3 Epoksi Reçine

Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksi grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. (Kelly, 2004) Epoksi reçinenin genel başlangıç malzemesi Bis-fenol A Diglisidil Eter'dir. Diğer malzemeler başlangıç çözeltisine karıştırılabilir. Mesela sulandırıcı maddeler viskoziteyi düşürmek, plastikliği artırmak ve epoksi reçinenin darbe dayanımını artırmak için kullanılabilirler. (Strong, 2008)

Reaktif katılaştırma maddesi (mesela dietilentriamin) takviye lifleri ile reçine karışmadan önce, reçine sıvı haldeyken ilave edilir. Katılaştırıcı maddenin amine grupları ile reçinenin epoksizde grupları reaksiyona girer (Harris, 2000)



Şekil 2.3. Epoksi Grubu (Piskin, 1999).

Epoksi reçineler, reçine türüne ve son kullanım yerine göre sıvı veya katı olarak temin edilebilir. Bu reçineler çeşitli ajanlar varlığında, oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta kür edilerek termoset son ürün haline dönüştürülür. Epoksi reçineler termoset formunda mükemmel mekanik dayanıklılığa, yüksek dielektrik direncine, iyi boyutsal kararlılığa, kimyasal ve ısıl dirence sahiptirler. (Pişkin, 1999) Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Birçok elyaf ile iyi bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir. (Harris,

2000) Bu özelliklerin yanı sıra sahip olabilecekleri formülasyonların çeşitliliği ve çok yönlü işlenebilirlik özellikleri nedeniyle epoksi termosetler, birçok uygulama alanı bulmuştur.

Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir. Uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan kompozit malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sertleşme süresi 1 saat dolayında olup, 127°C ve 177°C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250°C' ye kadar ısı kararlı türleri de geliştirilmiştir (Vinson vd., 2002)

#### 2.1.4 Polyester Reçine

Polyester reçineler iki ana grupta toplanırlar.

- Doymuş Polyesterler
- Doymamış Polyesterler

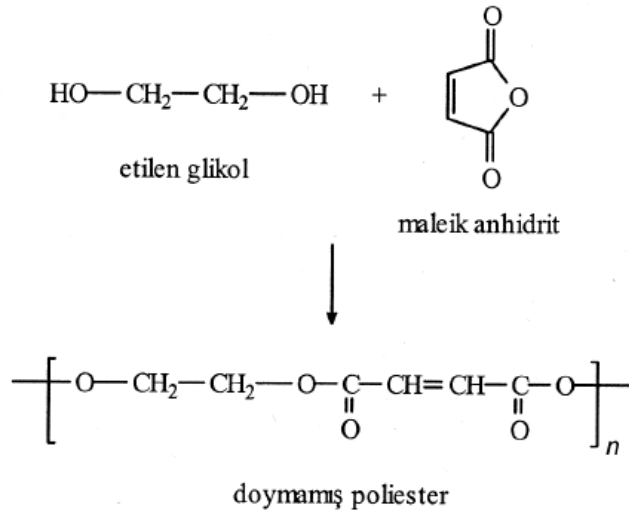
Doymuş polyester reçineler polietilen teraftalat veya etilen gibi termoplastik özellik gösteren ve enjeksiyon kalıplamada ve elyaf üretiminde kullanılan reçinelerdir.

Doymamış polyester reçineler ise, uygun bir katalizör ile “cross-link” oluşturan termoset özellikli reçinelerdir. Cam Takviyeli Plastik üretiminde genellikle doymamış polyester reçineler kullanılır ve değişik amaçlar için, değişik özellikte doymamış polyester reçine türleri geliştirilmiştir. (Sakin, 1994)

Polyesterler, dikarboksilik asitler ve polihidrik alkollerin kondensasyon polimerizasyonu sonucu oluşurlar. Buna ek olarak doymamış polyesterler dikarboksilik asit bileşeni olarak maleik anhidrit veya fumarik asit gibi doymamış bir madde içerirler. Ürün olarak alınan polimer, ağ yapısı oluşturabilmek ve düşük viskozitede bir sıvı elde edebilmek amacıyla stiren gibi reaktif bir monomer içinde çözülür. Bu matris sertleştiğinde, monomer polimer üzerindeki doymamış uçlar ile reaksiyona girer ve onu bir katı termoset yapıya çevirir. (Şamiloğlu, 2007)

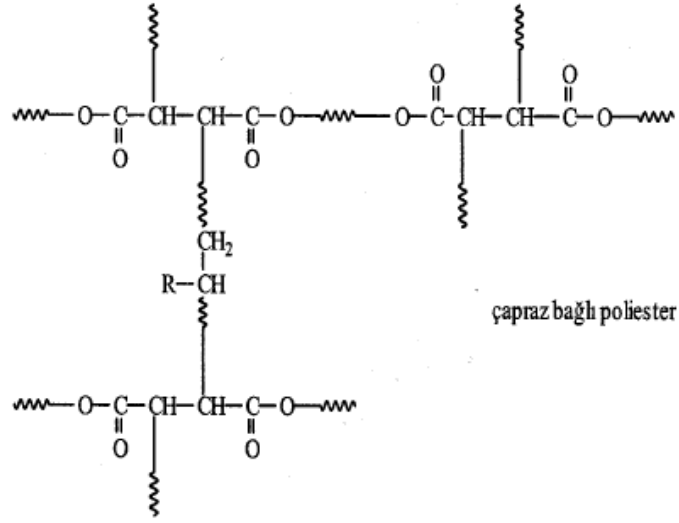
### 2.1.4.1 Doymamış polyester

Doymamış polyester matrisler, kompozit endüstrisinin lokomotif konumunda olup kullanılan matrislerin yaklaşık %75'ni temsil ederler. (Gibson, 1994) Doymamış polyester tanımı, polimer zincirlerinde çift bağların bulunduğu polyester polimerleri için kullanılır. Bu tip polyester, glikoller ve anhidritler (veya asitler) arasındaki tepkime ile sentezlenebilir. Örneğin etilen glikol ve maleik anhidritin kondensasyonu ile doymamış grupların polimer ana zincirleri üzerinde bulunduğu Şekil 2.4'te yapısı verilen doymamış polyester önpolimeri elde edilir. Sentezde; propilen glikol, dietilen glikol, dipropilen glikol vb. glikoller, ftalik anhidrit vb. anhidritler kullanılabilir. (Dave vd., 2000)



Şekil 2.4 Doymamış polyester sentezi (Şamiloğlu,2007)

İkinci aşamada doymamış polyester; stiren veya metil metakrilat gibi vinil monomeri ( $\text{CH}_2=\text{CHR}$ ) varlığında başlatıcının bozunma sıcaklığına kadar ısıtılır ve radikalik mekanizma üzerinden çapraz bağlanma gerçekleştirilir. Şekil 2.5'de çapraz bağlı polyester yapısı gösterilmiştir. (Şamiloğlu, 2007)



Şekil 2.5 Çapraz bağlı polyesterin kimyasal yapısı.

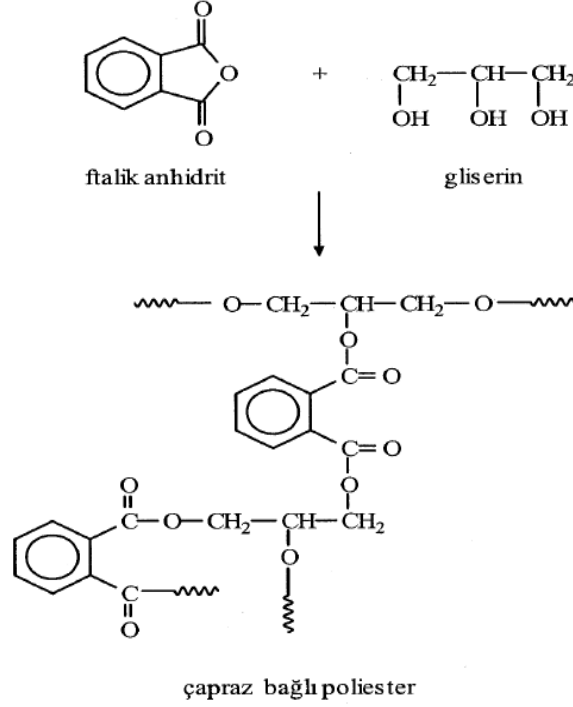
Ticari uygulamalarda vinil monomerinin miktarı %30-50 arasında değişir. Vinil monomeri, doymamış polyester zincirlerini birbirine bağlamanın yanında önpolimeri çözme görevi de yapar. Ayrıca elde edilecek polyesterin özelliklerini de etkiler. Stiren; düşük viskozitesi, doymamış polyesteri iyi çözmesi ve düşük fiyatı nedeniyle en yaygın kullanılan monomerdır. Buna karsın yanıcıdır ve sağlık açısından zararlıdır. Fazla stiren alındığında, doymamış polyester zincirleri arasındaki hacim artar ve termoset polimerin sertliği azalır. Daha da fazla stiren kullanımında ise, polistiren özelliklerinin baskın olduğu çapraz bağlı polyester elde edilir. (Şamiloğlu, 2007)

Doymamış polyesterlerin kalitesi, çapraz bağ yoğunluğuna bağlıdır. Çapraz bağ yoğunluğu arttıkça polimerin modülü ve ısıl kararlılığı yükselir, buna karsın vurma dayanımı düşer. Çapraz bağ yoğunluğu, doymamış polyester üzerinde bulunan doymamışlık noktalarının sayısı, dolayısıyla polyesterin yapımında kullanılan girdilerin oranları ayarlanarak kontrol edilir. Örneğin etilen glikol ile maleik anhidrit az alınarak doymamış bağ yoğunluğu azaltılır. (Şamiloğlu, 2007)

Polimerin sertleşme zamanı kullanılan başlatıcının bozunma sıcaklığıyla ilgilidir. Başlatıcının bozunma sıcaklığı üzerinde yapılan kalıplamalarda, aşırı radikal üretileceğinden istenmeyen yan tepkimeler gerçekleşir ve ürün kalitesi düşer. Doymamış polyesterlerin çapraz bağlanmaları oda sıcaklığında hızlandırıcı adı verilen maddeler kullanılarak da yapılabilir. Bu tür uygulamada hızlandırıcı ve başlatıcı kalıplamadan önce polyesterle karıştırılır. (ASM Handbook, 2001)



Termoset polyester sentezlemenin bir başka yöntemi, üç ya da daha fazla sayıda fonksiyonel grup taşıyan girdiler kullanmaktır. Bu yaklaşımla hazırlanan ilk çapraz bağlı polyesterde girdi olarak gliserin ve ftalik anhidrit kullanılmıştır. Gliserinin sekonder hidroksil grubununun aktivitesi diğer hidroksil gruplarından daha zayıftır ve ilk aşamada tepkimeye girmez. Bu aşamadaki ürün doğrusal bir polimerdir. İleri ısıtma ile Şekil 2.6'da gösterildiği gibi çapraz bağlı yapıya geçilir. (Şamiloğlu, 2007)



Şekil 2.6 Çapraz bağlı polyester sentezi(Şamiloğlu, 2007)

Doymamış polyesterlerin; kolay işleme, uçucu yan ürün oluşturmama, hızlı çapraz bağlanma, açık renk, boyutsal kararlılık gibi avantajları vardır. Ayrıca fiziksel ve elektriksel özellikleri de iyidir. Kimyasal maddelerden çok etkilenmezler. Matris karışımının bileşimi ayarlanarak; alevlenmeye, kimyasallara ve yaşlanmaya karşı dirençleri artırılabilir (Gibson, 1994)

Doymamış polyesterler; iyi elektriksel yalıtkan oldukları için kompozitlerde matris malzemesi, elektrik ve elektronik aletlerin yanı sıra sandalye, valiz, olta çubuğu, servis tepsi gibi eşyaların yapımında kullanılırlar. (Şamiloğlu, 2007)

#### 2.1.4.1.a Doymamış Polyester Reçine Üretimi:

Doymamış polyester reçineler, takviyeli plastikler içinde en yaygın olarak kullanılan termoset reçinedir.

El yatırması gibi basit kalıplama tekniklerinden en karmaşık makineleşmiş kalıplama tekniklerine kadar her tür kalıplama tekniğine hitap eder.

Polyester reçineler, çok geniş bir kimyasal aileyi kapsar ve genel olarak dibazik asitlerle polihidrik alkollerin kondensasyon reaksiyonu sonucunda elde edilirler.(69)

Dibazik Asit + Polihidrik Alkol  $\rightleftharpoons$  Polyester Reçine + H<sub>2</sub>O

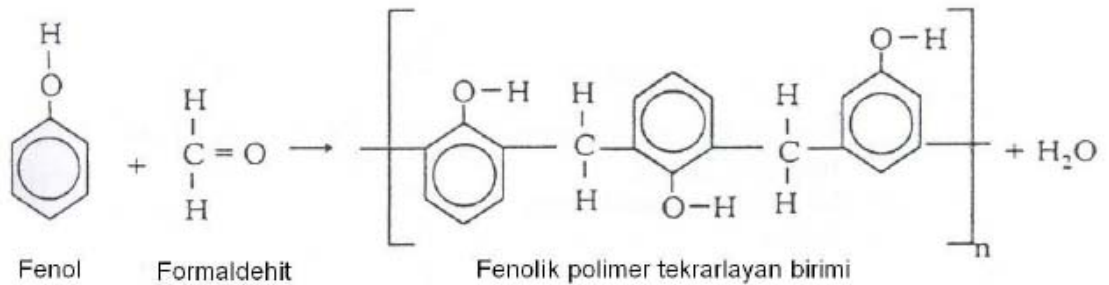
Doymamış Polyester Reçine' nin başlıca üretim aşamaları şunlardır :

- Hammadde hazırlama
- Reaksiyon
- Dilüsyon
- Modifikasyon



### 2.1.5 Fenolik Reçine

Bakalit olarak da bilinen fenolik reçineler, Şekil 2.7' de de görüldüğü gibi esas olarak fenol ile formaldehit kondenzasyon polimerizasyonu ile sentezlenen polimerlerdir.



Şekil 2.7 Fenol – Formaldehit polimer sentezi

1909' da Baekeland çapraz bağlı termoset fenolik reçinenin üretimini gerçekleştirmiştir (Pişkin, 1999). Fenolik reçineler eriyebilir, laminat ve kalıplama kompozisyonlarında

kullanılabilir. Bunun için basınca ihtiyaç duyulur. 300 °C' ye kadar asbest lif ile takviye edilebilir. Alkalilere karşı duyarlı olup, su ve birçok asitlere karşı dayanıklıdır. (Hull, 1992)

## 2.2 Fiber Malzemeler

### 2.2.1 Karbon

Karbon elementi 2,268 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğu ile oldukça hafif bir elementtir. Bunun yanında karbon, çok değişik kristal yapılarında bulunabilmektedir. Fiber üretiminde, daha doğrusu takviye amaçlı kullanılan C fiberler hegzagonal yapıda olan grafit kristalleri halindedir. C element olarak kovalent elmas yapıda iken grafit kristalleri, karbon atomlarının üç boyutta dizilmeleri sonucu oluşan ve oldukça yüksek elastik modül değerleri veren sıkı hegzagonal kristal yapısındadır. Karbon fiberlerde fiber çapları 7-8 µm, sürekli veya kısa olabilir. Bu fiberler petrol veya kömürden üretilirler. En önemi karbon fiberleri, PAN fiberlerdir. (Sabancı, 2005)

Bugün iki tip karbon lifi üretilir: yüksek dayançlı karbon lifleri ve yüksek modüllü karbon lifleri. (Ersoy,2005) Karbon liflerinde dayanç/ağırlık ve modül/ağırlık oranları çok yüksektir. Isıya karşı boyutsal stabilite, yüksek yorulma dayanıcı, yüksek erime noktası ve yüksek katılıkları onların avantajlarıdır. Düşük ani darbe direnci, yüksek elektrik iletkenliği karbon liflerinin dezavantajlarıdır. Karbon lifi takviyeli kompozit malzemeler uçak sanayisinde, roket ve uydu yapımında, otomotiv sanayisinde ve birçok spor malzemelerinin yapımında kullanılır.

### 2.2.2 Aramid

Kevlar (Aramid, p-fenoleneterfalamid), karbon, hidrojen, oksijen ve azotun aromatik organik bileşimidir. Kevlar fiberler uzun zincir yapılı organik bir bileşimidir. Kevlar fiberler uzun zincir yapılı poliamid polimerlerin standart tekstil tekniğine benzer şekil döndürme ( spinning) yöntemi ile üretilmesi sonucu elde edilir. Bu fiberler Kevlar 29 (yüksek dayanç, düşük, yoğunluk) ve Kevlar 49 (yüksek dayanç, düşük, yoğunluk ve yüksek modül) ismi altında üretilip kullanılmaktadırlar. (Sabancı, 2005)

### 2.2.3 Kalsiyum Karbonat

Polyester reçine sistemleriyle birlikte en çok kullanılan dolgu maddesi kalsiyum karbonattır. Doğada tebeşir, kireç taşı ve mermer şeklinde bulunur ve az miktarda olmak kaydıyla başka mineralleri içerebilir. Yüksek saflıkta kalsiyum karbonat eriyikten çöktürme yoluyla hazırlanır. partikül çapları üretim metoduna bağlıdır. SMC ve BMC işlemlerinde genellikle

dolgu maddesi olarak kalsiyum karbonat kullanılır. aşındırıcı dolgu maddeleri olmaması sayesinde kalsiyum karbonat dolgu maddesi kullanılan sertleşmiş reçine sistemleri kolayca işlenebilmektedir.(Demircioğlu, 2006)

#### 2.2.4 Cam



Şekil 2.8 Cam elyafın kompozit içindeki SEM görüntüsü

Sertlik, şeffaflık, kimyasal direnç, dengeli yapı gibi ham cam özelliklerinin yanında, elyafa ait dayanıklılık, esneklik, hafiflik ve işlenebilirlik özelliklerini bir arada bulunduran tek malzeme cam elyafıdır. (Karadeniz, 1989)

Tarihte cam elyafının ilk kez Fenikeli ve Mısırlı sanatçılar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. O zamanlarda, lifler, cam çubukların ısıtılması sonucunda, yumuşatılarak akıtılması şeklinde elde ediliyordu. Kullanım yeri ise yine takviye amacına yönelikti ve çanak, çömlek, gibi ürünlerin sağlamlaştırılmasını sağlıyordu. Bugün bildiğimiz devamlı cam elyafının geliştirilmesi 1930'lu yılların sonlarına doğru yapılabildi. (Demircioğlu, 2006)

Cam; soda veya potaş silikatleri, kireç veya değişik metalik oksitlerin kaynatılması ile elde edilir. Dökülmüş kütle, kristalleşmeyi engellemek için hızla soğutulur. (Karadeniz, 1989)

Sürekli cam elyafların üretiminde iki temel işlem kullanılmaktadır: (Karadeniz, 1989)

- Bilyalı eritme
- Doğrudan eritme

Bilyalı eritme işlemi; genellikle 2-3 cm çapında bilya şeklinde hammaddelerin uygun karıştırılmasıyla eritilmesi ilk işlemidir. Bu yöntem çok eskidir. (Karadeniz, 1989)

Ham malzemelerden doğrudan eritme işlemi; çok sayıda hassas boyutlu delikleri olan platin alaşımdan yapılmış, ısıtılmış kovanlardan dökülür. Sabit ısıda ve yüksek hızda bir bobine sarılan cam elyafı belirli toleranslarla istenilen çapta çekilir. Tipik cam elyaf çapları 3-20  $\mu$

arasındadır. Elyafların çekim hızı 61m/sn'den fazladır. (Karadeniz, 1989)

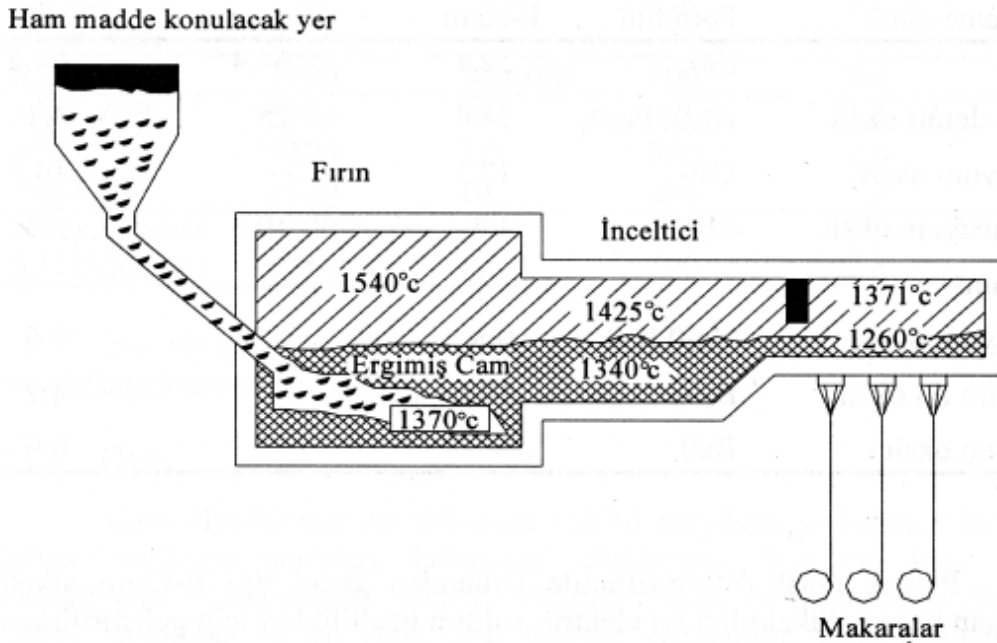
Tüm cam elyafı üretim sırasında bağlayıcı ile kaplanır. Bu bağlayıcı hem cam elyafının kullanım özelliğini belirler, hem de lifler arasında aşınmayı engeller. (Karadeniz, 1989)

#### 2.2.4.1 Camlar ve Bileşimi

Cam amorf bir yapıya sahiptir. Bu yapının oluşumu, eriyiğin soğuması sırasında kristaller düzenli bir sıraya girmeden şekillenmesinden oluşur. Kimyasal olarak cam, kompozit bir silis ( silisyum ) ağıdır. Bununla beraber soy silis veya kuartz eritilmeden ve şekillendirilmeden önce yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyar. Bu yönden camın viskozitesini ergime için uygun bir değere indirme, homojenleştirme, yapıdaki gazların dışarı alınmasını ve fiberleşmenin kolayca yapılabilmesi için ilave kimyasal bileşikler eklenir. Oluşacak camın fiziksel özellikleri ilave katkı maddelerine ve miktarlarına göre farklılık gösterecektir. Çok değişik türlerde cam bileşimleri geliştirildiği halde yalnızca birkaç tür yaygın olarak cam fiber yapımında kullanılmaktadır. (Karadeniz, 1989)

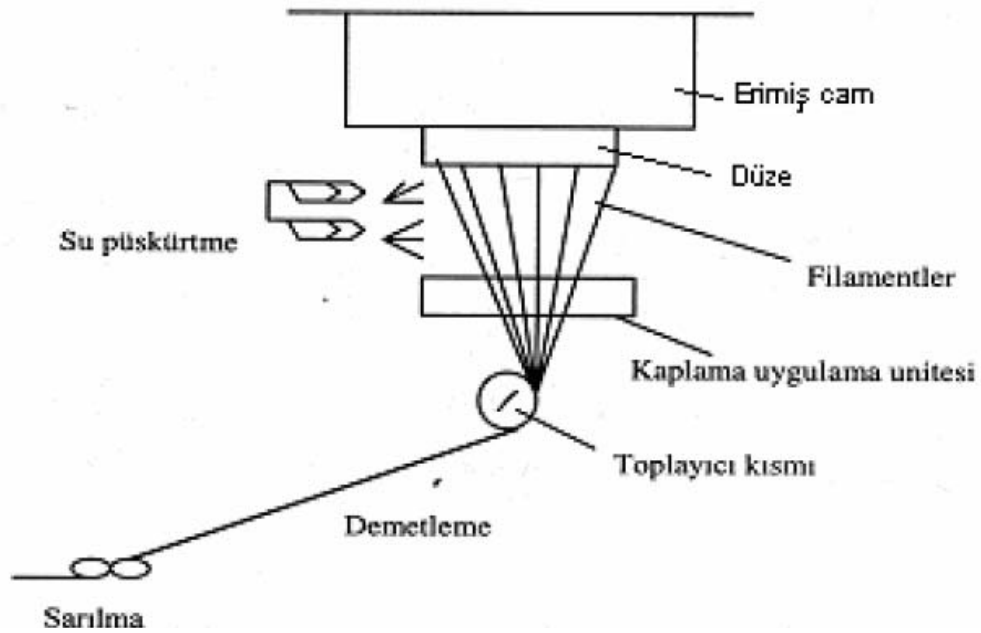
#### 2.2.4.2 Cam Elyaf Oluşumu

Cam eritme prosesi hammaddelerin tartılıp karıştırılmasıyla başlar. Bileşenler tartılıp fırına beslenmeden önce karıştırma istasyonunda karıştırılır. Cam elyaf fırınlar 3 ayrı bölümden oluşur. (Şekil 2.9) (Şamiloğlu,2007)



Şekil 2.9 Cam eritme (Şamiloğlu,2007)

Besleme; erime, gaz bileşenlerin ayrılması ve homojenizasyonu için ilk olarak fırına gönderilir. Daha sonraki bölümde cam eriyiğın sıcaklığı 1370°C'den 1260°C'ye düşürülür. Cam eriyik bu bölümden sonra elyaf oluşumunun gerçekleştiği son bölüme ilerler. Camın belirli viskozite özellikleriyle proses sıcaklıkları belirlenir. Cam eriyiğının bu son bölümde sürekli cam elyaflara dönüşmesi temel olarak bir inceltme prosesidir (Şekil 2.9). Cam eriyik çok sayıda delik içeren platin-rodyum alaşımli düzeden akar. Düzede bölümü sabit cam viskozitesini elde etmek amacıyla ısıtılmaktadır. Elyaf lar aşağı doğru çekilir ve düzeden çıkar çıkmaz hızlıca soğutulurlar. Daha sonra elyaflar, kaplama çözeltisinde sürekli dönen ve geçen elyafların üzerine ince bir film atacak şekilde ayarlı bir banyodan geçirilir. Bir cam elyafı diğ erinden ayrılmasına neden olan özellikler bu basamakta gerçekleştirilir. Kapsama bileşenleri; tel bütünlüğü, yağlanması, matris uyumluluğu, yapışma özelliklerini son ürüne verir. Bu yüzden özel kullanımlar için gerekli elyaflar burada farklı kapsamaya tabi tutulurlar. Kapsama uygulandıktan sonra, sarma aletine yaklaşırken filamentler tel oluşacak şekilde birleştirilirler. (Şekil 2.10) Sonra her uzun tel kumaş, hasır, keçe, tül ve kırılmış cam elyaf haline getirilir. (Şamiloğlu, 2007)



Şekil 2.10 Cam elyaf oluşturma prosesi (Şamiloğlu,2007)

### 2.2.4.3 Cam Türleri

Çizelge 2.5 Kullanılan cam türleri (Demircioğlu, 2006)

A Camı	Yüksek alkali oranı-Düşük maliyet
C Camı	Kimyasal dayanım ( Yüzey tülleri)
E Camı	Elektriksel Özellikler
L Camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M Camı	Yüksek elastik modül
S-2 Camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 Camı	Paneller için yarı şeffaf
AR Camı	Alkali dayanım
R Camı	Yüksek çekme dayanımı

Plastik esaslı kompozitlerde kullanılan genel tipi E-Camı alkali olmayan boron silikat olup iyi elektrik yalıtım özellikleri için geliştirilirken S-camı daha pahalı fakat daha yüksek modüle sahip magnezyum ve alüminyum silikat ihtiva eder. C-camı ise oldukça iyi korozyon direncine sahip ancak mekanik özellikleri düşüktür. Camların dayanımı, özellikle, yüzey üzerinde kusurlar ve mikro-çatlaklarla birlikte kaçınılmaz dahili hatalara bağlıdır. Yüksek kaliteli elyafları üretmek için yüksek saflıktaki malzemelerin homojen şekilde ergimiş olması, yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve hemen koruyucu kaplama uygulanmış olması gerekmektedir. Cam elyaflar, camların elektrik fırınında yaklaşık 1200- 1500°C de ergitilmesi ve ergiyen camların bir platin alaşımli olan potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı şekilde aşağı doğru demetler halinde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilerek üretilir. Daha sonra kaplama uygulanması ve demetler halinde makaralara sarılarak yaklaşık 3 kg'lık halde depolara gönderilir. Kaplama formülasyonu karışıktır; fakat bu elyafları hasardan korur. Kaplama maddesi genellikle silan ihtiva eder. Bu molekülün bir kısmı Si-O bağları aracılığıyla cam ile reaksiyona girerken, silan üzerindeki organik guruplar reçine ile uyumluluk sağlarlar. Bu elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmamasına rağmen oldukça ucuzdur. Tipik bazı özellikleri Çizelge 2.6'de gösterilmiştir. (Güçlü, 2007)

Çizelge 2.6 Cam elyafı cinslerinin kompozisyonları (% olarak)

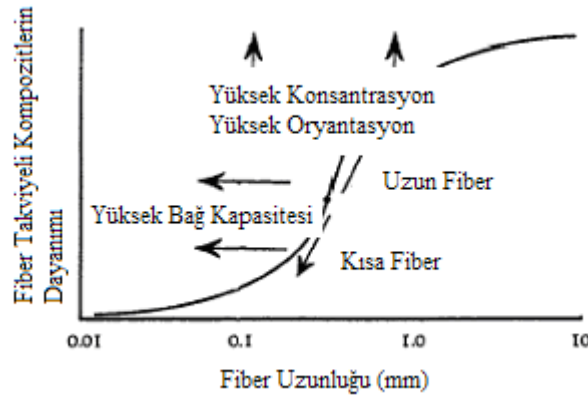
	A	C	E	R	S
SiO <sub>2</sub>	72	64,6	52,4	60	64,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	4,1	14,4	25	25
CaO	10	13,4	17,2	9	--
MgO	2,5	3,3	4,6	6	10,3
Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O	14,2	9,6	0,8	--	0,3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	4,7	10,6	--	--
BaO	--	0,9	--	--	--

*E-tipi cam elyaf* : E-camı elektriksel uygulamalar için geliştirilmiş bir cam elyaf türüdür. Plastik kompozitlerin takviyelendirilmesinde başlıca kullanılan malzemelerdendir. E-cam elyafının kompozisyonu Çizelge 2.6'de verildiği gibidir: E-cam elyafının çok tercih ediliyor olması yüksek çekme dayanımı, ısı, ateş, kimyasal ve nem direncinden kaynaklanmaktadır. İyi elektriksel özellikler gösterir ve düşük termal genleşme değerine sahiptir. Ayrıca, bugün E-cam elyafı endüstride ekonomik cam olarak bilinmektedir. (Şamiloğlu, 2007)

Kısa cam elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımı ve esneklik modülleri, fiber hacim oranına, oryantasyonuna ve uzunluk oranı (uzunluk/çap) oranına bağlıdır. (Erbil, 2005)

Oryantasyonu kontrol edebilmek zordur. Proses metotlarından ve lokal akış koşullarından büyük miktarda etkilenir. Sonuç olarak, hacim oranındaki ve uzunluk oranındaki değişimler oryantasyon derecesini değiştirecektir. (Erbil, 2005)

Cam elyaf takviyeli kompozitler; yük, fiber matris arafazında etkili olarak dağılabildiğinde çok iyi performans gösterirler. Elyaf ve matris ara yüzeyindeki ıslanabilirliği arttırmak için, elyaf yüzeyi kaplanarak modifiye edilebilir. Günümüzde en çok silan kaplaması kullanılmaktadır.(Demircioğlu, 2006)



Şekil 2.11 Fiber boyları değişiminin RP kompozitlerin özelliklerine etkisinin karşılaştırılması. (Rosato vd., 2000)

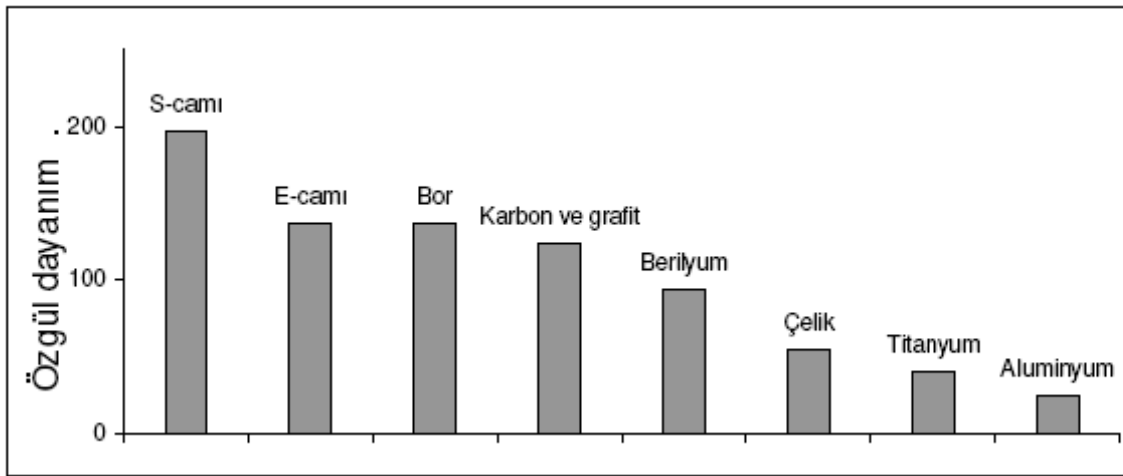
#### 2.2.4.4 Cam Elyafın Diğer Takviye Elemanlarıyla Karşılaştırılması

Çizelge 2.7'de ve Şekil 2.12'de bazı takviye türlerinin cam elyaf ile karşılaştırılması yer almaktadır. Gerilme dayanımı ve özgül dayanımının diğer elyaflara göre yüksek olmasının yanı sıra fiyatının düşük oluşu, kolay temin edilebilmesi, işleme kolaylığına sahip oluşu, esnek ve düşük kalıp maliyetine sahip olması cam elyafların en çok tercih edilen elyafların başında gelmesine neden olmaktadır. (Şamiloğlu, 2007)



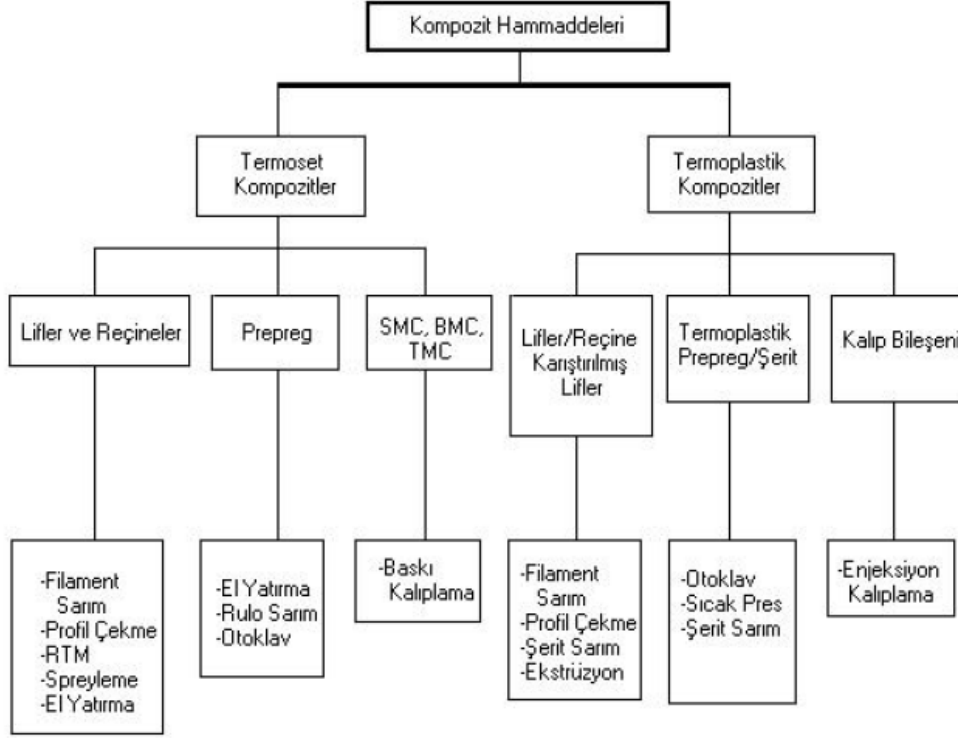
Çizelge 2.7 Bazı takviye türlerinin özellikleri (Şamiloğlu, 2007)

Takviye Türleri	Gerilme Dayanımı (MPa)	Gerilme Modülü (MPa)	Özgül Ağırlık	Özellikler
Cam	3000-5000	72-82	2,48-2,60	Yüksek dayanım, iyi kalıplama özellikleri, düşük maliyet
Karbon/Grafit	2500-3000	200-700	1,75-1,96	Yüksek modül, elektriksel iletkenlik, yüksek maliyet
Aramid	2750-3000	82-124	1,44	İyi spesifik özellikler, orta maliyet
Boron	3500	400	2,55	Yüksek Modül, yüksek maliyet



Şekil 2.12 Kompozitlerde kullanılan bazı malzemelerin özgül dayanımları (Jendli vd., 2004)

### 2.3 Plastik Matrisli Kompozit Üretim Prosesleri



Şekil 2.13 Kompozit üretiminde kullanılan hammaddelerin sınıflandırılması (Mazumdar, 2002)

Her kompozit malzeme üretim yöntemi, parça üretimi için farklı bir materyal sisteminden faydalanır. Örneğin, filament sarım ve profil çekme yöntemlerinde birçok durumda sürekli liflerden ve ıslak reçine sistemlerinden faydalanılır. Silindir sarım prosesi ile golf sopası, bisiklet şasisi ve diğer ürünlerin yapımı için prepreg kullanımı gereklidir. Bu nedenle iyi bir kompozit malzeme üretmek için değişik hammaddeler hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. El yatırma yöntemi, yapısal LTK parçalar üretmek için kullanılan eski bir kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntem güvenilir olmasının yanında, oldukça yavaş ve emek yoğun bir yöntemdir. Günümüzde özellikle otomotiv endüstrisinde yüksek kapasitede üretim oranına sahip yöntemler önem kazanmaktadır. Bu yöntemlerin otomasyonla tanışması, hızlı kür edilebilir reçineler, yeni lif formları, yüksek kararlılıkta kalite kontrol ekipmanları gibi gelişmeler, LTK'lerin hızla gelişmesini sağlamıştır. (Mallick, 1988).

Kompozit üretim prosesleri yaygın olarak iki ana kategoriye ayrılır: termoset kompozitler için üretim prosesleri, termoplastik kompozitler için üretim prosesleri. Kompozit ürünlerin yaklaşık %75'i termoset reçinelerle yapılır. Bu çalışmada yalnızca termoset reçine kullanıldığından termoset kompozit üretim yöntemleri açıklanacaktır.

### 2.3.1 Termoset Kompozitler İçin Üretim Prosesleri

Termoset kompozitlerin kullanımı havacılık, otomotiv, denizcilik, tekne, spor malzemeleri alanlarında ağır basmaktadır. Kompozit pazarında, çeşitli termoset kompozit malzeme işleme metotları mevcuttur. Her üretim prosesinin avantaj ve limitleri vardır. Ticari açıdan bulunabilen üretim teknikleri aşağıda açıklanmıştır.

#### 2.3.1.1 El Yatırma (Prepreg) Prosesi

El yatırma prosesi başlıca iki ana metoda ayrılır: ıslak yatırma ve prepreg yatırma. Prepreg; kısmi kür edilmiş lif takviyeli reçinedir. Genellikle %42 oranında reçine içerir. Laminasyon sırasında bir miktar reçine akışı ile beraber, %60' lık bir lif hacimsel oranı elde edilir ki, bu da havacılık endüstrisi için standart bir değerdir. (Mallick, 1988) Prepreg yatırma, otoklav işleme veya vakum paketlenme prosesi olarak da bilinir. Prepreg yatırma veya otoklav prosesi emek yoğun proseslerdir. İş gücü maliyetleri, filament sarım, profil çekme veya diğer yüksek kapasiteli üretim yöntemlerine göre 50 – 100 kat daha fazladır. Bunun yanında, prototip parçaların ve küçük miktardaki taleplerin karşılanmasında diğer proseslere göre avantajlıdır. (Mazumdar, 2002).

Prepreg yatırma yöntemi, yaygın olarak; yüksek üretim oranları istenmeyen havacılık endüstrisinde, prototip parçaların yapımında kullanılır. Kanat yapıları, gemi parçaları ve spor malzemeleri, bu proses kullanılarak üretilir. (Mallick, 1988) Grafit / epoksi prepregler, prepreg yatırma prosesi için en çok tercih edilen malzemelerdir. Cam / epoksi ve Kevlar / epoksi prepregler de kullanılır. Ancak bunların kullanımı karbon / epoksi prepreglerden oldukça azdır. Bunu ana sebebi; karbon epoksi prepreglerin çok daha hafif ve dayanıklı olmasıdır ve bileşende kütle kazanımı sağlar. Bu proses yaygın olarak havacılık endüstrisinde kullanıldığından, ağırlık, kritik bir tasarım faktörüdür. Maliyet yönünden, karbon / epoksi prepreglerle diğerleri arasında önemli bir fark yoktur.

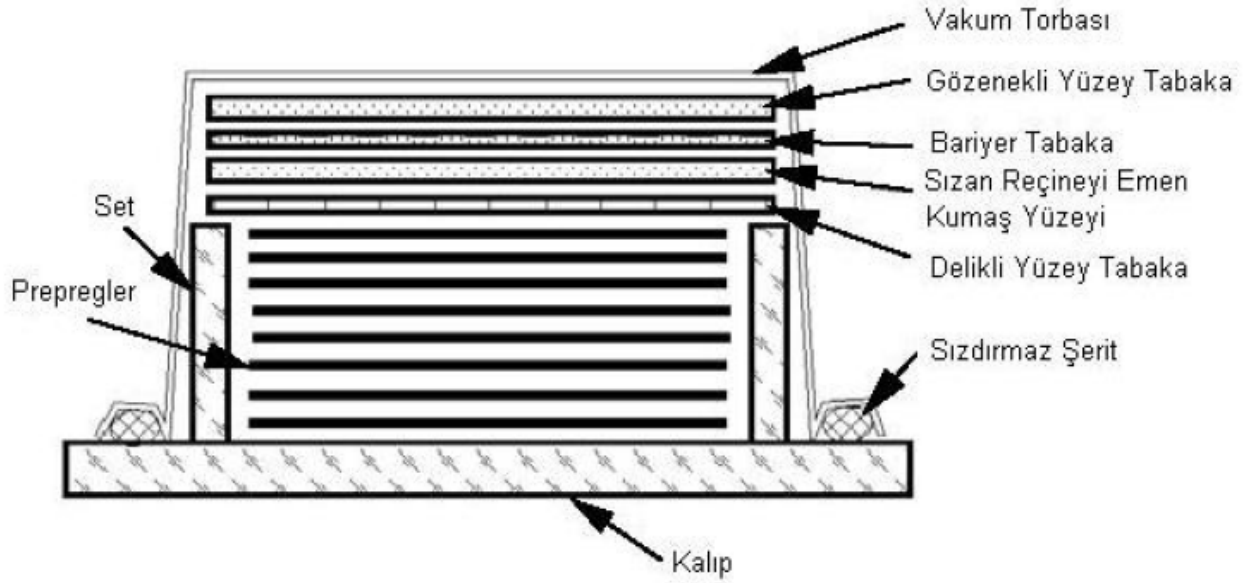
Epoksi dışında; poliimid, polisiyanat gibi yüksek sıcaklık reçineleri de prepreg sistemlerinde kullanılabilir. Prepreg yatırma prosesi için gerekli olan ekipman; üzerine prepreglerin, istenen lif oryantasyonu ve sıklığına göre yatırıldığı açık bir kalıptır. Prototip yapılar için ekipman; metaller, odunlar ve plastikler işlenerek yapılır. Havacılıkta kullanılan bileşenlerin üretimi için genellikle ekipman, karbon / epoksi prepregleri, karbon / siyanat ester prepregleri, cam / epoksi prepregleri, cam / siyanat ester prepregleri ve üretilen esaslı ekipmanlardır. Bu proses için hammadde, soğutulmuş durumda muhafaza edilen, prepreg malzemedir. Kompozit parça

üretmek için prepreg soğutucudan çıkarılır ve yavaşça oda sıcaklığına getirilir. Genelde, sıvılaşmayı önlemek için eritme işlemi orijinal paketinde yapılır. Prepreg oda sıcaklığına getirildiğinde, istenen uzunluk ve şekilde kesilir. Tabakalar, istenen lif oryantasyonunu sağlayacak biçimde kesilir. Bazı durumlarda, kumaştan yapılmış prepregler kullanılır.

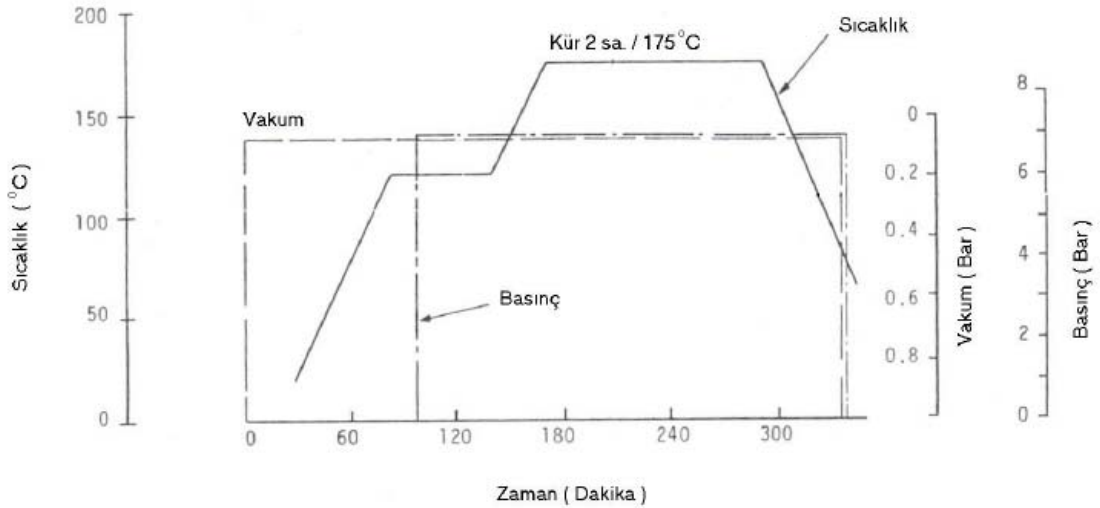
Havacılık uygulamaları için, bu işlem, kontrollü nem ve sıcaklık koşullarında, çok düzenli ve temiz bir atmosferde yapılır. Parça üretimi, prepreglerin açık kalıbın üstüne yatırılmasıyla yapılır. Parçanın kalıptan kolay ayrılabilmesi için ayırıcı ajan uygulanır. Prepreglerin arka yüzeyindeki film çıkarılır ve prepregler, üretim kartında belirtilen diziye göre yatırılır. Her bir prepreg yatırıldıktan sonra, arada sıkışmış hava kalmamasından emin olunmalıdır. Tam bir temas sağlamak ve sıkışan havayı çıkarmak için sıkma silindirleri kullanılır. İstenen dizi ve lif oryantasyonuna göre tüm prepregler yatırıldıktan sonra, parçanın kür ve birleştirme işlemleri için Şekil 2.14'te gösterildiği gibi vakum torbalama hazırlıkları yapılır (Mazumdar, 2002).

Vakum torbalama için gerekli adımlar:

1. Prepreglerin üst kısmına, delikli yüzey tabakası konur. Bu delikli ince tabaka sıkışan hava, reçine fazlalıklarına ve uçucu sıvıların geçişine izin verir.
2. Sızan reçineyi toplayan bir kumaş yüzey, delikli yüzey tabakasının üzerine konur. Bu kumaş yüzeyin görevi; prepreg yığınından gelen nem ve reçine fazlalığını emmektir.
3. Bu yüzeyin üzerine bir bariyer tabaka uygulanır. Bu yüzey, prepreglerin üzerindeki delikli yüzey tabakasına benzer. Ancak, delikli veya gözenekli değildir.
4. Sızan reçineyi toplayan kumaş yüzeye benzer, gözenekli bir yüzey, bariyer tabaka üzerine konur. Bu yüzeyin görevi parça üzerinde düzgün bir basınç oluşturmak ve aynı zamanda hava ve uçucu sıvıların geçişine izin vermektir.
5. Son tabaka vakum torbasıdır. Bu, genişletilebilir bir PA (poliamid) film tabaka veya tekrar kullanılabilir bir elastomerdir. Vakum torbası ile kalıp arasında, şeritler yardımıyla sızdırmazlık sağlanır. Bir düze vakum torbası içerisine salınır ve torba içerisinde vakum oluşturmak için bir vakum hortumuyla birleştirilir.



Şekil 2.14 El yatırma prosesi için vakum torbalama (Mazumdar, 2002).



Şekil 2.15 Karbon / epoksi prepreg için klasik kür çevrimi (Mallick, 1988).

Laminasyon ve torba kalıplamadan sonra kalıp kür etme ve birleştirme için bir otoklav içerisine konur. Otoklav, bir basınç kabına benzer, kamara içerisinde kompozitin işlenmesi için istenen basınç ve sıcaklık değerlerini korur. Tipik bir kür çevrimi Şekil 2.17' de gösterilmiştir. Kür çevrimi, reçinenin tipine ve parçanın kalınlık ve geometrisine bağlıdır. Basınç iki şekilde oluşturulur:

- Vakum torbası kullanarak,
- Otoklav içerisinde harici basınç oluşturarak

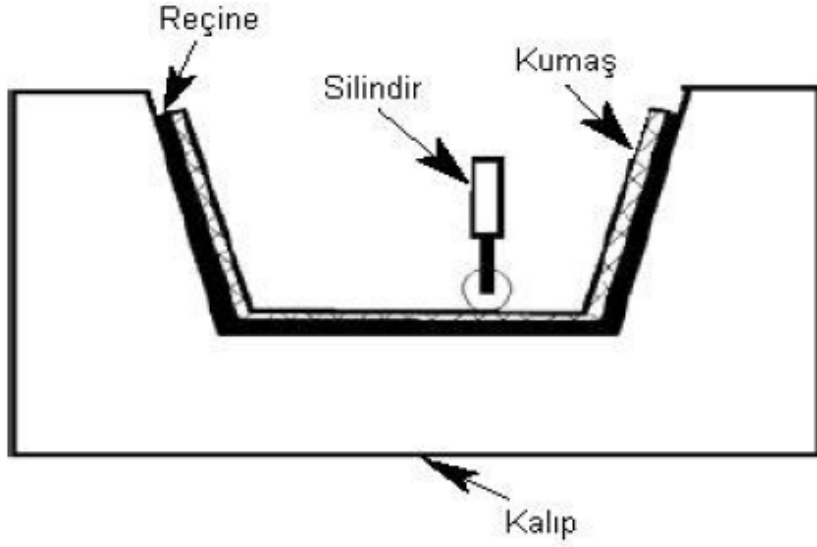
Vakum torbası, torba kalıp içerisinde vakum oluşturur ve bu da düzgün birleşmeyi sağlar. Harici basınç, otoklav içerisine basınçlı hava veya nitrojen enjekte edilerek sağlanır. Nitrojen,

kür işleminin yüksek sıcaklıklarda yapıldığı durumlarda, yanmayı yada alev oluşumunu önlemek için kullanılır. Böylece, torba dışındaki dış basınç ve torba içerisindeki vakum basıncı, tabakaları kalıba doğru sıkıştırmak ve tabakalar arası tam bir bağlanmayı sağlamak için yeterli basıncı oluşturur. Kür için gerekli sıcaklık ısıtılmış hava veya nitrojenle sağlanır. Şekil 2.17' de görüldüğü gibi, torba kalıp sistemine öncelikle bir vakum uygulanır. Daha sonra, sıcaklık, reçine akışını artırmak için belirli bir seviyeye kadar çıkarılır. Isıtma hızı genellikle 2°C/dak. -4°C/dak. arasındadır. Bir oturma süresinden sonra, kompozitin kür edilmesi için daha yüksek bir sıcaklığa çıkartılır. Bu aşamada basınç, torba kalıp sisteminin dış kısmından uygulanmaktadır ve gereksinimlere bağlı olarak yaklaşık 2 saat devam eder (Mallick, 1988).

### **2.3.1.1.a Islak El Yatırma Prosesi**

Önceleri, ıslak yatırma prosesi kompozit parça üretiminde baskın üretim metoduymdu. Halen, denizcilik endüstrisinde, prototip parçaları yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu proses emek yoğunudur ve açık kalıp nedeniyle, stiren yayılımı sorunu vardır. Bu proseste sıvı reçine kalıba uygulanır ve takviye üste yerleştirilir. Lifi reçine ile emdirmek için bir rulo kullanılır. Bir başka reçine ve takviye yüzeyi, uygun kalınlık elde edilinceye kadar uygulanır. Oldukça esnek bir prostestir ve kullanıcıya değişik tipte kumaş ve hasır malzemeler yerleştirmek suretiyle parçanın optimizasyonuna izin verir. Takviye manuel olarak yatırıldığından el yatırma prosesi olarak da isimlendirilir. Bu proses, küçük yatırım maliyeti ve düşük seviyede uzmanlık gerektirdiğinden kullanımı kolaydır. Ticari boyutta bu proses yaygın olarak tekne yapımında, yel değirmeni pervanelerinde, depolama tanklarında ve yüzme havuzlarında kullanılır. Prosesin basitliği ve düşük yatırım maliyeti nedeniyle, bu proses prototip parça yapımında yaygın olarak kullanılır. Basit ve karmaşık şekiller, bu proses kullanılarak üretilebilir. Gemi gövdeleri, balsa veya köpük özlü cam lifli katmanların laminasyonu ile oluşturulur. Öz kullanılmadan yapılan, tek kat panellerde boylamsal ve enine taşıyıcı sistemler daha karmaşık ve sandviç panellerden daha ağırdır. Sandviç paneller, tek kat kabuk panellere göre daha uzun mesafeleri destekler. Cam lifinden dokunmuş kumaşlar, Kevlar ve karbon lifleri takviye elemanı olarak kullanılabilir. Ticari sektörde E-cam kullanımı baskındır. Parçanın gereksinimine göre, epoksi, polyester ve vinil ester reçineler el yatırma prosesinde kullanılır. Polyester reçine tekne ve ticari malların üretiminde en çok kullanılan reçinedir. Cam şeritler de tekne gövdelerinin yapımında kullanılır.

El yatırma prosesi için gerekli kalıp tasarımı, diğer üretim prosesleriyle karşılaştırıldığında çok basittir. Çünkü, proses çoğunlukla oda sıcaklığında ve düşük basınç kür şartları gerektirir. Çelik, tahta, cam takviyeli plastik ve diğer maddeler kalıp malzemesi olarak kullanılabilir. Kalıp dişi veya erkek kalıp olabilir. Küvet yapımında bir erkek kalıp kullanılır. Tekne endüstrisinde, yat gövdelerinin yapımı için, tek yönlü cam takviyeli plastikten yapılmış dişi kalıp kullanılır. Kalıbın dış kabuğu, ahşap bir iskelet ile sertleştirilir. Islak yatırma prosesi şematik olarak Şekil 2.16'de gösterilmektedir. Kompozit parçanın kalınlığı, bir seri takviye kat ve sıvı reçine kat uygulanarak oluşturulur. Bir silindir, fazla reçineyi sıkmak ve reçinenin yüzey boyunca düzgün dağılımını sağlamak için kullanılır. Silindirin sıkma işlemiyle, liflerin homojen olarak ıslanması sağlanır.



Şekil 2.16 El yatırma prosesi

Islatma işlemini verimli hale getirmek için bir fulard kullanılarak reçine, kumaş yüzeye üniform olarak uygulanabilir ve daha sonra kumaş, kalıba yatırılır. Sertleştiricisi önceden katılmış reçine çoğunlukla oda sıcaklığında sertleşir. Bazı durumlarda tam sertleşme için ek bir ısıl işlem gerekebilir (ASM Handbook, 2001). Parça katılaştıktan sonra kalıptan çıkarılır. Tüm proses; çevrim zamanı, bileşenin boyutu ve kullanılan reçinenin formülasyonu tarafından belirlenir. Büyük boyutlu parçalar genellikle oda sıcaklığında kür edilir. Eğer yapılacak lamina yüzey kalın ise, aşırı ısınmayı önlemek için duvar kalınlığı kademeli şekilde oluşturulur. Bu şartlarda o günkü işi bir kabuk tabaka ile bitirmek yaygın kullanılan yöntemdir. Bu tabaka temizlenerek, bir sonraki tabakanın bağlanması için temiz ve iyi bir yüzey oluşturulur. Son parçanın kalitesi, operatörün yeteneğine oldukça bağlıdır.

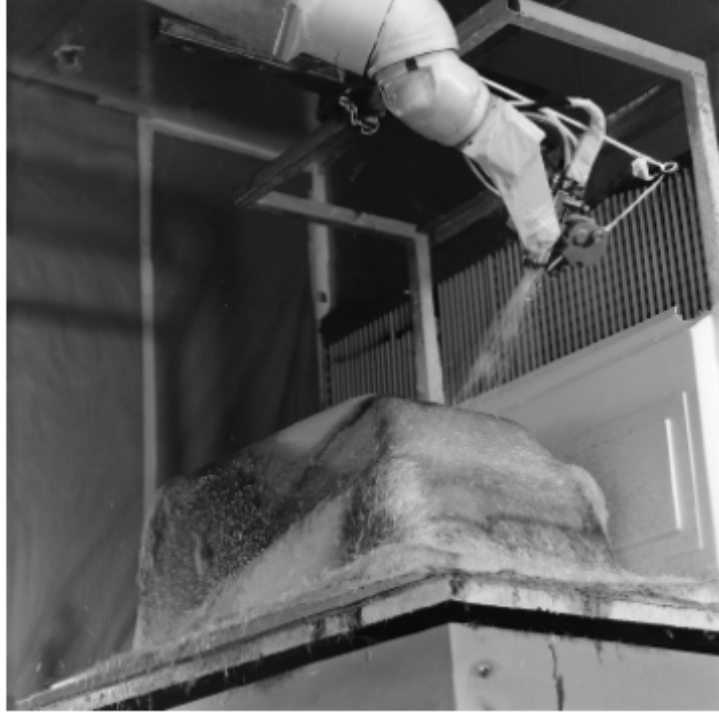
El yatırma prosesinin temel sınırlaması, kalıplamada tek bir düzgün yüzeyin oluşudur. Parça kalınlığının, boşluk miktarının, lif içeriğinin, arka yüzdeki yüzey kalitesinin kontrolündeki eksiklik, boyutsal stabilitenin kritik olmadığı, düşük gerilimli parçalarda bu yöntemin uygulanması oldukça yaygındır (Mazumdar, 2002).

### 2.3.1.2 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme prosesi el yatırma prosesi ile benzerdir. Reçine ile lifin, kalıp üzerine uygulanma metodu farklıdır. El yatırma prosesi emek yoğundur. Çünkü takviye ve reçine malzeme manuel olarak uygulanır. Püskürtme prosesinde ise, reçine ve takviye malzemeler, bir sprej tabancası kullanılarak, saatte 1000 – 1800 litre ( 450 kg- 800 kg) kapasite ile uygulanır. Bu proseste kesikli cam lifi ve reçine / katalizör kalıp üzerine biriktirilir. Tabanca es zamanlı olarak filament lif şeritlerini belirlenen uzunluklarda ( 20 - 40 mm) keser ve lifi reçine / katalizör arasından kalıba sevk eder. Püskürtme prosesi, el yatırma prosesinden çok hızlıdır ve daha ucuz bir seçenektir. Çünkü cam lifinin pahalı olmayan bir formu olan şeritlerden faydalanmaktadır. Ürünün dayanımının çok önemli olmadığı yerlerde, püskürtme metodu en uygun seçenektir. Kuvetler, yüzme havuzları, tekne gövdeleri, depolama tankları, kanal ekipmanları, mobilya bileşenleri bu proses kullanılarak üretilen ürünlerin bazı ticari kullanım alanlarıdır.

Bu proses için takviye malzemesi, cam şeritleridir. Geliştirilmiş mekanik özellikler için, kumaş yüzey ve kesikli lif takviyeli yüzey kullanılır. En çok kullanılan malzeme tipi E-camdır. Fakat, karbon ve Kevlar şeritler de kullanılabilir. Kontinü şeritler, kumaş ve çeşitli öz materyaller gerektiğinde elle yerleştirilebilmektedir. Bu prosesteki takviye elemanın tüm parçanın ağırlığına oranı % 20 – 40 arasındadır. Püskürtme prosesi için kullanılan en yaygın reçine sistemi, genel amaçlı polyesterdir. İzofalik polyester ve vinil ester de bu proseste kullanılabilir. Reçine genellikle belirgin miktarda dolgu içerir. En yaygın dolgular; kalsiyum karbonat ve alüminyum trihidrat malzemelerdir. Dolgulu reçine sistemlerinde, dolgu malzemesi, bazı takviye elemanlarının yerini alır. % 5 – 25 oranında dolgu kullanılır (Mazumdar, 2002). Püskürtme prosesindeki işlem basamakları, el yatırma prosesindekilere çok benzerdir. Bu proseste kalıba önce bir çözücü ajan uygulanır. Daha sonra, bir kat jel tabaka uygulanır. Jel tabaka 2 saat sertleşinceye kadar bekletilir. Jel tabaka sertleşince, lif reçine karışımını kalıp yüzeyine biriktirmek için bir sprej tabancası kullanılır. Sprej tabancası gelen filament şeritleri (bir veya daha çok şerit) belirlenen uzunluklarda ( 20-40 mm) keser ve lifi, reçine / katalizör karışımına Şekil 2.17’ de görüldüğü gibi sevk eder.





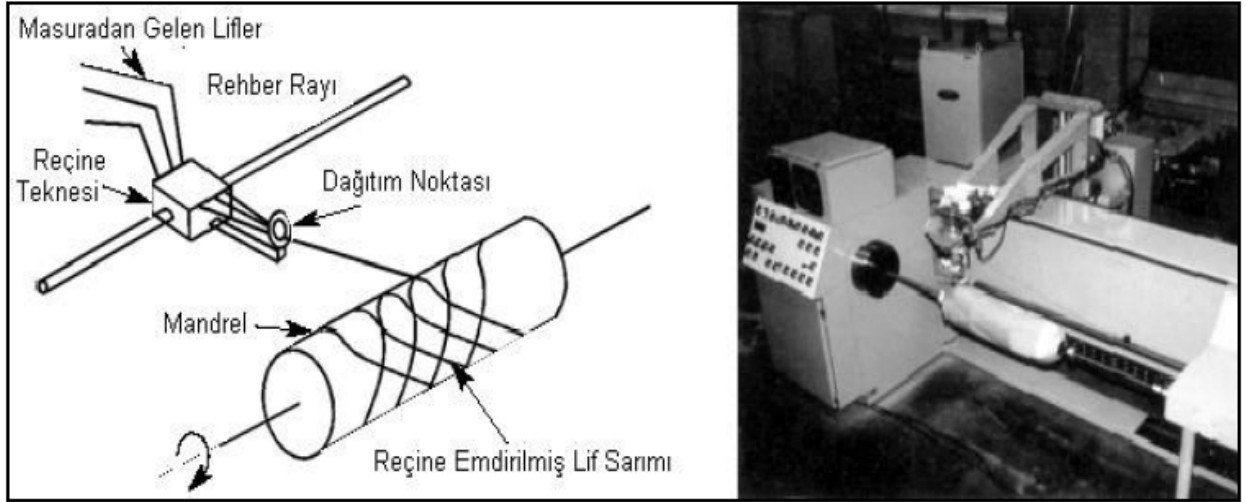
Şekil 2.17 Küvet retimi için robotlu püskürtme prosesi. Robot jel ile kesikli cam lifi uygulamaktadır (Mazumdar, 2002).

Reçine / katalizör karıştırma tabanca içerisinde veya tabancanın hemen n kısmında gerçekleşebilir. Tabanca içerisinde sağlanan karıştırma işlemi, sağlık açısından operatöre verebileceği zararları minimuma indirmek için tercih edilir. Diğer Şekilde, katalizör, reçineye her iki tarafında bulunan düzeler ile püskürtülür. Hava kullanılmayan sprej tabancaları daha yaygın hale gelmektedir. Çünkü, bunlar daha kontrollü bir sprej sevki ve daha az uçucu partikül yayılımı sağlarlar. Havasız sistemlerde, reçineyi özel düzeler vermek için hidrolik basıncı kullanılır. Özel düzeler reçine akışını kk damlalara parçalar ve daha sonra takviye ile doyurulmuş hale gelir. (Mazumdar, 2002)

Malzeme kalıp üzerine püskürtüldükten sonra, fira ve silindir kullanarak hem sıkışmış hava uzaklaştırılır, hem de liflerin iyi ıslatılması sağlanır. Reçine oda sıcaklığında kr edilir. Reçinenin kr edilmesi, reçine türüne bağlı olarak 2 – 4 saat alabilir. Kr işleminden sonra, parça kalıptan çıkarılır. Püskürtme prosesi yüksek ısı ve basıncı ihtiyaı olmadığından oldukça ekonomiktir. Parça bazen oda sıcaklığında veya bazen yüksek kapasiteli üretimler için fırınlarda kr edilir. Kr işlemi sırasında basıncı uygulanmaz.

### 2.3.1.3 Elyaf Sarma Prosesi

Elyaf Sarma prosesi, reçine emdirilmiş liflerin dönen bir mandrel üzerine istenen açıda yatırıldığı bir prosestir. Tipik filament sarım prosesi Şekil 2.18’de gösterilmektedir.



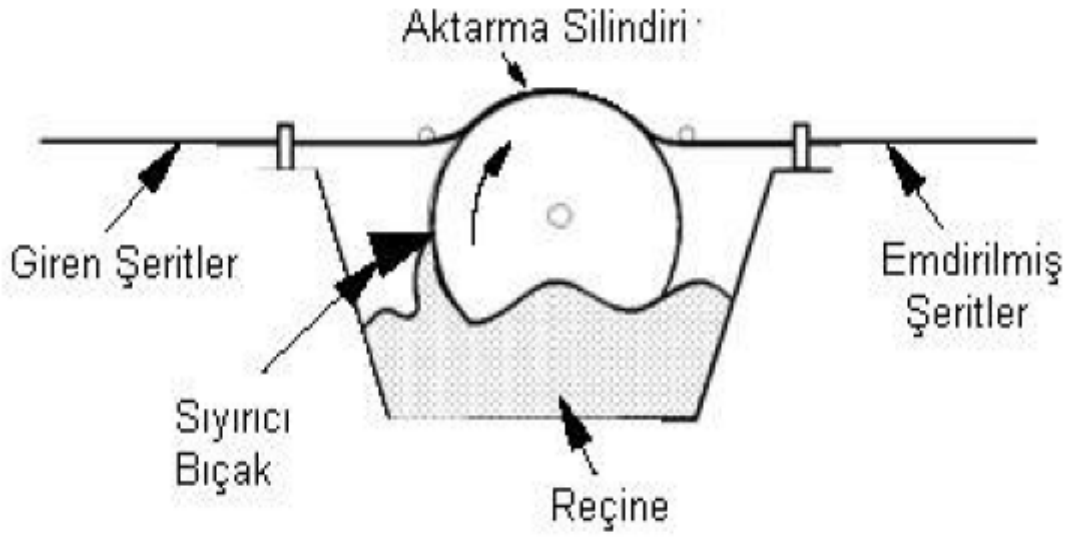
Şekil 2.18 Filament sarım prosesinin şematik ve gerçek görünüşü (Mazumdar, 2002).

Dağıtım ünitesi ileri-geri hareket etmekte, mandrel ise belirli bir hızda dönmektedir. Dağıtım ünitesinin ve mandrelin hızı kontrol edilerek istenen lif açısı oluşturulur. Boru şeklindeki parçaların yapımı için çok uygun bir prosestir. Proses, yüksek hacimli ve ucuz üretim için otomatize edilebilir. Filament sarım yöntemi ile üretilen en yaygın ürünler; tüp şeklindeki yapılar, basınç hortumları, borular, roket motorlarının koruyucu kaplamaları, kimyasal depolama tankları, roket fırlatma tüpleridir. Gelişmiş filament sarım makinelerinin tanınması ve CAD (bilgisayar destekli tasarım) sistemlerinin ilavesi ile çok karmaşık geometrilerin üretilmesi mümkün olmuştur ve geometrik sınırlamaların birçoğunun üstesinden gelinmiştir. Kavisli şekiller, birleştirme çubukları, şişeler, oltalar, golf sopaları, basınç silindirleri, taşıyıcı elemanlar, şaftlar (endüstriyel ve otomotiv), benzin tüpleri, teleskobik (iç içe geçmeli) direkler vs. günümüzde filament sarım kullanılarak üretilen ürünlerdir. Filament sarılmış cam lifi takviyeli plastik (CTP), su nakli boru sistemlerinde kullanılır. Bu, temiz ve kılavuzsuz boru sistemi oluşturur. Filament sarılmış boru, su hareketini sağlamak için gereken enerjiyi, demir ve beton borulara kıyasla, pürüzsüz iç yüzeyi sayesinde % 10 – 35 arasında azaltır. CTP borunun ağırlığı demir borunu ağırlığının 1/4’ ü ve beton borunun 1/10’ u kadardır. Bu özellik, boruların taşınmasında ve kurulmasında avantaj sağlar. (Ersoy, 2005)

Genellikle, filament sarım için başlangıç malzemesi filament lifler (iplikler) ve sıvı termoset reçinelerdir. İplikler arka askıda makara formunda bekletilir ve dağıtım ünitesindeki bir reçine banyosu içerisinden geçirilir. Cam, karbon ve Kevlar lifleri filament sarım için kullanılır. Cam lifleri ucuz olduğundan kullanımı en yaygın olan liflerdir. Epoksi, polyester ve vinil ester reçineleri kullanılır. Polyester reçine ile cam lifi düşük maliyetli uygulamalar için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Filament sarım için en yaygın ekipman çelik bir mandreldir. Çelik mandreller, hem kompozit yapının iç yüzeyinde yüksek parlaklık özelliği sağlamak, hem de mandrelin kolay hareket etmesini sağlamak için krom kaplıdır. Mandrel yapımında alüminyum da kullanılmaktadır. Basınç hortumları gibi bazı uygulamalarda mandrel çıkarılmaz ve kompozit yapının bir bileşeni olarak kalır. Çıkarılmayan mandrel, kompozit iç yüzeyinde geçirgen olmayan bir bariyer yüzey oluşturur. Bu da, basınç hortumları içerisindeki basınçlı gaz veya sıvıların sızıntısı önler. Genellikle metal ve termoplastik malzemeler bariyer yüzey olarak kullanılır. Filament sargılı yapıların oluşturulması için, bir mandrel filament sarım makinesinin önüne Şekil 2.20’de görüldüğü şekilde yerleştirilir. Filament sarım makinesi torna makinesine benzer. Burada, baş ve son kısımdaki kabzalar, mandreli tutmak için kullanılır. Mandrel döner ve dağıtım ünitesi, reçine emdirilmiş lifleri mandrele belirli açıda yatırmak için mandrel boyunca gidiş geliş yapar. Kompozit malzeme pazarında, iki eksenliden, altı eksenliye kadar değişen, çok çeşitli bilgisayar kontrollü filament sarım makineleri mevcuttur.

Yaş sarım sırasında, çablıklara, masura formunda yerleştirilen filamentler, taşıma ünitesinde bulunan reçine banyosundan, daha sonra dağıtım gözünden mandrele doğru geçirilir. İyi bir lif ıslanması sağlamak için, lif demeti içerisinde kalan hava çıkarılmalı ve reçine ile yer değiştirilmelidir. İyi bir emdirme için birçok şey yapılmaktadır: şeritler sabit gerilimde tutulur, şeritler rehber mandallardan geçirilir, reçine banyosunda bir sıyırıcı bıçak kullanılır. (Şekil 2.19)

Şeritlerin gerilimi çok düşük olursa tabaka tam olarak sıkı paketlenemez ve tabaka üzerinde aşırı reçine bölgeleri oluşturur. Gerilim çok yüksek ise, lif kopuşlarına sebep olabilir veya iç katmanlarda reçineden yoksun bölgeler oluşturabilir. Sıyırıcı bıçak düzenlemesinin kullanımı, aşırı reçineyi sıyırır ve üniform reçine katmanı oluşturur. İstenen sarımı elde etmek için, makine operatörü, yazılımın ihtiyaçlarına bağlı olarak; boru çapları, mandrel hızı, basınç oranı, bant genişliği, lif açısı vs. gibi birçok parametre girer.

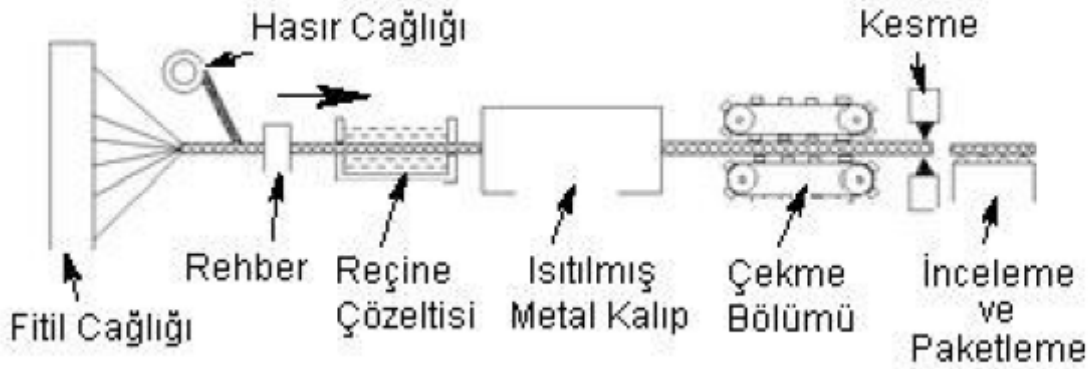


Şekil 2.19 Elyaf sarım işleminde sıyrıcı bıçak düzenlemesi (Mazumdar, 2002).

İstenen lif açısı dağıtımını sağlandıktan sonra, kompozit tabaka ile mandrel, bir kür bölgesine taşınır. Burada, tabaka oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda kür edilir. Kalın tabakalar için, sarımın bölümler halinde yapılması ve tabakanın, sarım işlemleri arasında kür işlemine izin verilmesi önemlidir. Parça kür edildikten sonra, mandrel bir çıkarma elemanı ile parçadan çıkarılır. Filament sarılmış parçaların dış yüzey kalitesi genellikle iyi değildir ve yüzeyin ekstra işleme, zımparalama işlemlerine tabi tutulması gereklidir.

#### 2.3.1.4 Profil Çekme Prosesi (Pultrusion)

Profil çekme prosesi düşük maliyetli, yüksek üretim kapasiteli bir prosestir. Bu proseste, reçine emdirilmiş lifler, parça üretimi için bir kalıba gönderilir. Profil çekme prosesiyle sabit kesit ve sürekli uzunlukta parçalar üretilir. Profil çekme; basit, düşük maliyetli, sürekli ve otomatik bir prosestir. Şekil 2.20'de reçine emdirilmiş ipliklerin, ısıtılmış bir kalıba sabit hızda gönderildiği tipik bir profil çekme prosesi gösterilmektedir.



Şekil 2.20 Profil çekme prosesinin gösterimi

Malzeme, ısıtılmış kalıp içerisinde geçildiğinde kısmen veya tamamen kür edilmiş olur. Profil çekme prosesi ile elde edilen parçalar düzgündür ve genellikle ard işlem gerektirmez. Profil çekme yaygın olarak, sabit kesitli katı ve boşluklu yapıların üretiminde kullanılır. Aynı zamanda, özel uygulamalar için temel şekillendirilmesi yapılmış parçaların üretiminde kullanılır.

En yaygın uygulamaları; kirişler, kanallar, tüpler, ızgara sistemleri, zemin ve ekipman destekleri, yürüyüş yolları ve köprüler, tırabzan, merdiven, hafif direkler, elektrikli çevirmeler gibi alanlardır. Profil çekme ile oluşturulan şekiller altyapı, otomotiv, ticari ve diğer endüstriyel sektörlerde kullanılır.

Şekil 2.21’de cam lifli ızgara sistemi görülmektedir. Izgara sistemleri hafif, uzun süre dayanımı olan sistemlerdir ve kolay montaj imkanı sağlar. Profil çekme genellikle eş yönlü lifler içeren parçaların üretiminde kullanılır.

E-cam, S-cam, karbon ve aramid lifleri takviye elemanı olarak kullanılır. En çok kullanılan takviye tipi E-cam fitillerdir. Kumaşlar ve hasırlar da çift yönlü ve çok yönlü dayanım özellikleri sağlamak için kullanılabilirler.



Şekil 2.21 Profil çekme yöntemi ile üretilmiş parçalar kullanarak üretilen cam lifi ızgara ve tirabzan sistemleri (Mazumdar, 2002).

Doymamış polyester, profil çekme prosesi için en yaygın olarak kullanılan reçine malzemesidir. Profil çekme kolay işlemenin yanında çok iyi performans / fiyat oranı sunmaktadır. Vinil ester ve epoksiler gelişmiş özellikleri için kullanılabilirler. Ancak, bu reçinelerin işlenmesi zorlaşmıştır. Ayrıca, bu reçinelerle çalışırken kullanılan çekme hızları, reçine aktivitesinin düşük olması nedeniyle daha yavaştır. Çeşitli tiplerdeki dolgular; izolasyon karakteristiklerini, kimyasal dayanıklılık, alev dayanımı gibi özellikleri geliştirmek ve toplam maliyeti azaltmak amaçlarıyla polyester reçine içerisine katılır. Kalsiyum karbonat, maliyeti azaltmak için ilave edilir. Kalsiyum karbonat oldukça ucuz bir malzemedir ve SMC bileşenlerinde temel dolgudur. Parçanın opaklığını artırır. Alüminyum trihidrat ve antimon trioksit alev geciktirici olarak kullanılır. Alüminyum silikat (kaolin kil) izolasyon, opaklık, yüzey finiş özelliği ve kimyasal dayanımı artırır. (Mazumdar, 2002)

Profil çekme prosesinde, reçine emdirilmiş liflerin, istenilen şekle dönüştürülmesi için çelik kalıplar kullanılır. Kalıpların kesitleri, uzunlukları boyunca sabittir. Kalıplar belirli bir sıcaklığa kadar, reçinenin kısmen veya tamamen kür edilmesi için ısıtılırlar. Profil çekme prosesi kullanarak kompozit parça yapmak için, fitil makaraları, filament sarım prosesinde olduğu gibi cağlığa yerleştirilir. Daha sonra takviye elemanları bir reçine banyosu içerisinden geçirilerek, liflere reçine emdirilir. Kuru liflerin aşındırıcı yapısı nedeniyle, genellikle seramik rehberler kullanılır. Bu nedenle emdirilmiş takviye elemanları ısıtılmış bir kalıp içerisinden geçirilir. Kalıp, hafif daralan bir girişe sahiptir. Reçine ısıtılmış kalıp içerisinden geçerken kür edilir. Kalıbın uzunluğu; reçinenin aktivitesine, parça kalınlığına ve üretim miktarı

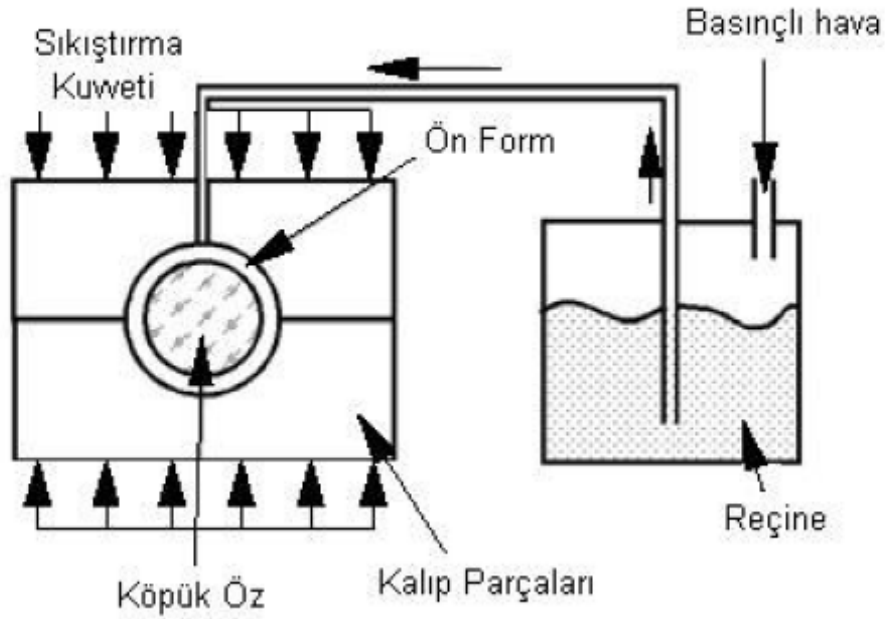
gereksinimlerine bağlıdır. Reçine aktivitesi ne kadar fazla ise, kalıp uzunluğu gereksinimi o kadar az olmaktadır. Profil çekme düşük maliyetli kompozit parça üretimini, prosesin otomatikleştirilmesi ve lif-reçine maliyetlerinin prepreg ve kumaşa kıyasla daha az olmasıyla sağlar. Profil çekme sürekli bir proses olduğundan, istenen uzunlukta parça üretilebilmektedir. Parçalar daha sonra belirlenen uzunluklarda, bir bıçkı veya demir testere ile kesilirler.

### **2.3.1.5 Reçine Transfer Kalıplama Prosesi**

Reçine transfer kalıplama prosesi, sıvı transfer kalıplama yöntemi olarak ta bilinir. Enjeksiyon kalıplama ve baskı kalıplama metotları yüksek kapasiteli üretim yöntemleri olmaları nedeniyle popülerite kazanmışlardır. Bu proseslerle üretilen parçaların kullanımı yapısal olmayan uygulamalarla sınırlıdır. Bu kalıplama proseslerinin aksine, RTM prosesi, maliyet açısından verimli parçaların üretimini, düşük maliyetli ekipman kullanımıyla başarmaktadır. RTM, lif yönlendirilmesi kontrol altında tutulduğu bir prostir ve yaklaşık net şekilli parçaların üretimini sağlar. RTM prosesinde genellikle sürekli lifler kullanılır. Kalıp iki bölümden oluşur.

Birinci bölüm, ikinci bölüm üzerine gelir ve iki kısım birleşir. Daha sonra dağıtım ekipmanları kullanılarak, basınç altında tutulan termoset reçine, katalizör, renk, dolgu vs. karışımı tek yada çok port kullanılarak kalıp içerisine basılır. Karışımın kür kinetiğine bağlı olarak, 6-30 dakika kür edilir ve kalıptan çıkarılır. Bu nedenle, RTM prosesi yapısal parçaların her iki yüzeyinde de iyi yüzey kalitesi sağlar. RTM prosesi otomotiv, havacılık, spor malzemeleri ve tüketim malzemeleri üretiminde kullanılabilir. Genellikle bu yöntemle; kasklar, kapılar, hokey sopası, bisiklet kasası, yel değirmeni kanadı, spor araba kasası, otomobil panelleri ve uçak parçaları üretilmektedir. RTM prosesinde, lif ön formları veya kumaşlar takviye olarak kullanılabilir. Çok değişik türde ön formlar (ısıl işleme şekillenebilen hasırlar, braiding ile oluşturulmuş yapılar) RTM prosesinde kullanılabilir.

RTM prosesinde polyester, vinil ester, epoksi, fenolik reçine ve pigment ve dolgularla (alüminyum trihidrat ve kalsiyum karbonat) kombine edilmiş metil metakrilat reçineleri kullanılabilir. RTM prosesinde en çok kullanılan reçine türü doymamış polyester ve epoksilerdir. Epoksi ve diğer yüksek viskoziteli reçinelerin kullanımı ekipmanda değişiklikler gerektirmektedir. Yeni geliştirilen epoksi reçineler hızlı kür edilebilmektedir. Böylece üretim oranı artırılmaktadır.



Şekil 2.22 RTM prosesinin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

RTM prosesinde bir ön form olan cam lifinden hasır malzeme veya kumaş kalıptaki boşluğa Şekil 2.22'deki gibi yerleştirilir. Genellikle balsa ve köpük özler, öz malzeme olarak kullanılır. Ticari olarak elde edilebilen ve etrafında bir kaplayıcı örtü bulunan polipropilen özler de kullanılmaktadır. Bu örtü reçinenin öz içerisine geçişini engellemektedir. Öz malzeme kullanılması ile yapının hafif olması ve bir sandviç yapı oluşturmak suretiyle yapının güçlü olması sağlanmaktadır.

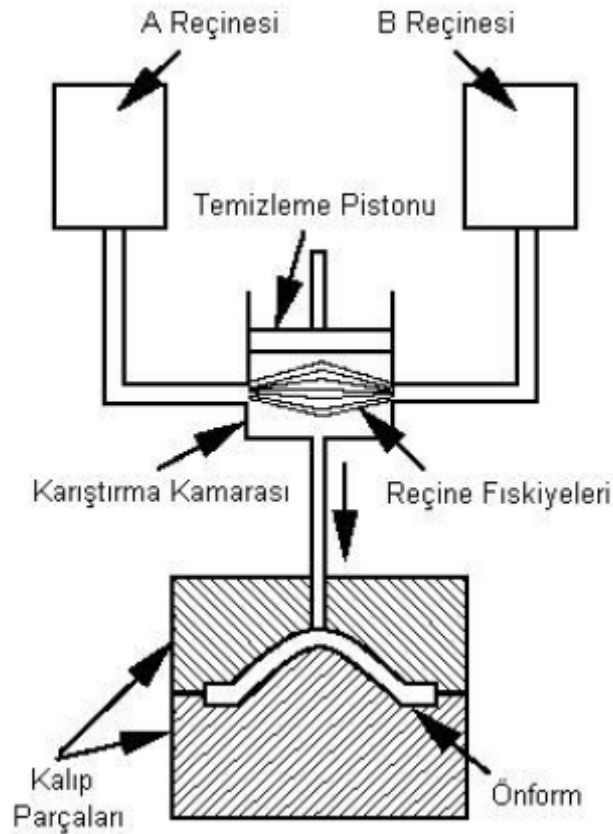
Takviye ve öz malzeme kalıp boşluğuna konulduktan sonra kalıp kapatılır. Kapatılan kalıba sıvı reçine düşük ya da orta basınçta kalıp boşluğuna basılır. Reçine enjeksiyon basıncı; reçine viskozitesi, kalıp büyüklüğü, boşluklu yapının geçirgenliği, gerekli kalıp dolun süresi ve reçinenin kür kinetiklerine bağlı olarak 69-690 kPa arasında değişir. Reçine ve katalizör farklı tanklarda depolanmaktadır ve statik bir karıştırıcıdan geçerek kalıba enjekte edilmektedir. Enjeksiyon işlemi aşağıdan yukarıya doğru yapılır. Bu tercih, sıkışan havanın minimuma indirilmesi için gereklidir. Kalıp üst kısmında hava menfezleri bulunmaktadır. RTM prosesinde, reçine akışı ve lif ıslanması kritiktir. RTM kalıbı içerisindeki reçine akışı birçok parametre tarafından belirlenir. Bunlar: enjeksiyon basıncı, kalıptaki vakum, reçine sıcaklığı, viskozite ve ön formun geçirgenliği şeklinde belirtilmektedir. Ön formun geçirgenliği lif türüne, lif yapısına, lif hacimsel oranına vs. bağlıdır. RTM prosesinde oluşabilecek kuru noktalar (uygun olmayan ıslatmadan kaynaklanan) en büyük sorundur. Düzgün bir reçine akışı ve kuru noktaları elemine etmek için, kalıptaki hava kanallarından vakum uygulanarak



takviye elemanlarındaki hava çıkarılmaktadır. Vakum aynı zamanda kalıbın hızlı dolmasını da sağlamaktadır. Kalıbın dolması çapraz bağlanmanın başlangıcının hemen öncesinde bitmektedir. Kalıp reçine ile dolduktan sonra, hızlı bir kür ve ardından kalıptan çıkarma işlemi gerçekleşir.

### 2.3.1.6 Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama Prosesi (SRIM)

SRIM prosesi RTM prosesine benzer. Ancak, kullanılan reçine ve bu reçinelerin enjeksiyon öncesinde karıştırma yöntemi farklıdır. İki reçine bir karıştırma kamarasında yüksek hızda karıştırılarak, kalıp içine basılır (Şekil 2.23). SRIM prosesi için kullanılan reçine, çok düşük viskoziteli ve çok yoğun kullanımı olan poliizosiyanürattır. SRIM prosesinde kullanılan reçine viskozitesi (10-100 cP) RTM prosesinde kullanılan reçine viskozitesinden (100-1000 cP) oldukça düşüktür. SRIM prosesinde kullanılan reçine reaksiyon oranı, RTM prosesinde kullanılan polyester ve vinilesterden çok daha hızlıdır.



Şekil 2.23 SRIM prosesinin şematik gösterimi (Mazumdar, 2002).

Karıştırılan reçineler, lif önformları ihtiva eden kalıp içerisine enjekte edilir. Kullanılan önform kesikli veya kontinü liflerden (braiding formunda) oluşturulmuş olabilir. SRIM

prosesinde, polimerlerin çapraz bağlanması iki reçinenin hızlı karışımı ile başlar. Kür işlemi çok hızlıdır ve reçine kalıba enjekte edildikten birkaç saniye sonra jelleşmeye başlar. Kalıp, kür hızını artırmak için önemli bir sıcaklığa kadar ısıtılabilir. Çapraz bağlanmanın tamamlanabilmesi için iki reçine doğru oranda karıştırılmalıdır. SRIM prosesi yüksek hacimde ve düşük maliyette üretim gereken alanlarda kullanılır. (örn. otomotiv endüstrisi). SRIM ile oluşturulan parçalar, parça büyüklüğüne bağlı olarak 1–5 dakika arasında üretilirler. Tamponlar, göğüs panelleri, pikapların taşıyıcı kabin kısımları gibi parçaların üretimi için kullanılmaktadırlar. SRIM prosesinde kullanılan reçinelerin yüksek reaksiyon oranı vardır ve bu nedenle kalıp boşluğu hızlı şekilde doldurulmalıdır.

### **2.3.1.7 Baskı Kalıplama Prosesi**

Baskı kalıplama yüksek kapasitesi nedeniyle otomotiv endüstrisinde popülerdir. Bu proses büyük otomobil panellerinin kalıplanmasında kullanılmaktadır. Baskı kalıplamada SMC (tabaka kalıp bileşeni) ve BMC (hacimli kalıp bileşeni) en yaygın kullanılan hammaddelerdir. Baskı kalıplama ile; prepreg ve öz malzemesi kullanılarak, yapısal paneller üretilebilmektedir. Baskı kalıplama, kalıp ve ekipman maliyetini düşürmek suretiyle birçok avantaj sağlar. Delik, flans ve üniform olmayan kalınlıklar kalıplama esnasında üretilebilir ki bu da, kaynak, delgi ve işleme gibi ikincil işlemleri ortadan kaldırır. ‘A’ kalite yüzeyler oluşturmak için kullanılması gereken maksimum lif içeriği % 30’ larla sınırlıdır. Bu nedenle yüzey kalitesi ile lif içeriğine bağlı olan mekanik özellikler optimize edilmelidir. Baskı kalıplamanın uygulama alanları; radyatör destekleri, ağır taşıtların sürücü kabinleri, motor bileşenleri, kişisel tekneler, küvetler, elektrik sigortaları, dış cephe lambaları olarak sıralanabilir. SMC, BMC bileşenleri, baskı kalıplamada hammadde olarak kullanılmaktadır.

Baskı kalıplamada SMC dikdörtgen parçalara kesilir ve önceden ısıtılmış olan kalıbın alt yarısına yerleştirilir. Kalıba konulan malzeme, toplam alanın %30 – 90’ ı arasında yer kaplamaktadır, geriye kalan alan kalıplama sonrası malzemenin akışı ile doldurulur.

Baskı kalıplama ile üretilen parçalar genellikle RTM ve enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilen parçalara kıyasla daha incedirler. Bu nedenle kalınlık boyunca sıcaklık değişimi üniformdur. Kalınlık boyunca üniform sıcaklık, parçada üniform kür işlemi sağlar. Bu da, kür işleminden kaynaklanan parçada oluşabilecek ilave gerilimlerin oluşumunu önler. Kalın kesitli parçalarda, kalınlık boyunca sıcaklık dağılımı üniform değildir. Kalın bölümlerde, kalıba temas eden yerler kalıp sıcaklığına hemen ulaşırlarken, orta kısımların bu sıcaklığa ulaşması zaman alır. Buna rağmen, reçinenin egzotermik kür reaksiyonu nedeniyle orta tabaka

sıcaklığı, kalıp sıcaklığını da aşabilmektedir. Kalıp genellikle çelikten yapılır ve yüzey özelliklerini geliştirmek için nikel veya krom kaplanır. Kalıp basıncı 2-30 MPa arasındadır.

### **2.3.1.8 Rulo Sarım Prosesi**

Rulo sarım prosesi, prepreg yatırma prosesi ile aynıdır. Buradaki fark, malzemenin genellikle silindirik veya etrafı sarılmış bir mandrel yapı oluşudur. Prosesin yatırım maliyeti düşüktür ve boru şeklindeki yapıların yüksek miktarda üretimi için uygundur. Bu proste prepreg, hareketli bir mandrel üzerine sarılır ve ardından birleştirme için bir şeritle kaplanır. Oluşturulan bu yapı bir bütün olarak kür edilmek suretiyle katılaştırılır. Rulo sarım prosesi yaygın olarak, golf sopası, olta, bisiklet şasisi ve boru şeklindeki diğer yapıların üretiminde kullanılır.

Rulo sarım prosesinde genellikle karbon/epoksi esyönlü prepreg yapılar kullanılır. Yüksek modüllü liflerin kullanımındaki dezavantaj; çekme uzamasını düşürmesidir. Düşük uzama, örneğin bir olta için balığın makaraya sarılması esnasında oltada oluşan eğilme nedeniyle oltanın kolaylıkla kırılmasına neden olmasındır. Bu problem, yapıda baştan uca doğru, uygun lif oryantasyonunun ve şerit oranının ayarlanmasıyla olur. Rulo sarım prosesi, düşük maliyetli bir işleme sistemine sahiptir. Bu proses için yüksek miktarlarda çelik mandreller kullanılır. İstenilen lif oryantasyonu ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) bu proses yardımıyla elde edilebilir. Olta yapımında cam liften hasır yapı carbon lifi ile  $90^\circ$  açı yapacak şekilde prepreg tabakanın üst kısmına konumlandırılır. Cam lifi yapıda eğilme dayanımı sağlar. Cam lifinden hasır tabaka ve prepreg tabakalar, kalıp kullanılarak kesilirler. Oltanın dipçik kısmının daha kalın olması için prepregler yamuk formunda kesilirler veya dipçik kısmına daha fazla prepreg tabaka yerleştirmek suretiyle bu başarılabılır.

### **2.3.1.9 Termoset Reçinelerin Enjeksiyon Kalıplanması**

Enjeksiyon kalıplama daha çok termoplastik endüstrisi için kullanılmakla beraber termoset endüstrisinde de başarıyla kullanılmaktadır. Yüksek kapasitede bir üretim yöntemidir. Enjeksiyon kalıplamada, belirli miktardaki malzeme ısıtılmış olan kalıp boşluğu içerisine basılır. Çapraz bağlanma işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp açılarak parça alınır. Toplam proses 30-60 s arasında sürmektedir. Enjeksiyon kalıplama en kısa proses zamanı gerektiren kalıplama yöntemidir. Dolayısıyla üretim oranı da diğerlerinden yüksektir. Enjeksiyon kalıplama ile küçük ve büyük boyutlu parçalar yapılabilir. Enjeksiyon kalıplama ile

Üretilen parçalar; lavabo giderleri, dikiş makinesi parçaları, küçük g malzemeleri, küçük cihazların motorlarında, elektrik sigortalarında kullanılmaktadır. Cam lifi takviyeli polyester parçalar, seramik sigortaların yerini almıştır ve %20 maliyet kazancı sağlamıştır. Termoset enjeksiyon kalıplama prosesinde kullanılan hammadde, hacimli kalıp bileşenidir. BMC genellikle kalın bir ip formunda satılmaktadır. Ağırlıkça %15-20 E-cam lifi (6-12 mm uzunluğunda), polyester reçine, dolgu, katkı ve pigment içerirler. Epoksi, vinil ester ve fenolik reçineler de kullanılabilir. (Ersoy,2005)

### 3. HAZIR KALIP BİLEŞENİ YÖNTEMİ (SMC)

#### 3.1 Smc Matematik Modeli

Birçok kaynakta önerilen bir SMC numunesi aşağıdaki kimyasal bileşenlerden oluşmaktadır:

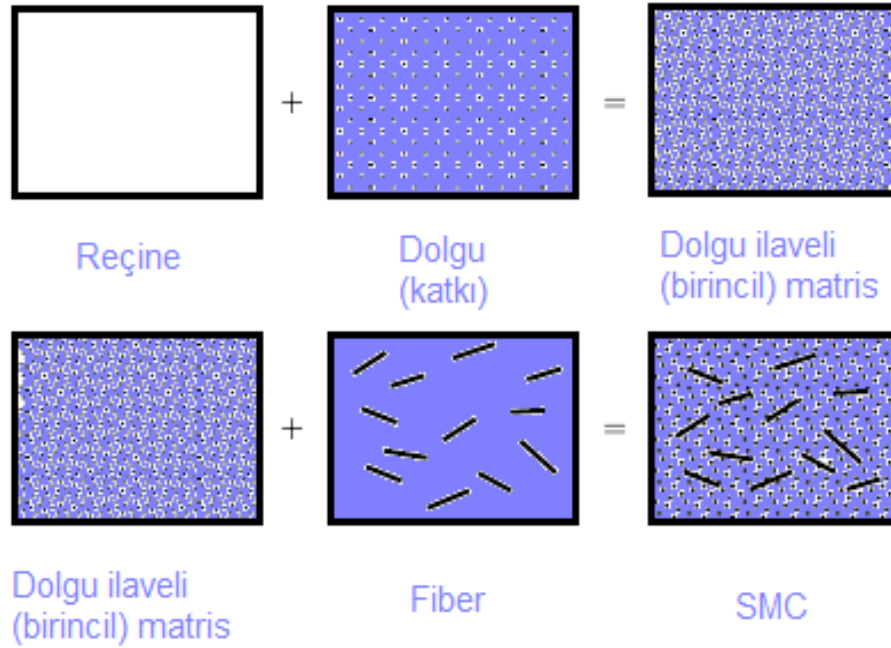
- Kalsiyum karbonat ( ağırlıkça %36,8)
- Kırılmış cam elyaf ( ağırlıkça %30)
- Doymamış polyester reçine ( ağırlıkça % 18,4 )
- Low-shrink additive ( ağırlıkça %1,3 )
- Boyalı hamur/ yapıştırıcı (pigmented paste ) ( ağırlıkça % 1,2)
- Serbest ajan ( ağırlıkça % 1,2)
- Magnezyum oksit hamuru ( ağırlıkça %1,1)
- Organik peroksit ( ağırlıkça % 0,4 )
- İnhibitör ( ağırlıkça %0,1 )

Matris sistemi, bileşim karıştırıcısı ve içine katkıların gömüldüğü malzeme olarak, SMC içinde önemli bir rol oynar. Büzülmenin azalması için, SMC prepregin kürlenmesi esnasında, kalsiyum karbonat gibi katkıları akış kapasitesini arttırmak ve fiberlerin kalıp içine üniform olarak taşınmasını sağlamak için ilave edilmelidirler.

Birden çok bileşene sahip malzemeler için güvenilir ve genel bir ölçülendirme yapmak zordur. Birbirini izleyen hipotezlerde bazı yazarlar, katlı modellere ve malzeme bileşenlerine istinaden SMC kompozitlerin elastiklik özelliklerini açıklamaya çalışmışlardır. Her bir bileşenin termo elastik özelliklerinin ve bileşenin hacimce konsantrasyonunun belirlenmesi, modellerin kompozit malzeme davranışlarının belirlenmesi için gereklidir. (Teodorescu vd., 2007)

#### 3.2 SMC Malzemesinin Boylamasına (Uzunlamasına) Yönlü Çekme Davranış Modeli

SMC malzemeler 3 temel bileşen olan reçine, katkı ve fiberden oluşan bir sistem olarak kabul edilirler. Ayrıca, reçine ve katkı sistemi, kendi arasında ayrı bir faz olarak dolgu ilaveli “substitute (birincil)” matris olarak değerlendirilip böylece SMC malzemesini iki fazlı bir sistem olarak kabul edebiliriz. ( Şekil 3.1 ) (Teodorescu vd., 2007)



Şekil 3.1 SMC malzemesinin bileşenlerinin şematik gösterimi

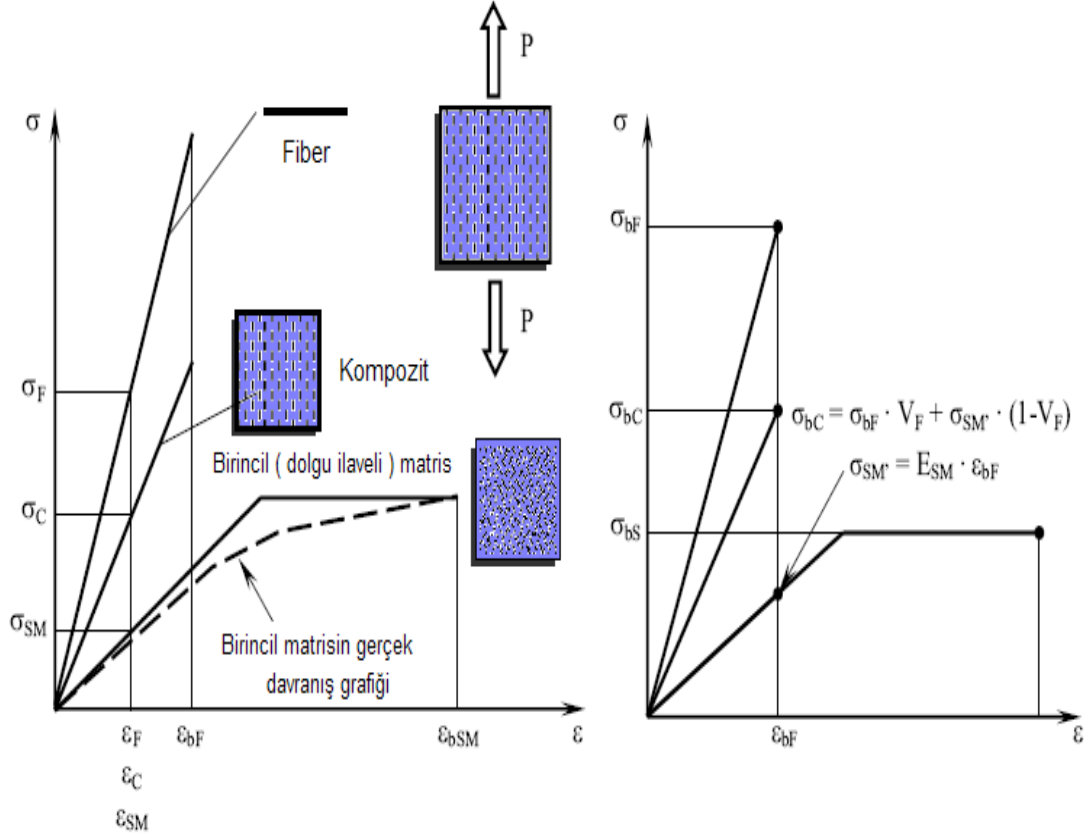
Bu birincil matris, sanal hacim kesrini sunar. Kesirde reçine için  $V'_r$ , dolgu için ise  $V'_f$  kullanılır. Bu sanal hacim kesri gerçek hacim kesri olan  $V_r$  ve  $V_f$  ile ilişkilidir. Bu ilişki:

$$V'_r = V_r / (V_r + V_f) ; V'_f = V_f / (V_r + V_f) \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

buradan  $V'_r + V'_f = 1$  elde edilir. (Teodorescu vd., 2007)

SMC'nin üretim süreci boyunca gelişmiş özellikler kazanması için, üretim hat hızı ve fiberlerin düzlem üzerindeki oryantasyonu arasında bir bağ vardır. Böylece malzeme içindeki fiber oryantasyonunun, SMC üretim hattına paralel olduğu kabul edilir.

Boylamasına yapılan çekme yüklemesinde, SMC gerinimi, dolgu ilaveli birincil matrisin gerinimi ile fiberin gerinimi arasındadır. (Teodorescu vd., 2007)



Şekil 3.2 Boylamasına yapılan çekme yüklemesindeki SMC gerinimi

Fiber ve dolgu ilaveli ( birincil ) matrisin lineer elastik davranış gösterdiğini kabul edersek, ilgili boylamasına gerilim ;

$$\sigma_F = E_F \cdot \epsilon_F = E_F \cdot \epsilon_C, \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\sigma_{SM} = E_{SM} \cdot \epsilon_{SM} = E_{SM} \cdot \epsilon_C \dots\dots\dots(3.3)$$

ile gösterilir.

Tüm kompozite uygulanan çekme kuvveti, fiber ve dolgu ilaveli ( birincil )(SM) matris üzerinden hesaplanır:

$$P = P_F + P_{SM} \dots\dots\dots(3.4)$$

Ya da ;

$$\sigma_C \cdot A_C = \sigma_F \cdot A_F + \sigma_{SM} \cdot A_{SM},$$

$$\sigma_C = \sigma_F \cdot A_F / A_C + \sigma_{SM} \cdot A_{SM} / A_C, \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

$\sigma_C$ 'nin kompozite orta derecede çekme gerilimi uyguladığı yerde;  $A_F$ , fiberlerin enine net yüzey alanını,  $A_{SM}$  ise birincil matrisin enine net yüzey alanını gösterir ve;

$A_C = A_F + A_{SM}$  olarak ifade edilir.

$A_F / A_C = V_f$  fiberlerin hacim oranını,

$A_{SM} / A_C = V_{SM} = 1 - V_f$  birincil matrisin hacim oranını verir.

5. eşitlikte yerine koyarsak ;

$$\sigma_C = \sigma_F \cdot V_f + \sigma_{SM} \cdot (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

ortaya çıkar.

3.2. ve 3.3. eşitliği 3.6. eşitlikte yerine koyarsak, kompozit için boylamasına elastiklik modülünü elde ederiz.

$$E_C = E_F \cdot V_f + E_{SM} \cdot (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

3.7. eşitlik bize gösterir ki; kompozitin boylamasına elastik modülünün değeri fiberler ve birincil matrisin boylamasına elastiklik modülü değeri arasında yer alır.

Genelde; fiberlerin kırılma gerinimi, matrisin kırılma geriniminden daha düşüktür. Böylece tüm fiberlerin aynı dayanımı göstereceği farz edilirse, fiberlerin kırılma yüklemesinin kompozitinki ile aynı olması beklenir.

3.6. eşitliğe göre; SMC malzemenin boylamasına ( uzunlamasına) çekme yüklemesi sırasındaki kırılma dayancı;

$$\sigma_{bC} = \sigma_{bF} \cdot V_f + \sigma_{SM'} \cdot (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots(3.8)$$



$\sigma_{bF}$  ( fiberlerin kırılma dayancı ) ve  $\sigma_{SM}$ , birincil matrisin gerilimini gösterdiği anda, onların gerinimi fiberlerin kırılma gerinimini uzatır. ( $\epsilon_{SM} = \epsilon_{bF}$ )

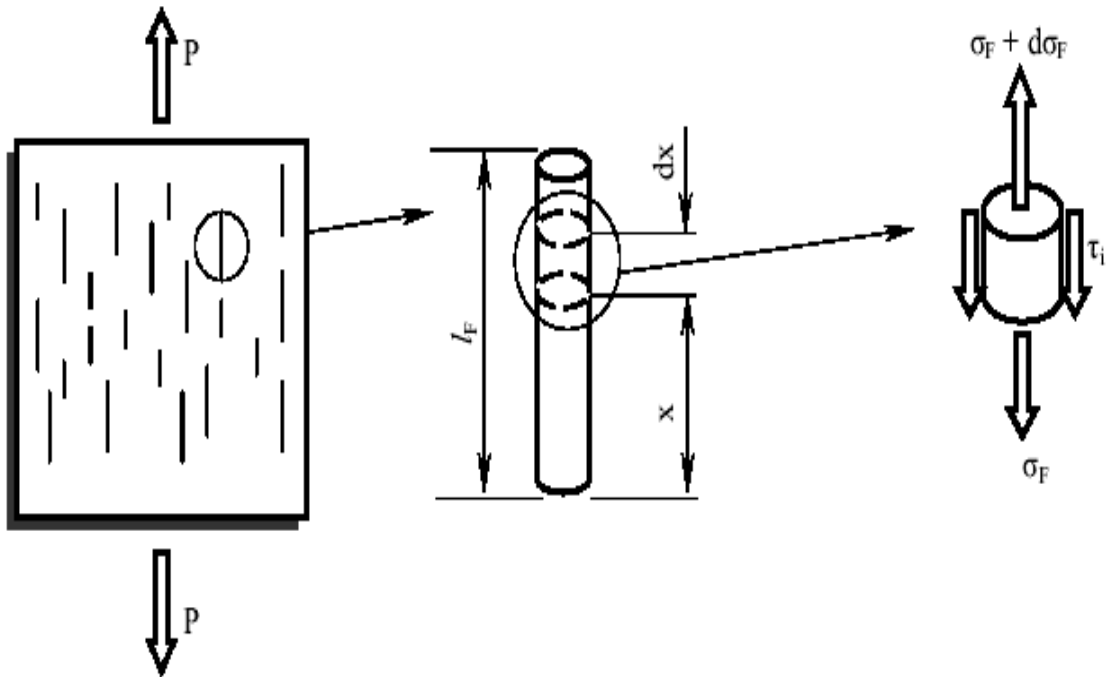
Birincil matrisin gerinme- gerilim davranışının lineer olduğunu farz edersek 8. eşitlik;

$$\sigma_{bC} = \sigma_{bF} \cdot V_f + E_{SM} \cdot \epsilon_{bF} (1 - V_f) \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

SMC gibi heterojen malzemelerin birincil matrisinin uzunlamasına elastiklik modülünün tahmini, özellikleri iyi tanımlanmış, isotropik bileşenlerin temel elastiklik özelliklerine, her bir bileşenin hacim oranına ve bu malzemelerin karıştırılmasına bağlıdır.

Eğer  $E_r$ 'yi reçinenin temel elastiklik özelliği ve  $E_f$ 'i ise dolgunun ( katkıının ) temel elastiklik özelliği olarak tanımlar.  $V_r$ 'ye reçinenin hacim oranı,  $V_f$  ise dolgunun ( katkıının ) hacim oranı olarak kabul edilirse; Dolgu ilaveli ( birincil ) matrisin elastiklik modülünün hesaplanması, isotropik bileşenlerin temel elastiklik özelliklerinin yardımıyla hesaplanır;

$$E_{SM} = 2 / [(1/ (E_r \cdot V_r)) \cdot ( 1/ (E_f \cdot V_f)) ] \quad \dots\dots\dots(3.10)$$



Şekil 3.3 Süreksiz fiberlerin gerilim dağılımının hesaplanmasının teorik olarak şekillendirilmesi.

Süreksiz fiberlerin normal gerilim dağılımı, tek fiberden  $x$  kadar uzak sonsuz küçük bölümlere ayrılır ve buna  $dx$  denilirse ( Şekil 3.3 ) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$(\pi/4 \cdot d_F^2) \cdot (\sigma_F + d \sigma_F) - (\pi/4 \cdot d_F^2 \cdot \sigma_F) - \pi \cdot d_F \cdot dx \cdot \tau_i = 0 \dots\dots\dots(3.11)$$

ya da

$$d \sigma_F / dx = 4 \tau_i / d_F, \dots\dots\dots(3.12)$$

Burada  $\sigma_F$  bir uçtan  $x$  uzaklığındaki fibert boyuna gerilimi,  $d_F$  fiber çapı ve  $\tau_i$  fiber birincil ( dolgu ilaveli ) matrisin yüzeyindeki kayma gerilimidir.

$\tau_i$  nin sabit olduğunu varsayarak  $x=0$  uzaklığında  $\sigma_F = 0$  ve 3.12 numaralı eşitliğin integrasyonu ile ;

$$\sigma_F = \frac{4}{d_F} \int_0^x \tau_i \cdot dx = \frac{4\tau_i}{d_F} \cdot x \dots\dots\dots(3.13)$$

Maksimum fiber gerilimi her iki fiberin sonundan  $x= l_T / 2$  uzaklıkta erişilebilir.  $l_T$  yük transfer uzunluğu olmakta ve maksimum fiber geriliminin bulunduğu minimum fiber uzunluğunu belirtir.

$$\sigma_{\max F} = 2\tau_i \frac{l_T}{d_F} \dots\dots\dots(3.14)$$

Bu eşitlikten de belirli bir  $d_F$  ve  $\tau_i$  için kritik fiber uzunluğunu hesaplayabiliriz.

$$l_{\text{Critical}} = \frac{\sigma_{bF}}{2\tau_i} \cdot d_F \dots\dots\dots(3.15)$$

Boylamasına çekme yüklemesine tabi tutulmuş süreksiz hemen hemen paralel fiberlerle güçlendirilmiş bir SMC malzemesi özellikle fiberler ve matris arasında kayma mekanizması olduğu takdirde çekme yükü fiberler transfer olur.

Birincil ( dolgu ilaveli ) matris boyuna gerinim ile fiber gerinimi arasındaki farka bağlı olarak fiber-birincil matris arasında kayma gerilimi oluşur. Normal gerilim dağılımlarını, fiber sonuna yakın (  $x < l_T / 2$  ) hesaba katarak fiberdeki ortalama gerilim şöyle hesaplanabilir; (Teodorescu vd., 2007)

$$\underline{\sigma}_F = \frac{1}{l_F} \cdot \int_0^{l_F} \sigma_F \cdot dx \dots\dots\dots(3.16)$$

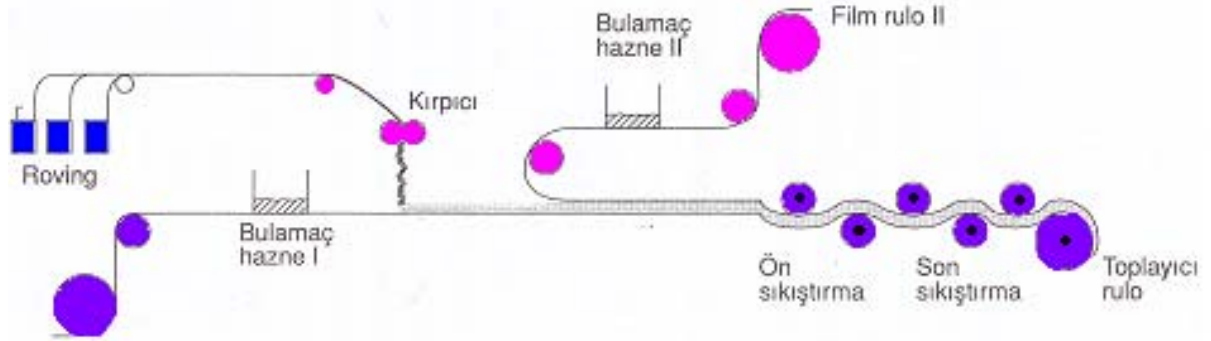
ve ya

$$\underline{\sigma}_F = \sigma_{\max F} \left( 1 - \frac{l_T}{l_F} \right) \dots\dots\dots(3.17)$$

Fiber uzunluğunun kritik uzunluktan büyük olduğunda (  $l_F > l_{\text{krit}}$  ),  $\sigma_{\max F} = \sigma_{bF}$  ve  $l_T = l_{\text{krit}}$  yerine geçer. Bir SMC malzemesinin boyuna kırılma dayancı şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_{bC} = \underline{\sigma}_{bF} \cdot V_F + \sigma_{SM} \cdot (1 - V_F) = \sigma_{bC} \cdot \left( 1 - \frac{l_{\text{krit}}}{2l_F} \right) \cdot V_F + \sigma_{SM} \cdot (1 - V_F) \dots\dots\dots(3.18)$$

### 3.3. SMC Üretim Teçhizatı



Şekil 3.4 SMC makinesinin şematik gösterimi (Başbudak vd., 2003)

#### 3.3.1 SMC Aleti Yapısı:

SMC makinesi şekil 3.4'te görüldüğü gibi 9 bölümden oluşur. Bu bölümler:

1. Polietilen Film
2. Bulamaç Hazneleri
3. Roving Kırıcısı
4. Polietilen Film 2
5. Bulamaç Haznesi 2
6. Emdirme Alanı
7. Son Sıkıştırma
8. Rulo
9. Tartım

Üretilen SMC nin mekanik özellikleri üretim esnasında elde edilen elyaf strüktürüne de bağlıdır. (Başbudak vd., 2003)

#### 3.4 SMC Üretim Aşamaları

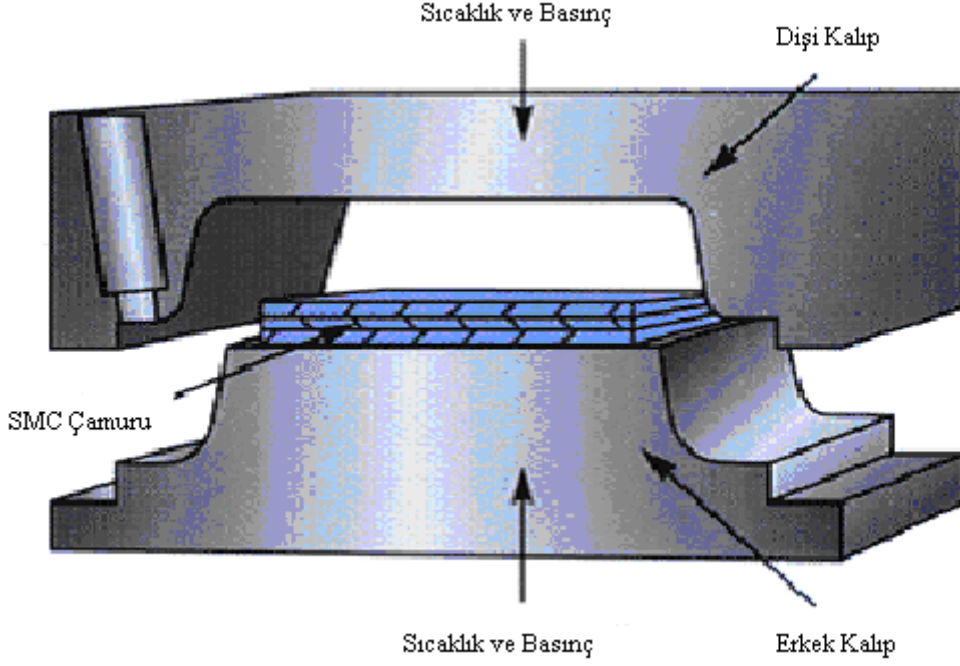
Polyester Kalıplama Bileşimi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemlerin (SMC, BMC), diğer kalıplama işlemlerinden üstünlüğü 2 ana özelliğinden kaynaklanmaktadır.

1. Polisterin stirenle polimerizasyonunun bir poliadisyon olması nedeniyle bütün komponentlerin yüzde yüz reaksiyona girmesi, böylece diğer kalıplama yöntemlerinde oluşan yan ürünler SMC yönteminde ortaya çıkmazlar. Bunun da 2 önemli sonucu vardır:
  - a. Presleme esnasında havalandırma adımına ihtiyaç yoktur,
  - b. Polyesterin çekmesi diğerlerine oranla daha düşük oranda olduğu için büyük sorun yaratan çekme problemi ortadan kalmış olur.
2. Cam elyaf takviyesinin getirdiği mekanik değerlerdeki üstün performanstır. Bu sayede SMC çok büyük parçaların üretimi için de bir alternatif yaratmış ve sac yerine kullanılmaya başlanmıştır. (Başbudak vd., 2003)

Bu üretim yönteminde iki ana hazırlama şekli yaygın durumdadır. BMC ( Bulk Moulding Compound ) diye tanımlanan birinci şekilde cam elyaf kırpıntı, reçine ve diğer katkıları ile birlikte bir yoğurucuda yoğrularak homojen bir karışım haline getirilir. Daha ziyade pişmaniye görünümünde olan bu malzemeye BMC yanında DMC ( Dough Moulding Compound ) da denilmektedir. Ülkemizde BMC yanında “hamur” adıyla da anılmaktadır.

SMC ( Sheet Moulding Compound ) adıyla tanınan ikinci şekilde ise cam elyaf kırpıntısı polyester bulamaçla birlikte iki film arasında sıkıştırılarak oluşmuş bir plaka görünümündedir. Üretim sonunda sarılmış rulolar halinde preslemeye giden SMC iki taraftaki film çıkarıldıktan sonra kalıplanabilir. SMC, BMC den daha sonra devreye girmesine karşın çok daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. SMC için bazı yerlerde hala prepreg tabirine rastlanırsa da SMC artık her yerde kabul görmüş durumdadır. Ülkemizde de SMC ve pestil tabirleri üreticilerin kullandığı tanımlamalardır. 1950’li yıllarda polyester reçinelerinin toprak alkali metallerinin oksit ve hidroksitleriyle viskozite aldıkları yani kıvamlaştırdıkları tespit edildi. Kıvamlaşmanın getirdiği avantaj reçine, takviye ve diğer katılardan oluşan bu karışımın zamanla yeni bir malzemeye dönüşmesidir. Kıvamlaşma sayesinde cam elyafı kolayca ıslatabilen düşük viskozitedeki karışımın durdukça preslemede çok iyi sonuç verecek kadar yüksek bir viskoziteyi alır. SMC gelişmesinde bir kilometre taşı da 1960’lı yıllarda polietilen tozunun katılmasıyla çekmenin çok düşürülmesidir. Bu sayede düzgün yüzey ve ölçü stabilitesi sağlanmış ve malzeme büyük bir hızla dağıtım panoları ve aydınlatma armatürlerinde kullanılmaya başlanmıştır. O zamana kadar camelyaf keçe iki film arasında

emdirilirken sisteme kırpıcı ilavesiyle doğrudan kırılma dönemi başlamıştır. (Başbudak vd., 2003)



Şekil 3.5 SMC işleminin şematik gösterimi

Nihayet 1970'li yıllarda SMC de stirende çözülmüş bazı termoplastiklerin ilavesiyle çekme probleminin tamamen kontrol altına alınması devri başladı. Bu şekilde sıfır çekmeli hatta pozitif çekmeli parça üretimi mümkün olmuştur. Bu parçalar o kadar düzgün yüzey göstermişlerdir ki otomotiv sanayinde görünen parçalar olarak kullanılması hiç problem yaratmamıştır. SMC'nin müthiş gelişmesi asıl bundan sonra olmuştur. Önceleri yüzey boyamada bazı sorunlar yaşanmışsa da son dönemde geliştirilen tekniklerle bunlar da çözülmüş durumdadır. Böylece SMC otomotiv sanayinin en gözde malzemeleri arasına girmiştir. (Başbudak vd., 2003)

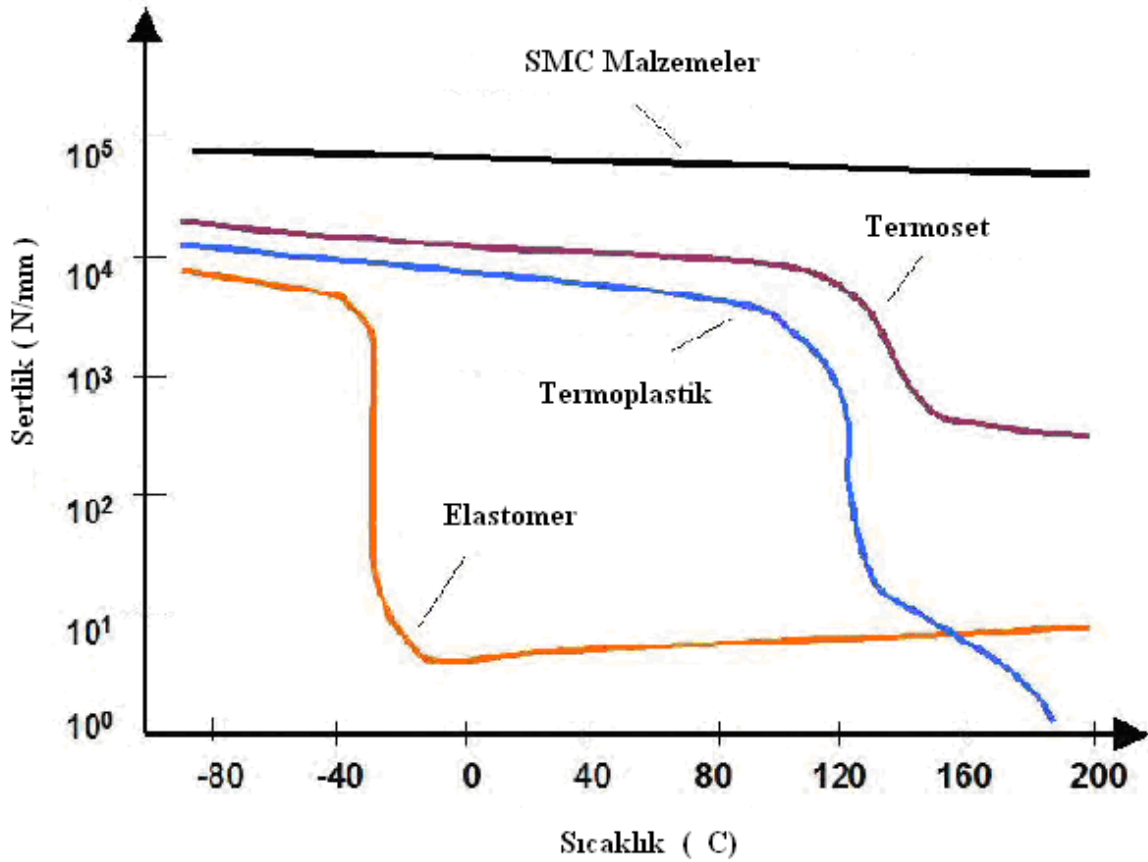
### 3.5 SMC Pestil Yapısı

SMC oldukça kompleks bir yapıya sahiptir. İçinde polyester reçine, camelyaf, dolgu malzemeleri, sertleştiriciler, inhibitörler, kaydırıcılar, ayırıcılar, pigment pasta, kıvamlaşma reaktifi düşük profil ve diğer katkıları bulunur. Bu komponentlerden her birinin cinsi ve oranı SMC yapısında etkili olduğundan sayısız varyasyon imkânı oluşmaktadır. Bu geniş değişim paketi SMC'nin kullanıldığı yerde istenilen özelliklere göre formüle edilme olanağı verir.

Aşağıda bir standart SMC örneği verilmektedir. Burada verilen oranların her birisi ihtiyaca göre değiştirilerek her yerde deva olacak özellikler sağlanmaktadır. Bu çeşitlilik SMC'nin bu kadar hızlı gelişmesinin en belirgin nedenidir. (Başbudak vd., 2003)

SMC Örneği;

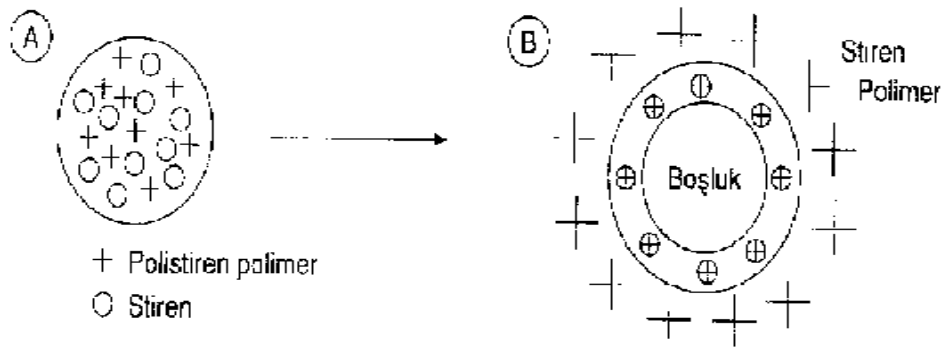
1. Polyester reçine ..... 100
2. Stiren monomer ..... 10
3. Dondurucu ..... 1
4. İnhibitör ..... değişik
5. Boya ..... değişik
6. Dolgu Maddesi ..... 80-210
7. Kalıp Ayırıcı ..... 5
8. Kaydırıcı ..... 10
9. Kıvamlaştırıcı ..... 1,5



Şekil 3.6 SMS kompozit ile diğer plastik malzemelerinin karşılaştırılması

### 3.5.1 Polyester Reçineleri

Polyester reçineleri alt grup olarak ortoftalik, izoftalik, tereftalik, bisfenolik ve vinilester gruplarına ayrılabilir. Bütün bu reçinelerin müşterek özellikleri yüksek reaktiviteye ve toprakalkali metaloksitleriyle kıvamlaşma yeteneğine sahip olmalarıdır. SMC üretiminde en önemli konu yarı mamulün ön görülen kıvamlaşma çizgisini yakalamasıdır. Bütün reaktif polyester reçinelerinde olduğu gibi bu reçinelerde de sertleşme sırasında hacimsel küçülme yani çekme söz konusudur. Çekmenin getirdiği yüzey bozuklukları, ölçülerde değişim ve kılcal çatlak tehlikesi burada da bir sorun oluşturmaktadır. Her ne kadar dolgu ilavesi çekmeyi makul ölçülere getirse de mükemmel parçalar elde etmek için tamamen kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu problemler low shrink LS, ve low profile LP reçinelerin ortaya çıkmasıyla bir çözüme kavuşmuş olur. Stiren içinde çözölen bazı termoplastikler reçineye ilave edilince çekme değerlerini istenilen orana düşürme imkânı yaratıldı. LS ve LP sistemlerde çekme sıfıra kadar hatta pozitif kadar gidebilmektedir. Bu sayede, çok parlak, ölçüleri tam ve hatasız parçalar elde edilme imkânı oluşur. SMC'nin gelişmesinde bu kadar etkili olmuş olan düşük profil etkisi hakkında birçok araştırma yapılmış ve değişik teoriler geliştirilmiştir. Bunların içinde en yaygın olanına göre polyesterle bağdaşmayan termoplastik, karışım içinde mini damlacıklar halinde homojen dağılmış durumdadır. Bu damlacıkların içindeki stiren sertleşme sürecinde dışarı çıkıp polyesterle poliadisyona girmektedir. Geriye kalan boş damla ise ısı ile şişerek genişlemekte ve daha büyük bir hacim kaplamaktadır. Bu teori bu nedenle patlamış mısır teorisi adını almıştır. (Başbudak vd., 2003)



Şekil 3.7 Düşük profil mekanizması(37)

SMC Kompozitler düşük profil özelliklerine göre 3 ana grupta sınıflandırılırlar. Standart SMC'lerde mekanik, termik, elektriksel ve kimyasal direnç, yüzeyden çok daha önemlidir. Katkı olarak sadece polietilen kullanılan standart reçinelerin boya dağılımıyla ilgili bir problemleri yoktur.

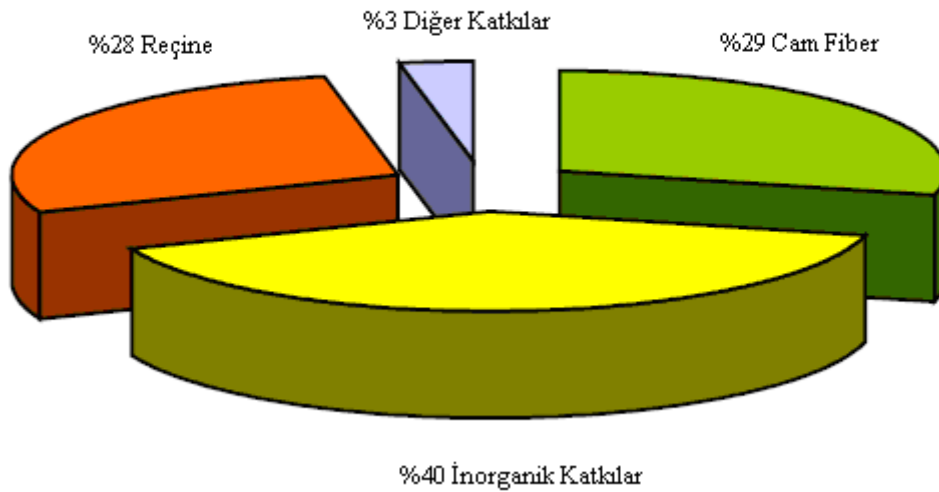


LS reçinelerin çekme değerleri hayli düşüktür ama Class A değerlerine ulaşamazlar. Buna karşılık rahatça her pigmentle boyanırlar. Homojenitede çıkabilecek bazı sorunlar ise özel katkılarla kolayca çözülebilir. Çekmenin düşüklüğü sayesinde standart reçinelere göre daha parlak yüzey verirler.

LP sistemlerde çekme hiç yoktur, hatta parça kalıptan biraz daha büyük bile olabilir. Tek büyük mahsuru bu parçaların renkli yapılamamasıdır. Bu nedenle ya renksiz kullanılacak veya sonradan boyanacak parçalarda devreye girebilir.

Düşük profil reçinelerinde reaktivitenin çok yüksek olması gerekir. Reaktiviteyi belirleyen maleik/ftalik oranı bu reçinelerde hayli büyüktür. Bu oran bazen sonsuza kadar gider yani sadece maleik içeren ve hiç doymuş asidi olmayan tipler çoğunluktadır. (Başbudak vd., 2003)

### Tipik SMC Bileşimi



Şekil 3.8 SMC kompozit bileşiminin grafik gösterimi (Design For Success, 2009)

Çizelge 3.1 Çekme değerlerine göre SMC tipleri

SMC TİPİ	KATKI	ÇEKME %
Standart SMC	Polietilen toz	0,15-0,3
Low Shrink LS- SMC	Stiren içinde çözülmüş Polistiren ve Polikaprolaktam	0,06-0,14
Low Profile LP-SMC	Stirende çözülmüş PMMA, PVAc; Polyester, Lastik	0,04- (+) 0,04

### 3.5.2 Stiren Monomer

SMC bulamacına mutlaka bir miktar stiren ilave edilir zira çalışma sırasında stiren kaybı olabileceği gibi stiren reçinenin viskozitesini düşürerek cam elyafın daha iyi ıslanmasını da sağlar. (Başbudak vd., 2003)

### 3.5.3 Sertleştiriciler- Peroksitler

Sertleştirici olarak genelde peroksitler ilave edilir. Peroksitlerden başka katalistler varsa da pek fazla önem kazanmamışlardır. Peroksitler yüksek ısıda parçalanarak serbest radikaller oluştururlar. Bu radikaller de sertleşme reaksiyonunun başlayıp yürümesini sağlarlar. Peroksitlerin cinsi ve oranı çok titizlik gerektirir. Bir yandan reaksiyonun hızlı ve eksiksiz olması istenir. Bunun için daha reaktif ve yüksek oranda peroksit iyi olur. Ama o zaman da malzeme kalıbı tamamen dolduramadan donar ve çatlaklar oluşur. Bu nedenle, peroksit cins ve oranları ayarlarken parça ve kalıp faktörlerini dikkate almak gerekir. Yüksek ısıda çalışan bütün peroksitler kullanılabilir. Her birinin özelliklerini bilerek seçim yapılır. Genellikle birden fazla peroksit bir arada kullanılarak istenilen sertleşme eğrisi sağlanır. (Başbudak vd., 2003)

### 3.5.4 İnhibitörler- Geciktiriciler

İnhibitörler sistem içinde kendiliğinden oluşan serbest radikalleri yakalayarak sertleşmenin istenilenden önce oluşmasına mani olurlar. Böyle inhibitör ilavesinin iki nedeni ortaya çıkar. Öncelikli görevleri SMC'nin depolama ömrünü uzatmaktadır. İkinci fonksiyonu da pişme süresini uzatarak malzemenin kalıpta yürümesini optimize etmektir SMC'de oksijensiz ortamda çalışıldığı için inhibitör olarak p-benzokinon türevleri görev yapmaktadır.

### 3.5.5 Dolgu Maddeleri

Dolgu maddelerinin kullanılma nedenleri en önemli sebebi sistemi ucuzlatmaktır. Bunun yanında oluşan reaksiyon enerjisini absorbe etmek, çekmeyi azaltmak ve bazen da yüzeyi düzeltmek gibi fonksiyonlar da üstlenirler. En çok kullanılan dolgu maddeleri sıralaması şöyledir:

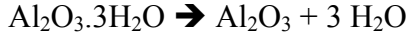
- Kalsiyum karbonat

- Alüminyumtrihidrat
- Kaolen

Kalsiyum karbonat en çok kullanılan dolgu maddesidir. Değişik tanecik büyüklüklerinde kullanıma alınır ve düşük yağ absorpsiyonu nedeniyle de %50-60 gibi yüksek oranlarda karıştırılır. Dikkat edilecek konu dolgunun kimyasal olarak inert olması ve sistemi etkileyecek iyonları içermemesidir. (Başbudak vd., 2003)

Alüminyumtrihidrat kullanımı giderek artmaktadır zira SMC'ye yeterli yanmazlık vermede son derece başarılıdır. Alüminyumtrihidrat ısıyla karşılaştığında bünyesinde bağlı olan kristal suyu buhar halinde ortama salar. Bu buhar parçanın üstünü kaplayarak onun alevle bağlantısını keser.

Böylece yanma işlemi durur ve parça kendi kendine sönmüş olur.



Buharlaşan su aynı zamanda parçanın soğumasını da sağlayarak sönmeye işlemini hızlandırır. Diğer yanmazlık veren maddelere en büyük üstünlüğü bünyesinde halojenler gibi zehirli maddeler bulundurmamasıdır. Son dönemlerde halojenli maddelerin sebep olduğu zehirlenme ve ölüm olayları alüminyumtrihidratın önemini daha da arttırmıştır. Özellikle raylı sistemlerde kullanılması zorunluluk haline gelmiştir.

Kaolen kullanımı çok yaygın olmamakla birlikte kimyasallara dayanıklılığı nedeniyle belli bir tüketime ulaşmış durumdadır. Ayrıca mercimek şeklindeki yapısı nedeniyle yüzey düzeltmede de faydası olmaktadır.

### 3.5.6 Kaydırıcılar

Standart SMC'lerde kaydırıcı olarak ince öğütülmüş polietilen toz kullanılır. SMC'nin yürüme özelliğini düzeltmesinin yanında çekme değerini de düşürerek yüzeyin parlak çıkmasına neden olur. Polietilen toz ilavesinin çatlaklara da mani olduğu görülmüştür.

### 3.5.7 Kalıp Ayırıcılar

SMC'lerde pişmiş parçanın kalıptan kolayca çıkmasını içine konulmuş olan kalıp ayırıcılar sağlar. En çok kullanılan kalıp ayırıcılar çinko ve kalsiyum stearattır. Ayırıcılar şu şekilde

çalışırlar. Polyester sertleşmesi sırasında içindeki stearatı dışarı atar. Yüzeyde toplanan stearat kalıpla parça arasında bir film teşkil ederek kalıptan ayrılmayı sağlar. (Başbudak vd., 2003)

### 3.5.8 Kıvamlaştırıcılar

SMC bünyesindeki polyester reçinesi magnezyum ve kalsiyumun oksit ve hidroksitleriyle reaksiyona girerek viskozite alımıyla başlar. Kıvamlaşmanın mekanizması tam olarak çözülmemiş olmasına karşın magnezyum ve kalsiyum iyonlarının sistemdeki karboksil gruplarıyla bir nevi tuz teşkil etmesi görüşü hakimdir. Bu görüşün bir oranda geçerli olduğu düşünülse de neden daha reaktif reçinelerin daha iyi kıvamlaştığını açıklayamaz. Buna karşılık simse su katmanın kıvamlaşmayı etkilemesi de iyon teorisini tasdik eder mahiyettedir. Kıvamlaşma süresi birkaç gün ile birkaç hafta arasında değişebilir. Bu süre formülasyona olduğu kadar ortam sıcaklığına da bağlıdır. Optimal presleme viskoziteleri  $10 \cdot 10^6$  ile  $80 \cdot 10^6$  MPa.s. arasında değişir. Doğru kıvamlanmış bir SMC dokunulduğunda ele yapışmaz ve oldukça sert bir görüntü verir. Kıvamlaşmasını optimal tamamlanmış bir SMC preslemede en güzel sonucu verir. (Başbudak vd., 2003)

### 3.5.9 Diğer Katkılar

Yüzey sertliğini arttırmak için SMC'ye cam kürecikler ilave edilir. Sertleşme esnasında bu cam kürecikler yüzeye çıkarak yüzeyin cam gibi sert olmasını sağlarlar. Eğer SMC'nin yoğunluğunu azaltılmak istenirse bu defa içine boş cam kürecikler katılır.

### 3.5.10 Pigment Pastalar

SMC'leri renkli elde edebilmenin yolu içine pigment pasta katmaktır. Pigment olarak organik ve inorganik pigmentler kullanılır. Bu pigmentlerde dikkat edilecek konu yüksek ısıdan ve peroksitlerden etkilenmemeleridir. Bundan başka sertleşme reaksiyonunu etkilememeleri de güvence altına alınmalıdır. Bazı pigmentlerin SMC'nin depolama ömrünü bir hayli kısaltabileceği olasılığını da göz ardı etmemek gerekir.

Bu pigmentler doğrudan katılabilirse de bir bağlayıcıda önceden ezilmiş olmaları tercih edilir zira bu şekilde daha homojen dağılıp daha parlak renkler oluşturabilirler. Bağlayıcı olarak düşük viskoziteli, monomer içermeyen polyester reçinesi kullanılır. Ezme işlemi çoklu vals

veya pearlmill marifetiyle olabilir. Pigmentlerin pastada ve daha sonra SMC'de dağılmalarını kolaylaştırmak için birçok özel ıslatıcı geliştirilmiştir.

### **3.5.11 Islatıcılar**

SMC bünyesindeki komponentler irdelendiğinde kimyasal açıdan bunların bir arada olmasının çok zor olduğu ve ilk fırsatta ayrışmaya gitmeye çalışacakları görölr. Olası bir ayrışmada da malzemede farklı bölgeler oluşur ki presleme sırasında matlıklar, renk ayrışımları, dalgalanmalar ve zayıf noktalar olarak kendini gösterir. (Başbudak vd., 2003)

Bu sorunların çözümlü için aynı molekül bünyesinde hidrofil ve hidrofob merkezleri olan tansiyoaktif malzemeler geliştirilmiştir. Bunlar sistemdeki polar ve apolar komponentleri bir arada tutabilirler, aracı görevi üstlenirler. Sağladıkları etki açısından bunlar üç grupta toplanabilirler:

1. Viskozite düşürücüler
2. Islatıcılar
3. Stabilizatörler

### 3.6 SMC Kullanım Alanları

SMC hafifliğinin yanında gösterdiği mekanik, kimyasal ve diğer üstün özellikleri nedeniyle de çok aranan bir mühendislik malzemesidir. Mekanik değerler son zamanda geliştirilmiş olan değişik SMC örnekleri ile olağanüstü yüksek değerlere çıkarılmıştır.



Şekil 3.9 SMC yöntemi ile üretilmiş otobüs koltuğu (Design For Success, 2009)



Şekil 3.10 SMC yöntemi ile üretilmiş çöp kutusu ve kamyon parçaları

SMC'nin ilk uygulandığı alanlar elektrik endüstrisinde dağıtım panoları ve aydınlatma armatürleri olmuştur. Son 25 yılda kullanma alanlarında büyük bir genişleme yaşanmaktadır. Bu genişlemenin nedenlerinin başında harika izolasyon kabiliyeti gelmektedir. Bunun yanında

eğme direnci, darbe direnci gibi mekanik değerlerinin de çok yüksek olması elektrik sektöründe SMC'yi vazgeçilmez malzeme durumuna getirmiştir.



Şekil 3.11 SMC yöntemi ile üretilmiş uydu anteni, doğalgaz kutusu ve aydınlatma parçaları

Bir başka kullanım alanı Alman Posta İdaresinin telefon kulübeleri olmuştur. Bu kulübeler uzun seneler dış etkilere açık olarak bozulmadan kullanılmışlar ve malzemenin ne denli dayanıklı olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 3.12 SMC yöntemi ile üretilmiş malzemelere örnekler (Design For Success, 2009)

Kanalizasyon pompası ise SMC'nin kimyasallara dayanıklılığı için güzel bir örnektir. Bu girift parçanın içine bütün metal aksesuar presleme aşamasında yerleştirilmekte ve böylece montaj kolaylığı da sağlanmaktadır.

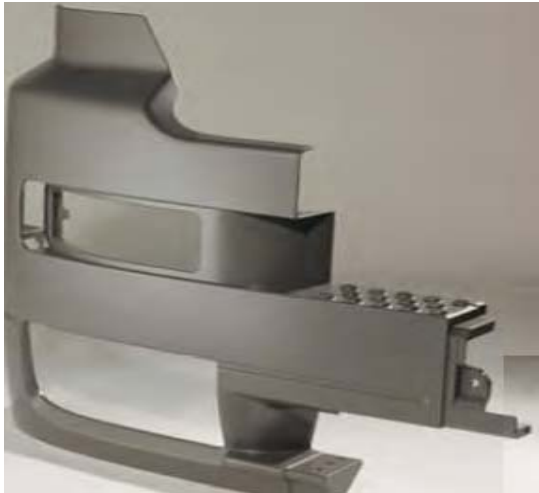


Primed SMC fender



Şekil 3.13 SMC yöntemi ile üretilmiş otomobil parçaları

SMC'nin en rahat kullanıldığı alanların başında ticari vasıta üretimi gelmektedir.



Şekil 3.14 SMC yöntemi ile üretilmiş kamyon parçaları (Design For Success, 2009)

Bu nedenlerle tampon, far yuvaları, klima gövdesi, havalandırma kanalları, kapı içleri ve şoför mahalli ticari vasıtalarda SMC'nin yer aldığı bölümlerdir. Son olarak İVECO Turbostar'ın kamyon şoför mahalli de SMC'den yapılmıştır.





Şekil 3.15 SMC yöntemi ile üretilmiş toplu taşıma araç içi malzemeleri

Sağlık gereçlerinde de kullanılan SMC kompozitlerine örnek olarak dişçi koltuğu da verilebilir. Boyama tekniğinde yapılan gelişmeler ile SMC Porsche 944, Mercedes gibi araçların gövdelerinde de kullanılmaktadır.



Şekil 3.16 SMC yöntemi ile üretilmiş otomobil gövdesi



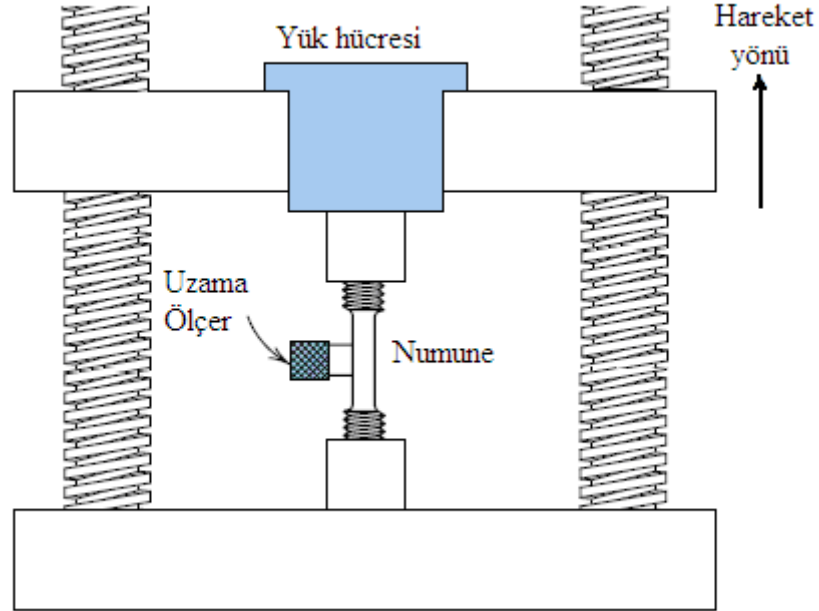
Şekil 3.17.SMC yöntemi ile üretilmiş Mercedes SLK tipi otomobil (Design For Success, 2009)

#### 4. DENEY TEORİSİ

SMC kompozitlerin mekanik özelliklerinin tayini için TS 3779 EN ISO 2818'e uygun hazırlanmış bir deney panelinden işlenerek hazırlanmış deney parçaları kullanılır.

##### 4.1 Plastik Matrisli Kompozitlerin Çekme Deneyi ( TS EN ISO 527-4, ASTM D 638 M)

Çekme deneyi malzemelerin mukavemeti hakkında tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacı ile geniş çapta kullanılır. Çekme deneyi standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek eksende, sabit kabul edilebilecek bir hızla ve sabit sıcaklıkta koparıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan çekme kuvveti uygulandığında, aynı zamanda da numunenin uzaması kaydedilir.

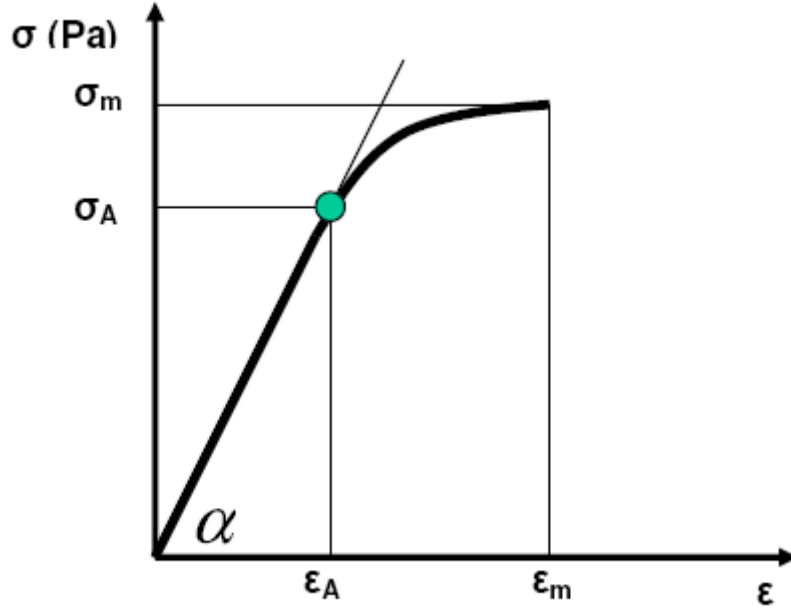


Şekil 4.1. Çekme deneyi düzeneğinin teorik olarak gösterilmesi.

Çekme deneyi malzemelerin aşağıda verilen özelliklerini belirlemeye yarayan bir genel bir testtir. Bu özellikler ;

- Elastiklik modülü  $E$
- Akma mukavemeti  $\sigma_Y$
- Kopma mukavemeti  $\sigma_U$
- Malzemenin sünek ya da kırılğan olması
- Sertlik modülü  $u_t$
- Elastik ve plastik deformasyon aralığı

Kompozit malzemeler için tipik gerilme-gerinim diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Gerilme-gerinim diyagramı

Çekme deneyi TS 1398/ISO 527 standartlarına uygun olarak yapılır. Deney için standartta bulunun tip 2 ya da tip 3 deney parçaları kesilir. Tip 2 (dikdörtgen şeklinde, uç destekleri olmayan) ve Tip 3 (dikdörtgen şeklinde, uçlarda yapıştırılmış destekler mevcut) deney parçaları elyaf takviyeli termoset ve termoplastikler için kullanılır. Yapıştırılmamış uç destekleri ihtiva eden deney parçaları Tip 2 olarak kabul edilir. Tip 2 ve Tip 3 deney parçaları için tercih edilen kalınlık 25 mm'dir. Ancak, kullanılan takviye malzemesinin tipi gereği çekme mukavemeti değeri düşükse, genişlik 50 mm veya daha büyük olabilir. Tip 2 ve Tip 3 deney parçalarının kalınlığı 2 mm ile 10 mm arasında olmalıdır.

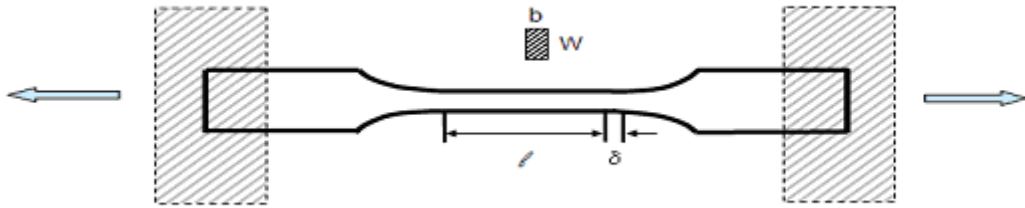
Tip 2 veya Tip 3 deney parçalarını kullanma konusunda karar verebilmek için, önce Tip 2 deney parçaları deneye tâbi tutulur. Deneyi gerçekleştirmek mümkün olmuyorsa veya deney parçasının çeneler arasında kayması veya kopmanın çeneler arasında olması gibi tatminkar bir sonuç alınamıyorsa Tip 3 deney parçası kullanılır.

Çekme deneyi malzemelerin statik yük altındaki mukavemet özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan çok önemli bir mekanik deneydir. Deney sonucu bulunan malzeme özellikleri mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılır.

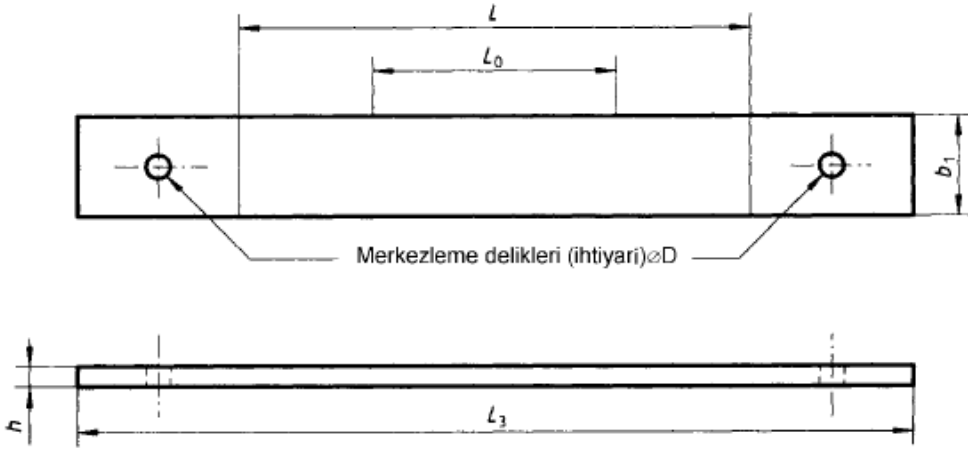


Şekil 4.3 Çekme testi düzeneği

Deney parçası, sabit hızda, uzunlamasına eksenine boyunca kopana kadar veya gerilme (yük) veya zaman (boyut değişimi) değeri önceden belirlenmiş bir değere ulaşana kadar çekilir. Bu işlem sırasında, deney parçasının dayanabildiği yük ve uzama değerleri ölçülür.



Şekil 4.4 Kaşık numunesinin şematik görüntüsü



		Tip 2
$L_3$	Toplam uzunluk	$\geq 250$
$L_2$	Uç destekleri arasındaki mesafe	-
$b_1$	Genişlik	$25 \pm 0,5 - 50 \pm 0,5$
$h$	Kalınlık	2 - 10
$L_0$	Ölçme uzunluğu (Uzama ölçerler için tavsiye edilen)	$50 \pm 1$
$L$	Çeneler arasındaki başlangıç mesafesi	$150 \pm 1$
$L_T$	Uç desteklerinin uzunluğu	-
$h_T$	Uç desteklerinin kalınlığı	-
$D$	Merkezleme deliklerinin çapı	$3 \pm 0,25$

Şekil 4.5 Çekme numunesinin TS EN ISO 527-4 'e göre ölçülendirilmesi (Ölçüler mm'dir)

P:Çekme Kuvveti

$A_0$ :Numunenin Başlangıç Kesit Alanı

$l_0$ :Numunenin Başlangıç Ölçü Boyu

$A_K$ :Numunenin Çekildikten Sonraki Kesit Alanı

$\Delta l$ :Çekilen Numunenin Uzama Miktarı

E:Elastiklik sınırı olmak üzere çekme deneyi sonucunda elastiklik sınırı,akma noktası, maksimum yük noktası ve kopma noktası gibi kavramlar ortaya çıkar.

Elastiklik Sınırı:Yük kaldırıldığında malzemede kalıcı şekil değişikliği görülmezse yani elastik şekil değişiminin olduğu gerilmedir.

Akma Noktası :Malzemede kalıcı şekil değişikliğinin(plastik deformasyonun) artmaya başladığı bölgedeki gerilmedir.

Maksimum Yük Noktası :Malzemenin kopmadan dayanabileceği maksimum gerilmedir.malzeme bu noktadan sonra kopmaya başlar.

Kopma Noktası :Numunenin koptuğu andaki gerilmedir.

Numunelerin çekme mukavemeti'nin  $\sigma_t$  belirlenmesi için EN ISO 527-4 standardından yararlanılmıştır.

Deneyde kullanılan çekme cihazı çekme ve kontrol ünitesi olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu cihaz aynı zamanda eğme ve basma deneylerini de gerçekleştirebilmektedir. Cihaz elle kumanda edilmektedir. Cihaza statik yük olarak 10,20 ve 40 ton bağlanabilmektedir. Numune çenelere bağlandıktan sonra basınç ve çekme hızı ayarları elle yapılmaktadır. Sistemin işlevi hidrolik sistem tarafından yerine getirilir. Deney malzeme kopuncaya kadar devam etmektedir ve malzeme kopunca otomatik olarak durur. Deney esnasında çekme deneyi eğrisi (P-Δl) tambur yardımıyla çizilmektedir. Deney sonunda aşağıdaki formüller yardımıyla, deney sonuçları hesaplanır.

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{b.h}$$

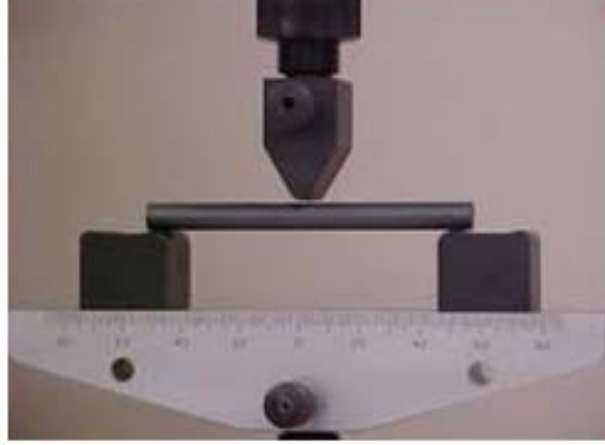
yukarıdaki formül kullanılarak çekme mukavemeti hesaplanır.

II. Tip deney numuneleri, deneyi yapılan malzemeden, boyu hazırlanması amaçlanan deney numunelerinin boyuna, genişliği ise gerekli deney numunelerinin sayısına uygun olacak şekilde bir levha kesilir. Uç kısımlarının yapımı için, öncelikle elastiklik modülü deneyi yapılan malzemeninkinden daha küçük olan malzemeden ve genişliği deney sırasında çeneler arasındaki uzunluk uçlar arasındaki uzunluktan en az 20 mm daha fazla olacak şekilde paralel yüzeyli şeritler kesilir. (Uç parçalarının yapımı için, kalınlığı deneyi yapılan malzeme kalınlığının 2-3 katı olan şeritler de kullanılabilir.)

Cam takviyeli malzemeler genellikle anizotropik özellik gösterirler. Bu nedenle deney numunelerinin ya anizotropinin en az iki temel yönüne veya daha önceden belirlenmiş yönlere (örneğin levhanın boyunca veya enince) uygun olarak kesilmesi istenir.

#### **4.2 Plastik Matrisli Kompozitlerin Eğme Deneyi (TS EN ISO 14125, ASTM D 790)**

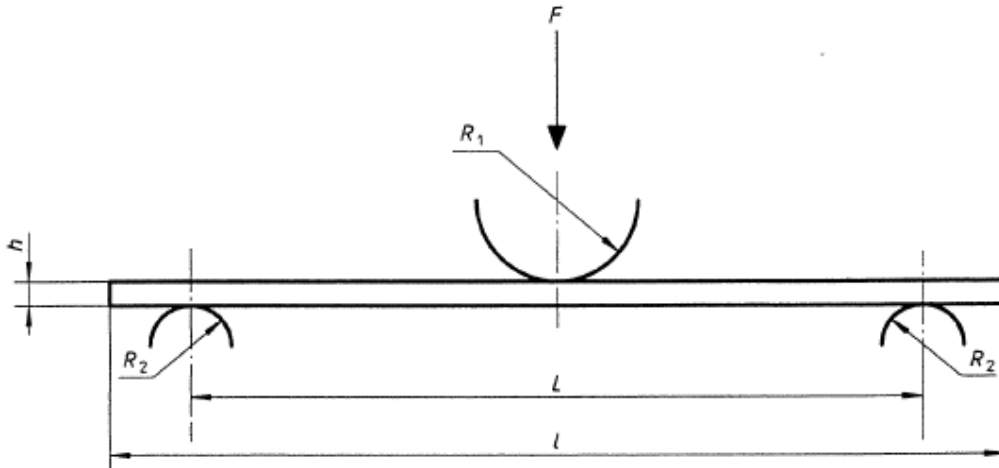
Eğme deneyi malzemelerin özellikle plastik şekil değiştirme kabiliyeti hakkında fikir veren deneylerdir. Eğme deneyinde ise malzemeye ait şekil değişimi kabiliyeti hakkında sağlanan kalitatif bilginin yanı sıra eğme dayanımı (  $\sigma_e$  ) ve elastisite modülü (  $E_e$  ) gibi kantitatif değerlerde bulunur. Bu deneydeki amacımız kullandığımız numunelerin eğme dayanımını bulmaktır. 3 noktalı eğme deneyinin test düzeneği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



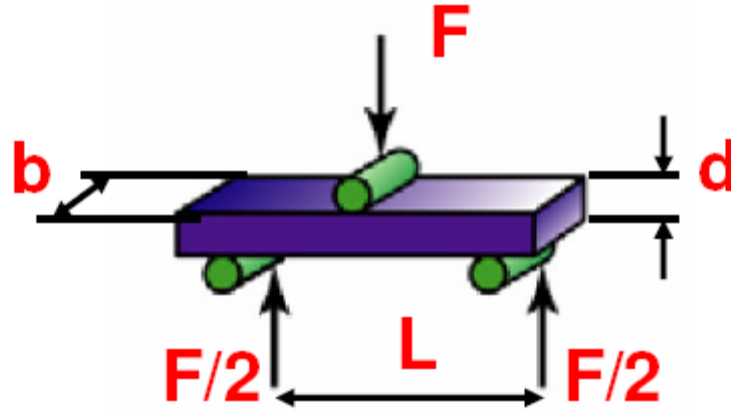
Şekil 4.6 Üç noktadan eğilme testi düzeneği ve çalışma prensibi

Eğme iki desteğe serbest olarak oturtulan daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişikliğidir. Değişik yöntemlerin hepsinde amaç, malzemeyi çatlayıncaya kadar tek yönde eğmektir.

Eğme deneyinde deney yapılacak numuneye bir kuvvet uygulandığında, numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, kesitin geri kalan kısmında çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, iç yüzeye yakın bölgede basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgelerde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Şekil 4.7 ve 4.8’de 3 noktalı eğme deneyi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7 TS EN ISO 14125’e göre 3 noktalı eğme deneyinin şematik gösterimi



Şekil 4.8 Üç noktadan yükleme şeması

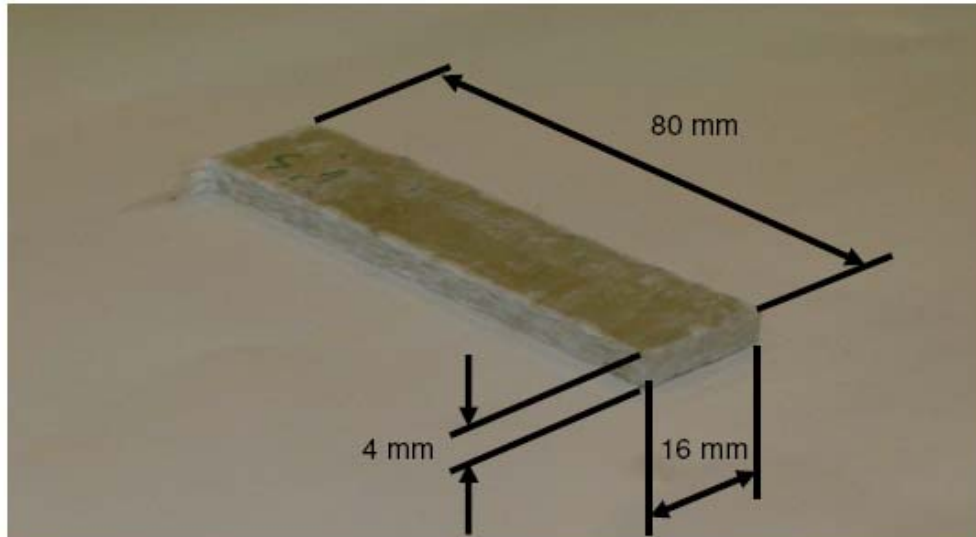
TS EN ISO 14125'e göre 3 noktalı eğme deneyi numunesinin birim uzunlukları aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Çizelge 4.1 3 noktalı eğme numunesinin birim uzunlukları

Malzeme Tipi	Numune Boyu	Numune Eni	Numune Kalınlığı
Tip 1	80	10	4
Tip 2	80	15	4
Tolerans	-0/+10	± 0,5	± 0,2

Tip 1 : Süreksiz fiber takviyeli termoplastik

Tip 2 : Keçe, sürekli keçe ve dokuma ve benzeri karışım formatları takviyeli plastikler. ( DMC, SMC, BMC, GMT )



Şekil 4.9 Tip 2, 3 noktalı eğme numunesi

Eğme deneyi çekme cihazında gerçekleşir. Eğme düzeneği olarak mesnetler bir tabla üzerine, yükleme bloğu denilen mandrel ise cihazın üst kısmına yerleştirilir. Eğme düzeneğinde mandrel çapı ve mesnetlerin çapı önemlidir. Bu değerler, kullanılacak malzemeye göre ve bu malzemeye ait olan standartlara uygun olarak deneye başlamadan önce kumpasla ölçülür.



Ayrıca mesnetler arası açıklıkta yine standartlara uygun ayarlanır. Düzenek ayarlandıktan sonra mesnetler üzerine numune yerleştirilir ve numune bir yükün uyguladığı mandrel yardımıyla eğilir. Eğme deneyi sonucunda, malzemenin eğme momenti, eğilme dayanımı ve elastisite modülünün hesabı için numunenin kırıldığı andaki maksimum yükünü ve deney sırasında yükün uyguladığı noktada numunenin başlangıçtaki duruma göre düşey eksendeki değişme miktarı olan eğilme miktarının değeri deney cihazına bağlı gösterge ve kayıt düzenlerinden faydalanılarak kaydedilir.



Şekil 4.10 Eğme deneyi düzeneği

Deney numunesi üzerine yapılan dik açılı eğme gerilimi aşağıdaki formül ile hesaplanır :

$$\sigma_F = \frac{3F_F L}{2bd^2}$$

$F_F$  : numunenin kırıldığı andaki ya da kırılma öncesi kritik eğilmeyi veren kuvvet değeri.

$L$  : Alt iki destek arasındaki uzunluk.

$d$  : deney numunesinin kalınlığı

$b$  : deney numunesinin eni

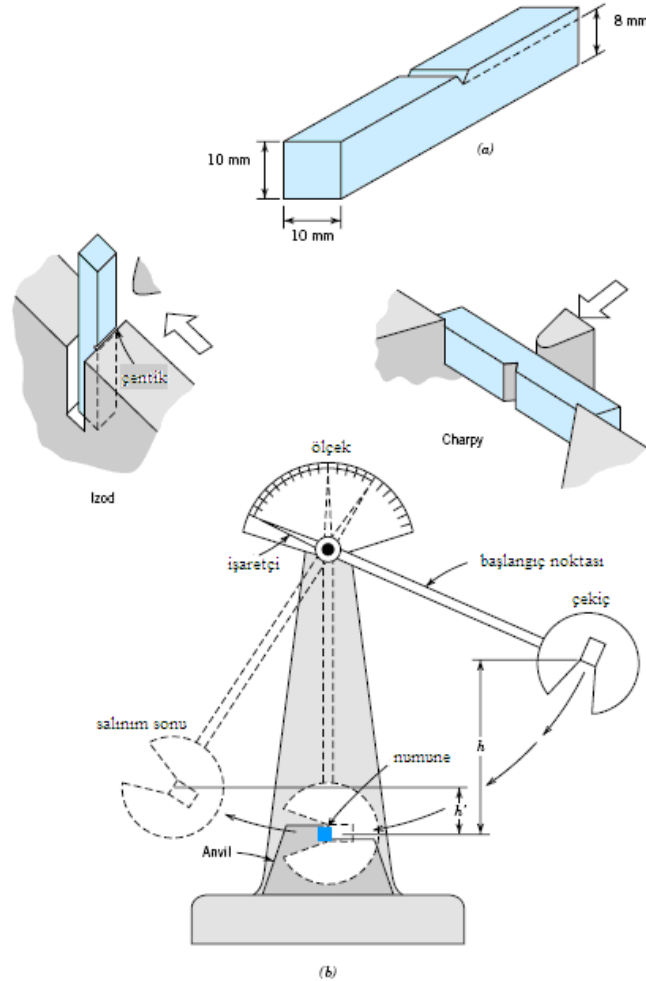
Bununla beraber eğilme modülü ise ;

$$E_F = \frac{3 F_F L^3}{4bd^3 y_m}$$

formülünden yararlanılarak hesaplanır.

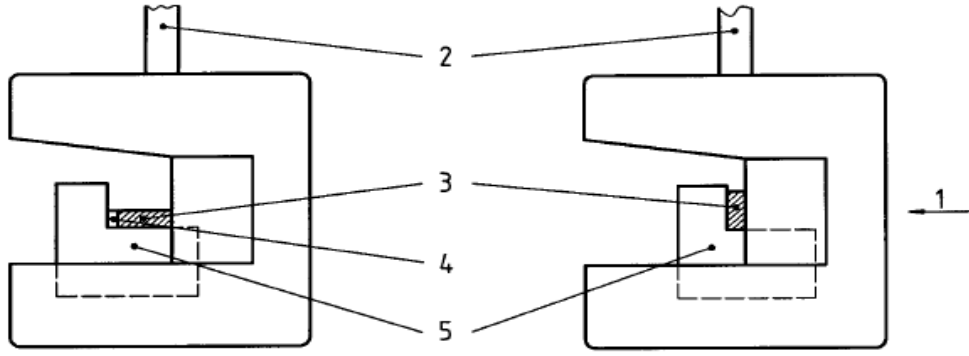
### 4.3 Plastik Matrisli Kompozitlerin Darbe Deneyi ( TS EN ISO 179-1, ASTM D 256-90b )

Darbe deneyi metallerin özellikle gevrek kırılmaya müsait koşullardaki mekanik özellikleri hakkında sağlam bir fikir elde etmek amacıyla uygulanır. Darbe dinamik bir deneydir. Darbe enerjisini ölçmek için Charpy ve Izod testleri kullanılır. Malzemenin tokluğu gerilme-gerinim eğrisinden (statik yük altında) hesaplanabilmesine rağmen darbe deneyi ile malzemenin darbeli yük altında tokluk değeri elde edilir.



Şekil 4.11 Darbe Deneyi Şematik Gösterimi

Darbe deneyi, metalik ve metalik olmayan malzemelerin dinamik zorlanmalar altında kırılması için sarf edilen enerji miktarını tayin ve tespit amacıyla yapılır. Deneyler için TS EN ISO 179-1 standartlarından yararlanılmıştır. Standartta da gösterildiği gibi darbe deneyinin şematik gösterimi Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12 Darbe deneyinin şematik gösterimi

- 1 : Darbe yönü
- 2 : Sarkaç kolu
- 3 : Deney numunesi
- 4 : Çentik
- 5 : Destek



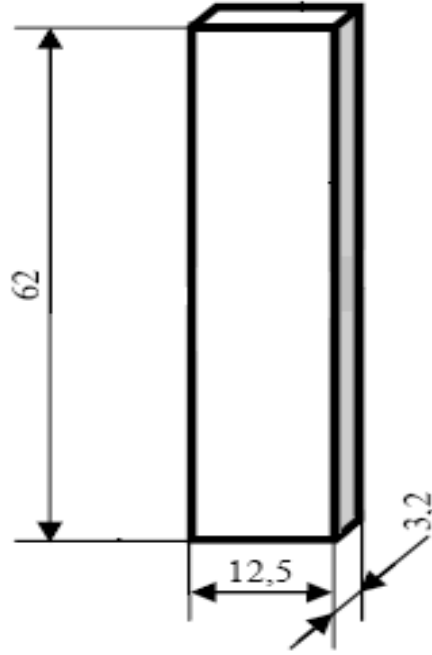
Şekil 4.13 Zwick Darbe Deneyi Aleti

Deneyde kullanılacak numuneler TS 3779 EN ISO 2818'e göre hazırlanmış levhalardan alınmalıdır.

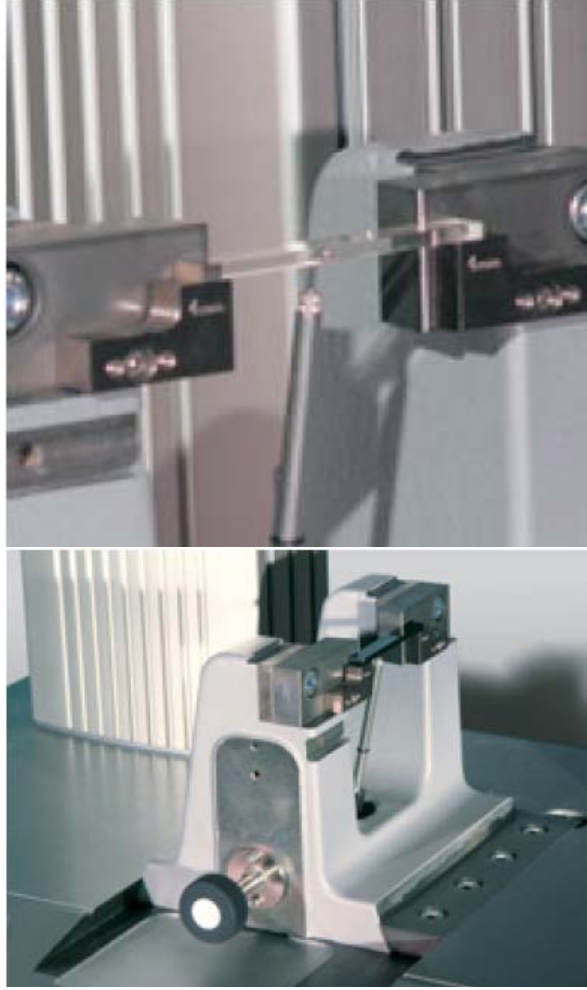
Çizelge 4.2 Deney numuneleri tipleri, boyutları ve destekler arası mesafeleri

Numune tipi	Ölçüler mm'dir			
	Uzunluk <sup>a)</sup> l	Genişlik <sup>a)</sup> b	Kalınlık <sup>a)</sup> h	Destekler arası mesafe L
1	$80 \pm 2$	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$62^{+0,5}_{-0,0}$
2 <sup>b)</sup> 3 <sup>b)</sup>	$25 h$ $11 h$ veya $13 h$	10 veya 15 <sup>c)</sup>	3 <sup>d)</sup>	$20 h$ $6 h$ veya $8 h$

Tip 1 deney numunesi için kullanılan darbe ucu ve destek bloklarının darbe anındaki durumu Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Darbe deneyinde kullanılan numunenin boyutları



Şekil 4.15 Numunenin deney makinesi üzerinde görünümü

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla , çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü; metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına

rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğeri bir değışle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değıl ise, en büyük darbe hasarı enine doğırtuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğırtudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir.

#### 4.3.a Çentiksiz Numuneler

Çentiksiz deney numunelerinin Charpy darbe mukavemeti,  $a_{cU}$ ,  $\text{kJ/m}^2$  cinsinden aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$a_{cU} = \frac{W_B}{bh} \times 10^3$$

Burada;

h : Deney numunesinin kalınlığı, mm,

b : Deney numunesinin genişliği, mm,

$W_B$  : Kopmadaki enerji, Joule

dur.

### 4.3.b Çentikli numuneler

A, B veya C tipi çentikli deney numunelerinin Charpy darbe mukavemeti,  $a_{CN}$ , kJ/m<sup>2</sup> cinsinden aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$a_{CN} = \frac{W_B}{hb_N} \times 10^3$$

$W_B$  : Kopmadaki enerji, J,

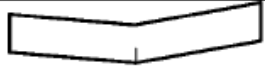





$h$  : Deney numunesinin kalınlığı, mm,

$b_N$  : Deney numunesinde açılan çentiğin tabanındaki genişlik, mm,

$N$  : Çentik tiplerinden (A, B veya C) birini ifade eder (bkz. ISO 179-1, Madde 6.3),

Uygulanacak metot ve deney numuneleri tipi – Tabakalar arasında kesmeden kaynaklanan kusur gösteren malzemeler Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 Tabakalar arasında kesmeden kaynaklanan kusur gösteren malzemeler

Metodun gösterimi	Deney numunesi tipi	L/h	Kusur tipi	Şematik	
ISO 179-1/2 n veya p <sup>a)</sup>	2	20	Çekme	t	
			Sıkıştırma	c	
			Flâmbaj	b	
ISO 179-1/3 n veya p <sup>a)</sup>	3	6 veya 8	Kesme	s	
			Çoklu kesme	ms	
			Çekmeyi takip eden kesmeden kaynaklanan kusur	st	
<sup>a)</sup> "n" levhanın düzlemine göre dik yönü, "p" ise paralel yönü ifade eder (Şekil 4)					

#### 4.4 Su Absorpsiyon Deneyi (TS 702 EN ISO 62, ASTM D 570 )

Suyla temasta bulunan plâstikler aşağıda belirtilen farklı pek çok etkiye maruz kalırlar:

- a) su absorpsiyonunun sebep olduğu boyut değişimi (şişme gibi);
- b) suda çözünebilen bileşenlerin ekstraksiyonu;
- c) diğer özelliklerindeki değişiklikler.

Ancak, neme maruz bırakma, daldırma ve kaynar suya maruz bırakma karşısında malzemeler birbirlerine göre çok farklı tepkiler verebilir. Denge halindeki nem muhtevası, neme maruz bırakılan farklı plâstik tiplerinin absorpladıkları su miktarının mukayesesi için kullanılabilir. Su alış veriş dengesinin yerleşmediği şartlarda tayin edilen nem muhtevası, aynı, fakat farklı partilere ait malzemelerin mukayese edilmesinde ve boyutları belli plâstik deney parçaları kullanarak aynı, fakat dikkatlice kontrol edilen şartlarda neme maruz bırakılan malzemenin difüzyon sabitinin tayininde kullanılır.

Deney için yararlanılan standart belirli boyutlardaki plâstik deney parçalarının, suya daldırıldıklarında veya kontrollü şartlar altında tutulan nemli havaya maruz bırakıldıklarında, absorpladıkları su miktarının tayini için uygulanacak metotları da kapsar. Tek fazlı malzemelerde “kalınlıkları boyunca” nem difüzyon katsayısı, deney parçasının kalınlığı boyunca sabit nem absorpsiyon özelliğine sahip olduğunu varsayan Fick difüzyon yasasına göre tayin edilebilir. Bu model homojen malzemeler ve camsı geçiş sıcaklığının altında deneye tâbi tutulan takviyeli polimer matrisli kompozitler için geçerlidir.

Deney parçaları 23°C'daki damıtık suya veya kaynar haldeki damıtık suya daldırılır veya belirli süreler için, belli sıcaklıklarda % 50 bağıl neme maruz bırakılır.

Deney parçasının absorpladığı su miktarı, kütledeki değişim ölçülerek tayin edilir. Kütledeki değişim, suya daldırıldıktan sonra ölçülen kütleden başlangıç kütlelerini çıkararak bulunur ve başlangıç kütlelerinin bir yüzdesi olarak ifade edilir. Gerekirse, deney parçaları kurutulduktan sonraki su kaybı da tayin edilebilir. Bazı uygulamalarda, bağıl nemin % 70 -% 90, sıcaklığın da 70°C - 90°C arasında olması gerekebilir. Bu standartta tavsiye edilenlerden daha yüksek sıcaklık ve bağıl nem şartlarının kullanılması, ilgili taraflar arasında varılacak anlaşmaya bağlıdır. Tavsiye edilen sıcaklık ve bağıl nemden farklı sıcaklık ve bağıl nem



şartları kullanılırsa, deney raporunda bu şartların ayrıntılı bir açıklaması (toleranslarla birlikte) verilmelidir.

Numunenin fırından çıktıktan sonraki ağırlığı ,

$$m_1 = \dots\dots\dots \text{ gr}$$

24 saat sonra sudan çıktıktan sonraki ağırlığı ,

$$m_2 = \dots\dots\dots$$

$$= (m_2 - m_1 / m_2) * 100$$

$$= \% \dots\dots\dots$$

#### 4.5 Yoğunluk Deneyleri ( TS 1818, ASTM D 792-86)

SMC kompozitlerin karışım oranlarının belirlenmesi amacıyla TS 1818'e uygun olarak yoğunluk deneyleri yapılır.

Numunenin özgül ağırlığının ve yoğunluğunun ölçülmesi ile ilgili standartlar, bu ölçümlerin iki ayrı test yöntemi ile yapılabilmesini içermektedir.

Metot A, 1-50 g'lık bir parça numunenin sudan hafif batırıcılar yardımı ile saf su içinde tartılmasını içerir ve sudan etkilenmeyen numuneler için uygundur.

Deney için 0,1 mg hassasiyette analitik terazi, numuneyi asmak için korozyona dirençli tel, korozyona dirençli, özgül ağırlığı en az 7 g/m<sup>3</sup> olan, pürüzsüz yüzeyli, muntazam şekilli, numunenin batmasını sağlayacak kadar ağırlıkta batırıcı, suyu ve numuneyi içine alacak genişlikte batırma kabı ve  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{F}$ ) hassaslıkta bir termometre ve saf su gereklidir.

Test edilecek numune 1 cm<sup>3</sup>'ten küçük olmamak kaydıyla herhangi şekil ve ağırlıkta olabilir. Her 1 g ağırlık için en az 1 mm kalınlığında olması gereken uygun numune 1-5 g ağırlık uygundur. Numune kesimi sırasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısı ve gerilmelerin yoğunluğu değiştirici boyutta olmamasına dikkat edilmelidir. Numune yüzeyindeki yağ, kir gibi tüm yabancı maddeler temizlenmelidir.

Teraziye, terazi kefesinin üstündeki kancadan daldırma kabının desteğine yetişecek uzunlukta, bir tel bağlanır ve numune kap desteğinin 2,5 cm (1 in.) üstünde olmak üzere tele bağlanır ve  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  sıcaklıkta, asılı numune (eğer kullanıldıysa batırıcılar) tamamıyla suya daldırılır. Kap numuneye kesinlikle değmemelidir. Numuneye temas eden baloncuk var ise uzaklaştırılmalıdır. Numune su içindeyken istenilen hassasiyette ikinci kez tartılır Bu tartım, su absorpsiyonunu engellemek için en hızlı şekilde yapılmalıdır.

Her örnek için en az iki numune ile deneyin yapılması tavsiye edilmektedir.

Numunenin özgül ağırlığı, aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$Spgr_{23/23^{\circ}C} = \frac{a}{a + w - b_a}$$

Burada;

a : Numunenin ilk ağırlığı

w : Sıvı içinde numune ve aparatların ağırlığı

b : Aparatların ağırlığı

Özgül ağırlığa bağlı olarak, yoğunluğun hesaplanması ise,

$$\rho = Spgr_{23/23^{\circ}C} \times 0,9975 [mg / m^3]$$

formülü ile yapılmaktadır.

Metot B, saf su haricinde bir sıvı kullanmak suretiyle 1-50 g arasındaki sudan etkilenen veya sudan hafif numunelerin test edilmesinde kullanılır.

Metot A'daki terazi, tel ve daldırma kabına ek olarak 25 ml'lik termometreli piknometre ve sıcaklığı  $23 \pm 1^{\circ}C$ 'de ayarlamak için sabit sıcaklık banyosu gerekir.

Daldırma sıvısı numuneyi etkilemeyecek; çözülmesine, şişmesine veya kabarmasına yol açmayacak, numuneden daha az özgül ağırlığa sahip ve ıslatıcı nitelikte olmalıdır.

Numuneler metot A'daki standartlarda, olmak suretiyle deney prosedürü de yine aynıdır.

#### 4.6 Yüzey Karakterizasyonu

Kimyanın, malzeme biliminin, jeoloji ve biyolojinin birçok çalışma alanında katı yüzeylerin fiziksel niteliği hakkında ayrıntılı bilgi sağlamak büyük bir önem taşır. Bu tür bilgiyi sağlamanın klasik yöntemi yüzey karakterizasyonunda hala önemli bir teknik olarak kullanılan

optik mikroskobudur. Ancak optik mikroskobunun ayırıcılığı ışık dalga boyuna kırınımın etkisiyle sınırlıdır. Son zamanlarda çok daha yüksek ayırıcılığa sahip üç teknik kullanılarak yüzeyler hakkında bilgi sağlanmaktadır.

Bu teknikler taramalı elektron mikroskobu (SEM), taramalı tünelleme mikroskobu (STM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM)'dur. Bu tekniklerin her biri ile bir görüntü elde etmek için katı numunenin yüzeyi, hassas bir şekilde odaklanan elektron demetiyle veya uygun bir prop ile Raster düzeninde taranır. Raster, bir katot-ısınları tüpü veya bir televizyondaki tarama düzeni ilkesine benzer bir tarama şekli olup bu sistemde bir elektron demetiyle (1) yüzey boyunca düz bir doğru üzerinde (x yönünde) tarama yapılır, (2) demet başlangıç pozisyonuna döner ve (3) aşağı doğru (y yönünde) standart belirlenmiş bir miktar kadar kaydırılır.

Bu işlem söz konusu yüzey alanı tamamen taranana kadar tekrarlanır. Bu tarama işlemi sırasında yüzey üstünde (z yönü) bir sinyal alınır ve görüntüye dönüştürüleceği bir bilgisayar sisteminde toplanır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) Taramalı elektron mikroskopta, katı numune yüzeyi raster düzeninde yüksek enerjili bir elektron demetiyle taranır.

Bu teknikte yüzeyden çeşitli tür sinyaller oluşturulur. Bunlar geri saçılmış elektronlar, ikincil elektronlar, Auger elektronları, X-ışını floresans fotonları ve değişik enerjili diğer fotonlardır. Bütün bu sinyaller yüzey çalışmalarında kullanılmış olmakla beraber, bunların içinde en yaygın olan iki tanesi (1) taramalı elektron mikroskobunun temelini oluşturan geri saçılmış ve ikincil elektronlar ve (2) elektron mikroprob analizde kullanılan X-ışını emisyonudur. Taramalı elektron mikroskobuyla çalışılması en kolay olan numuneler elektriği iletkenlerdir. Çünkü engellenmemiş veya yavaşlatılmamış bir şekilde toprağa akan elektronlar, yük birikimi nedeniyle oluşan gerçek olmayan yapay verileri en aza indirir.

Ayrıca, elektrikçe iyi iletken numuneler genellikle ısıyı iyi iletiklerinden ısısal bozunma olasılığı en azdır. Ancak, ne yazık ki çoğu biyolojik ve mineralojik numuneler iletken değildir. İletken olmayan numunelerin SEM görüntülerini elde etmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Fakat en çok uygulanan tekniklerde numune yüzeyi tozlaşma veya vakum buharlaştırma uygulanarak ince bir metalik film tabakasıyla kaplanır. Kaplama işlemlerinde dikkat edilecek nokta, aşırı kalın kaplamanın yüzey ayrıntılarını örteceğidir. Bu nedenle optimum bir kalınlığın seçilmesi gerekir.

Taramalı elektron mikroskobu, katı yüzeyler hakkında morfolojik ve topografik bilgi sağlar. Bu genellikle yüzeylerin davranışlarının anlaşılması için gereklidir. Böylece bir katının yüzey

özellikleriyle ilgili çalışmalarda elektron mikroskopik incelemenin ilk adımı oluşturur. Taramalı elektron mikroskopisi özellikle kompozit malzemelerde kırılma yüzeylerinin incelenmesinde kullanılarak; takviye sistemi ile matris sistemi ara yüzeyi ve aralarındaki etkileşim, matrisin takviye sistemini ıslatabilirliği ve matris içindeki partikül dağılımı hakkında bilgi verir.

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yapılan deneyler için referans olarak TSE ISO standartlarından yararlanılmıştır. Deneylerde kullanılan numunelerin cam fiber katkıları CAM ELYAF A.Ş.'den 50 mm uzunluğunda ve 15 mm çapında desteler halinde alınmıştır. Cam fiberlerin polyester reçine ile uyumunu sağlamak için silan kullanılmıştır.

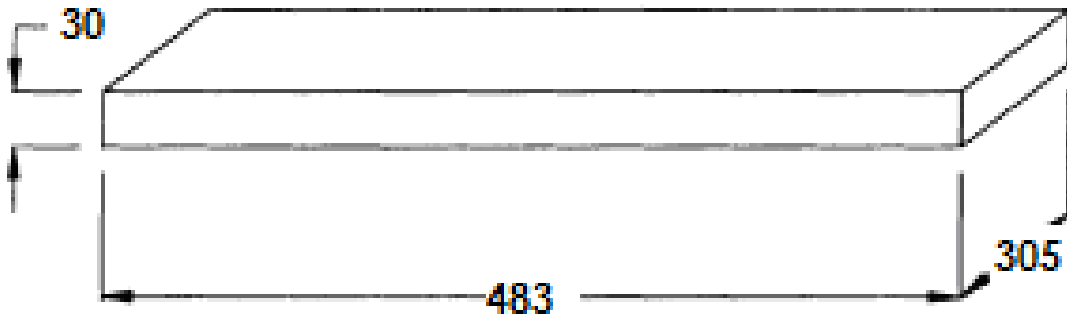
SMC/BMC uygulamaları için özel olarak üretilmiş (CE 227 yüksek tepkimeli orthofitalik polyestre reçine ) doymamış polyester reçine ile dolgu maddeleri kompozitin matrisini oluşturmaktadır.

Çizelge 5.1 Deneye tabi tutulan numunelerin hacimce % bileşimleri

	<b>Polyester</b>	<b>Katkı</b>	<b>E-Cam</b>
<b>1</b>	30%	60%	10%
<b>2</b>	30%	55%	15%
<b>3</b>	30%	50%	20%
<b>4</b>	30%	45%	25%
<b>5</b>	30%	40%	30%
<b>6</b>	30%	35%	35%
<b>7</b>	30%	30%	40%
<b>8</b>	30%	25%	45%
<b>9</b>	30%	20%	50%

10kg'lık şarj hazırlanmıştır.

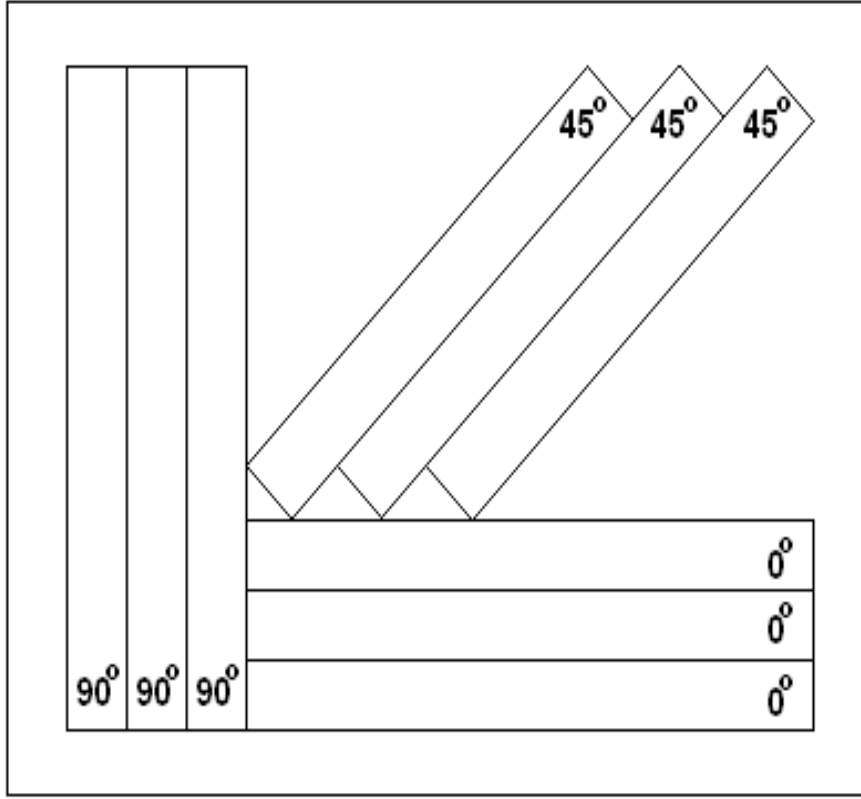
Deney numuneleri Avitaş Kompozit Plastik Tic. A.Ş.'den alınmıştır ve aşağıdaki şekilde ( Şekil 5.1) numunelerin kesildiği bloğun boyutları gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Deney numunelerinin çıkarıldığı SMC plakası.

Numunenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için test numuneleri EN ISO 2818'e göre

hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin bloktan kesilme yerleri aşağıda gösterilmiştir. ( Şekil 5.2 )



Şekil 5.2. Plakadan deney numunelerinin kesilmesinin şematik olarak gösterilmesi.

Numunelerin hazırlanması ve sistematik sınıflaması işlemlerinden sonra, mekanik özelliklerin belirlenmesi için numuneler gerekli deneylere tabi tutulmuştur.

### 5.1 Çekme Deneyi (TS EN ISO 527-4, ASTM D 638 M)

Çekme deneyi için kullanılan numuneye ait uzunluk ölçüleri TS EN ISO 527-4'den yararlanılarak hazırlanmıştır.

Numunelerin çekme özelliklerinin belirlenmesi için Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarındaki Mohr Federaf Çekme Cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.3 YTÜ Laboratuvarındaki Mohr Federaf Çekme Cihazı

Numune çekme cihazına bağlandıktan sonra standartta belirtilen kuvvet ve hızda deneye tabi tutulmuştur. Kullanılan cihazın resimler Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Deneyde kullanılacak çekme cihazının görüntüsü

Yukarıdaki resimlerde de görüldüğü gibi iki çene arasına bağlanan numunenin ne kadar güç uygulanarak çekildiği ve hangi kuvvette koptuğu mekanik skala yardımı ile belirlenir ve gerekli hesaplamalar için kaydedilir.





Şekil 5.5 Deney sırasında numunenin görünümü



Şekil 5.6 Numune koptuğu sırada çekme cihazının gösterdiği değeri kaydedilmesi

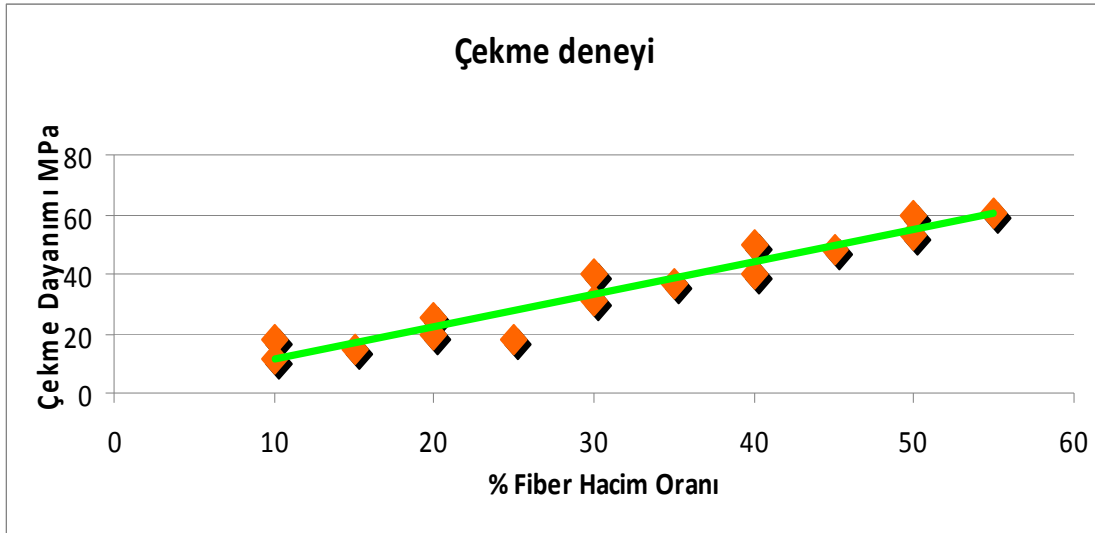
Numunelerin çekme mukavemeti'nin  $\sigma_t$  belirlenmesi için EN ISO 527-4 standardından yararlanılmıştır.

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{b.h}$$

yukarıdaki formül kullanılarak çekme mukavemeti hesaplanır.

Tahmin edildiği gibi matris içindeki fiber oranı arttıkça malzemenin çekme mukavemeti artar. Kompozit numunelerin fiber oranı ile doğru orantılı arttığı gösteren Çizelge 5.2 aşağıda gösterilmektedir. Yapıda  $\text{CaCO}_3$  oranı arttıkça topaklanma problemi oluşabilir. Topaklanma ile çekme ve eğme mukavemetinde sapmalar oluşur. Ayrıca bu tablo numunenin eğilme mukavemeti ile de benzerlik göstermektedir. Düz fiber oranının artması numunede bu tür bir sapmaya yol açmaz.

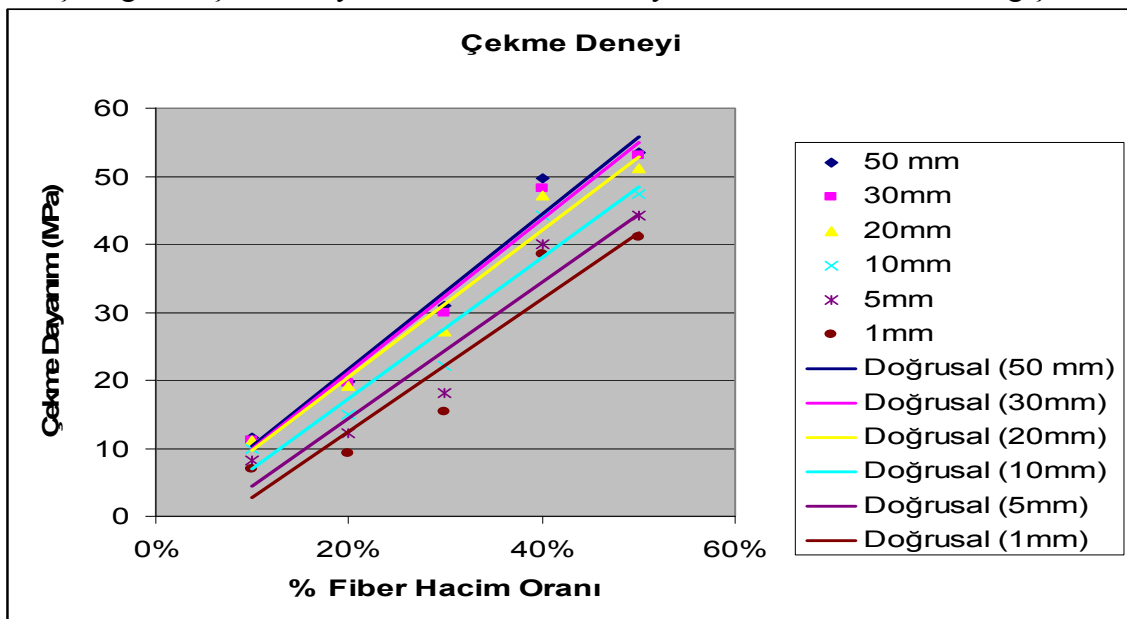
Çizelge 5.2 Çekme dayanımının % fiber oranı ile değişimi



Çizelge 5.3 Çekme dayanımının hacimce % fiber oranının değişmesi ile elde edilen sonuçlar

% Hacim Oranı	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Çekme Değerleri (MPa)	11,6534 17,6549	14,8658	25,6396 19,7634	17,6349	39,8458 31,0043	36,8632	49,6349 39,8734	47,8347	59,4887 53,4435

Çizelge 5.4 Çekme dayanımının farklı fiber boylarında ve hacimlerinde değişimi



Çizelge 5.5 Çekme dayanımının farklı fiber boylarında ve hacimlerinde değişimi ile elde edilen sonuçlar

Fiber Boyu (mm) % Fiber Hacim Oranı	50 mm	30mm	20mm	10mm	5mm	1mm
10%	11,6534	11,1852	11,1574	9,9858	8,1245	6,97132
20%	19,7634	19,5971	19,2611	14,9129	12,1123	9,3453
30%	31,0043	29,9981	27,1246	22,1358	18,1546	15,2854
40%	49,6349	48,1247	47,2168	44,1236	40,0178	38,5431
50%	53,4435	53,1102	51,218	47,2685	44,1254	41,1567

## 5.2 Eğme Deneyi (TS EN ISO 14125, ASTM D 790)



Şekil 5.7 Eğme deneyinde kullanılan cihazın görüntüsü

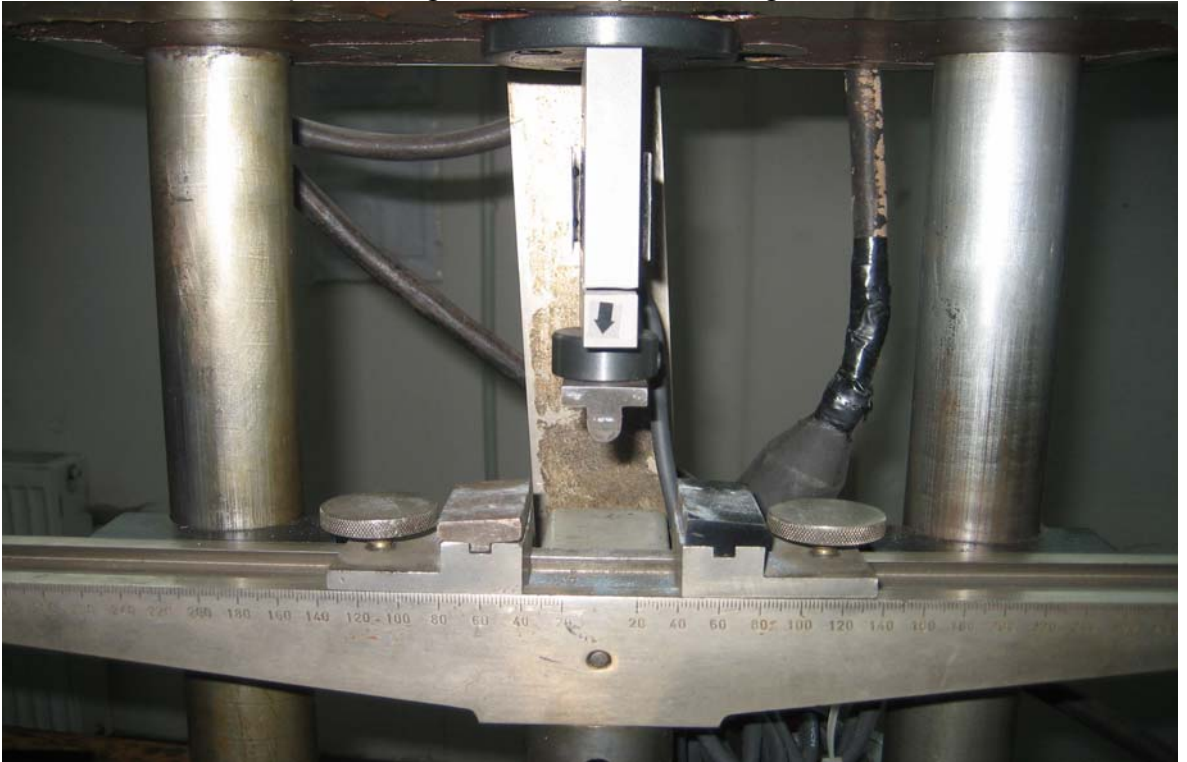
Eğme deneyleri TS 4650-2 standardına göre hazırlanan numunelerle YTÜ laboratuvarlarında Instron Marka Universal Çekme Eğme cihazında yapılmıştır. Deneyde başlıklar arası ilerleme hızı 0,5 mm/dak seçilmiştir. Numunelerin kırıldığı andaki kuvvet değerleri  $F_{max}$  olarak okunmuş ve eğme dayanıcı;

$$\sigma_{eğ} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.



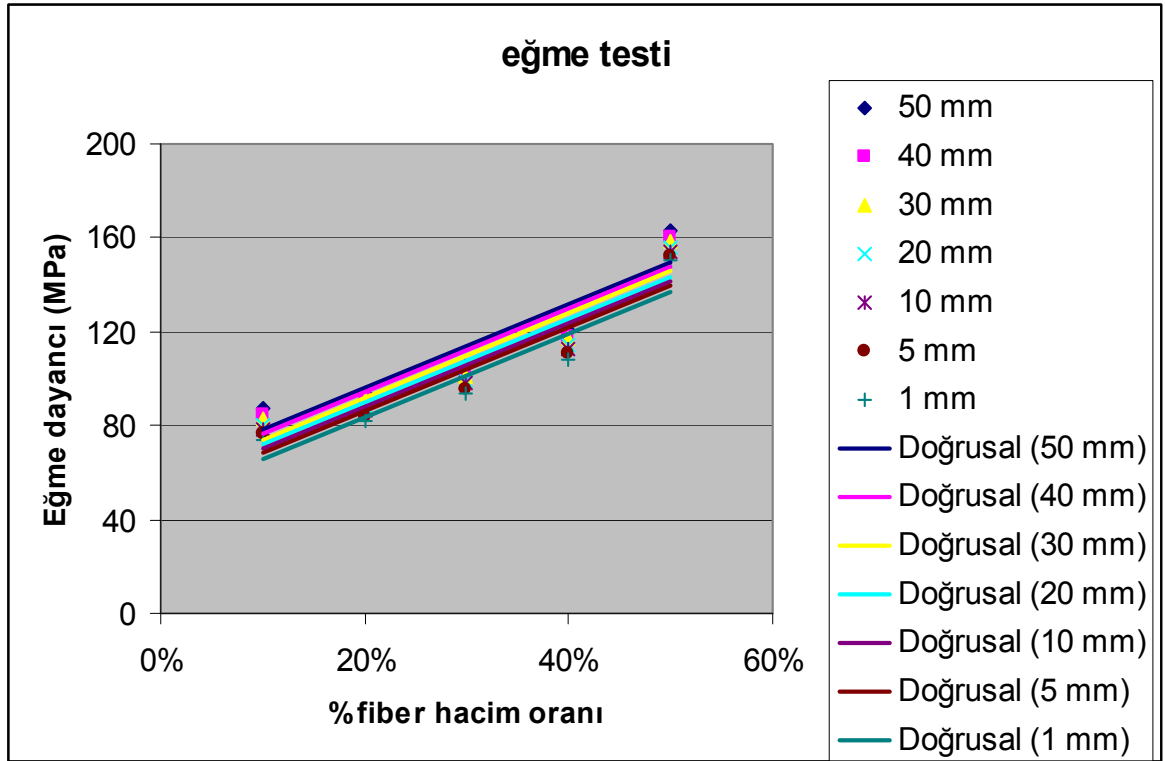
Şekil 5.8 Eğme cihazının çenelerinin görünümü



Şekil 5.9 Eğme cihazının çeneleri arasındaki uzunluğun ayarlanması

Çizelge 5.6 ve 5.7’de farklı uzunluklarda fiber boyları ile yapılan deney sonuçları verilmiştir. Fiber boyunun artması ile Eğme dayancının artmasının doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.6 Eğme Testinin farklı fiber boylarına göre sonuçları

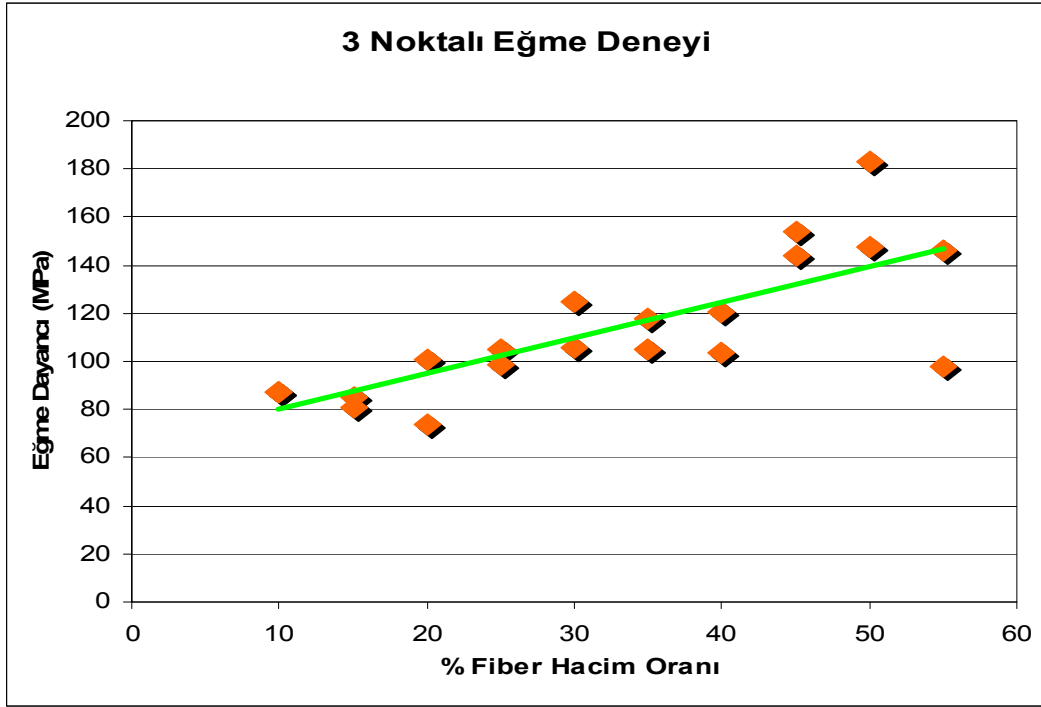


Çizelge 5.7 Eğme Testinin farklı fiber boylarına göre deney değerleri

Fiber Boyu (mm) % Fiber Hacim Oranı	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm	5 mm	1 mm
10%	86,9782	84,5464	82,4568	80,248	78,8248	76,5871	74,1564
20%	94,0985	92,1364	90,5479	88,2462	86,3517	84,138	82,1483
30%	105,456	103,565	101,278	99,247	97,8431	95,5324	93,3642
40%	120,856	118,215	116,9821	114,4135	112,2147	110,6114	108,3142
50%	162,988	160,651	158,366	156,224	154,214	152,3342	150,0341

Çizelge 5.8 ve 5.9'da eğme dayancı sonuçları artan cam hacim oranı ile birlikte verilmiştir. Burada cam hacim oranının artması ile eğme dayancının arttığı gözlenmiştir.

Çizelge 5.8 Eğme Testinin farklı % fiber hacim oranlarına göre sonuçları



Çizelge 5.9 Eğme Testinin farklı % fiber hacim oranlarına göre deney değerleri

Fiber % Hacim Oranı	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Eğme Dayanım Değerleri (MPa)	86,98	84,98	74,099	104,675	105,456	117,655	120,856	143,765	182,988
	87,11	81,1	100,99	98,760	124,68	104,89	103,67	153,56	147,65
				3	2	7	5	8	7



Şekil 5.10 Eğme deneyi sırasında numunenin makineye yerleştirilmesi

### 5.3 Darbe Dayancı Deneyi (TSE EN ISO 179-1, ASTM D256-90b)

Deneyle Yıldız Teknik Üniversitesi Laboratuvarlarında Zwick Plastik Darbe marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. YTÜ Laboratuvarlarındaki test cihazı Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11 Darbe Deneyinde kullanılan makinenin görüntüsü

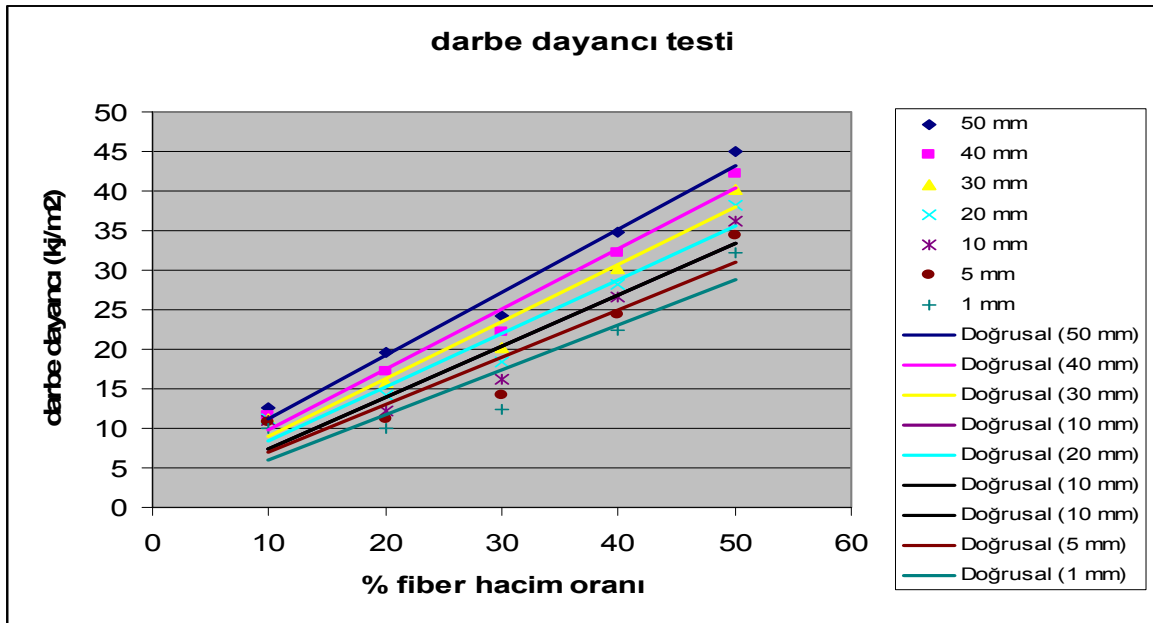
Darbe deneyi TSE EN ISO 179-1 standardına göre yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin boyutları ile deneyde elde edilen kesme işleri ve darbe dayancı sonuçları Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Darbe dayancı;  $a_{ou} = \frac{W}{b \cdot h} (kj/m^2)$  eşitliğinden, W kırma işinin, kırılan kesit alanına bölünmesi ile bulunmuştur.



Şekil 5.12 Numune yerleşmeden önce ve yerleştikten sonra deney cihazının görüntüsü

Çizelge 5.10 Farklı cam fiber boyutları ile hazırlanan numunelerin darbe dayanıcı test sonuçları

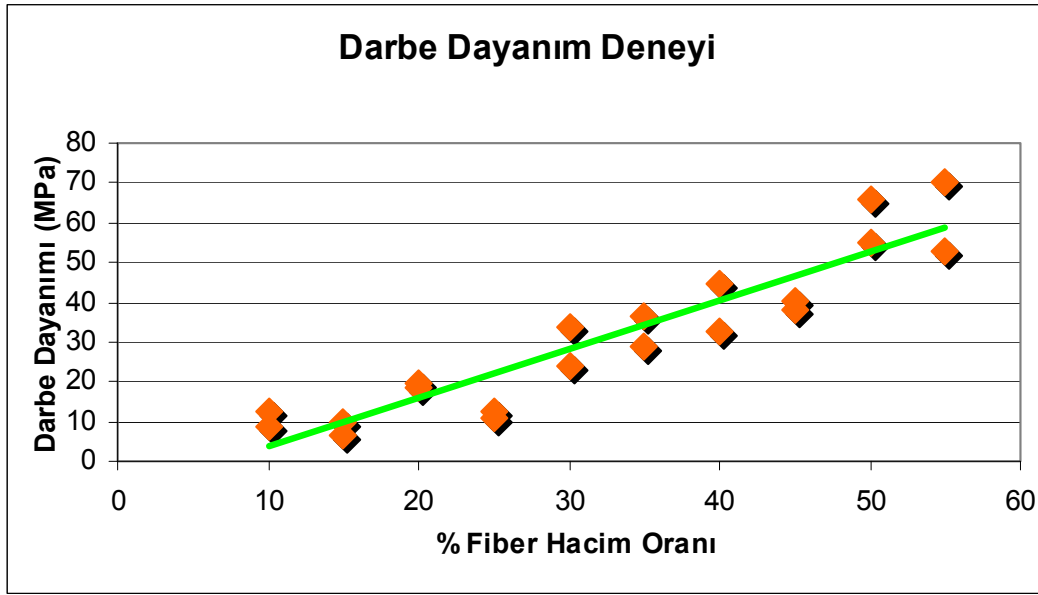


Çizelge 5.11 Farklı cam fiber boyutları ile hazırlanan numunelerin darbe dayanıcı değerleri

Fiber Boyu (mm) % Fiber Hacim Oranı	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm	10 mm	5 mm	1 mm
10%	12,5463	11,5641	11,2146	11,1543	10,992	10,7621	10,0124
20%	19,5674	17,2146	15,8743	14,2147	12,156	11,217	9,9872
30%	24,2159	22,1247	20,2248	18,3665	16,2588	14,2114	12,3354
40%	34,8745	32,2248	30,2114	28,2778	26,5541	24,4453	22,3354
50%	44,9865	42,2336	40,1254	38,2248	36,2931	34,3317	32,2894



Çizelge 5.12 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin darbe dayanım değerleri



Çizelge 5.13 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin darbe dayanım sonuçları

Fiber % Hacim Oranı	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Darbe Dayanım Değerleri (MPa)	12,546	6,7535	19,567	12,358	24,2159	36,3784	44,8745	40,467	54,9865
	8,6547	9,6547	18,655	11,024	33,6593	28,7583	32,8745	37,8763	65,9845

#### 5.4 Yoğunluk Deneyleri (TS1818, ASTM D 792-86)

Yoğunluk deneyleri için, bileşimleri farklı SMC plakalarından 20x20x4 mm boyutlarında olan numuneler, plakaların orta ve etek noktalarından, kesilmiştir.

Numune ağırlıkları, 0,01 tamlıkta dijital terazide tartılmış, SMC plakalarının yoğunlukları hesaplanmıştır ve ölçülen sonuçlar, aşağıdaki ilgili tablo ve grafiklerde gösterilmiştir.

Karışımlar kuralının fiber yönü ve dizilimi ile düzeltilmiş eşitliği;

$$\rho_C = \eta_o \cdot \eta_l \cdot \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m + \rho_p \cdot V_p$$

ile teorik yoğunluk hesaplanmıştır (Ünal, 2000).

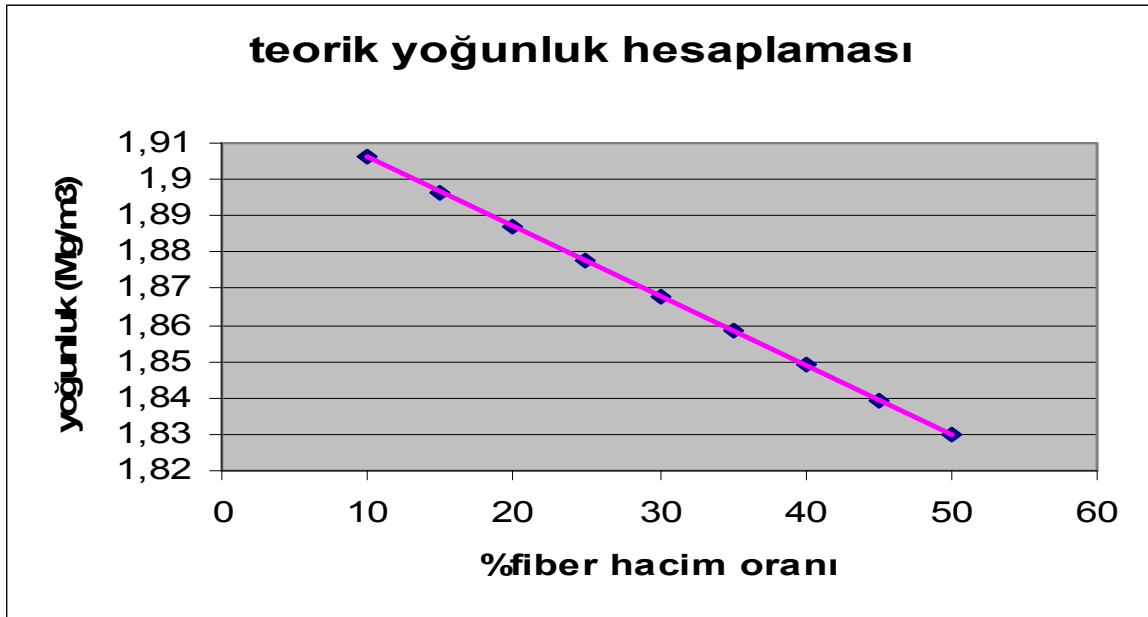
Eşitlikte  $\eta_l$  : fiber boy faktörü ( $\eta_l \approx 0,99$ );  $\eta_o$  : fiber tür faktörü ( $\eta_o \approx 3/8$ )'dür.

Eşitliğe göre hesaplanan teorik değerler:

Çizelge 5.14 Numunelerin teorik yoğunluk değerleri

Teorik Yoğunluk Hesaplamaları									
% Fiber Hacim Oranı	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Yoğunluk	1,906	1,8965	1,887	1,8775	1,868	1,8585	1,849	1,8395	1,83

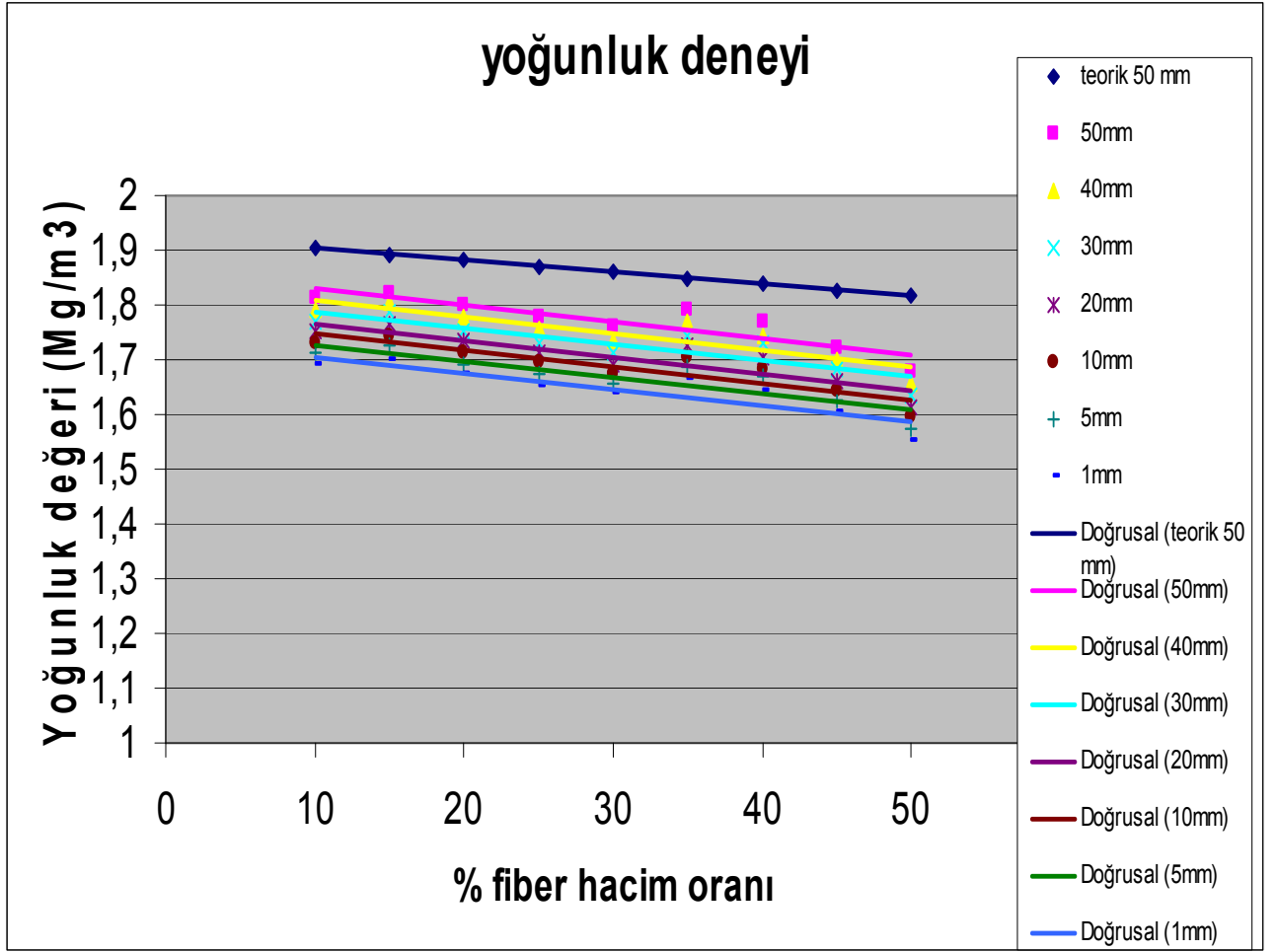
Çizelge 5.15 Farklı hacimce % oranlarına sahip numunelerin yoğunluk değerleri



Çizelge 5.16 Yoğunluk deneyi hesaplamaları

% fiber	teorik 50 mm	50mm	40mm	30mm	20mm	10mm	5mm	1mm
10	1,90344	1,8109	1,7909	1,7716	1,7524	1,7321	1,7126	1,6924
15	1,89266	1,8237	1,8036	1,7854	1,7645	1,7426	1,7264	1,7004
20	1,88188	1,7992	1,7789	1,7526	1,7331	1,7139	1,6924	1,6728
25	1,87111	1,7765	1,7556	1,7324	1,7119	1,6975	1,6724	1,6534
30	1,86032	1,7598	1,7354	1,7147	1,6924	1,6748	1,6549	1,6371
35	1,84954	1,7893	1,7678	1,7454	1,7241	1,7039	1,6857	1,6649
40	1,83876	1,7698	1,7448	1,7283	1,7026	1,6835	1,6684	1,6448
45	1,82798	1,7204	1,7019	1,6806	1,6618	1,6427	1,6268	1,6042
50	1,8172	1,6779	1,6579	1,6359	1,6127	1,5967	1,5724	1,5537

Çizelge 5.17 Farklı fiber boyutlarındaki numunelerin yoğunluk değerleri

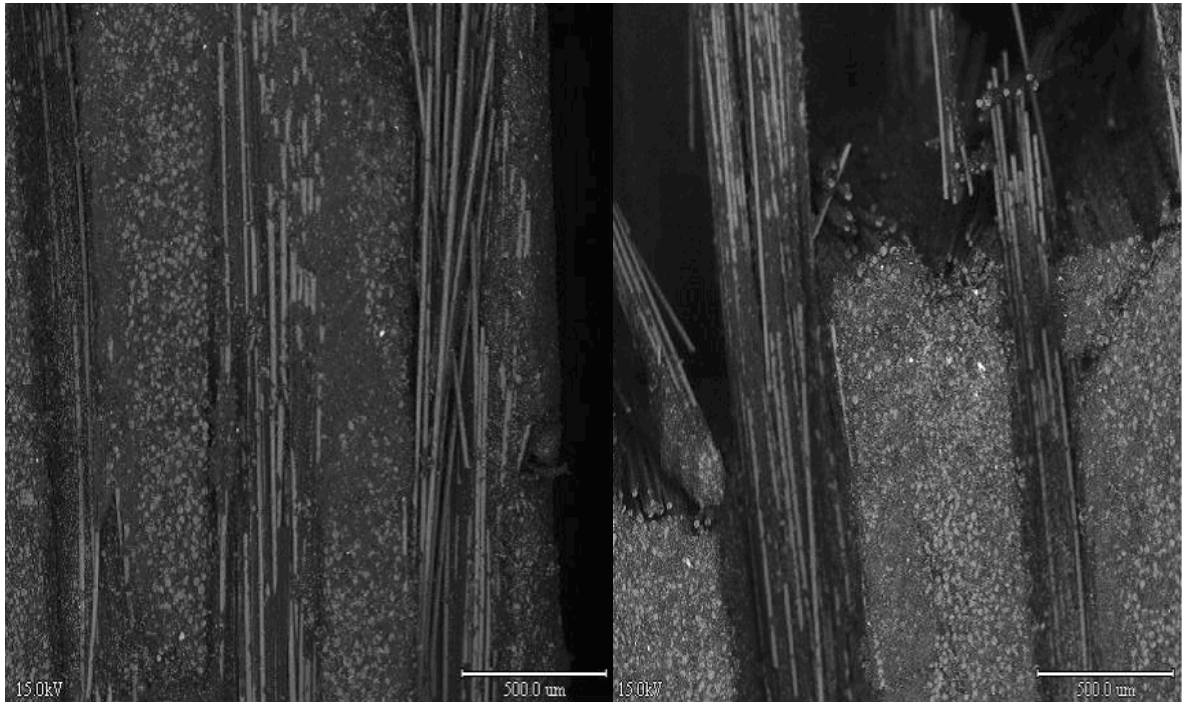


### 5.5. Sem Görüntüsünün İncelenmesi

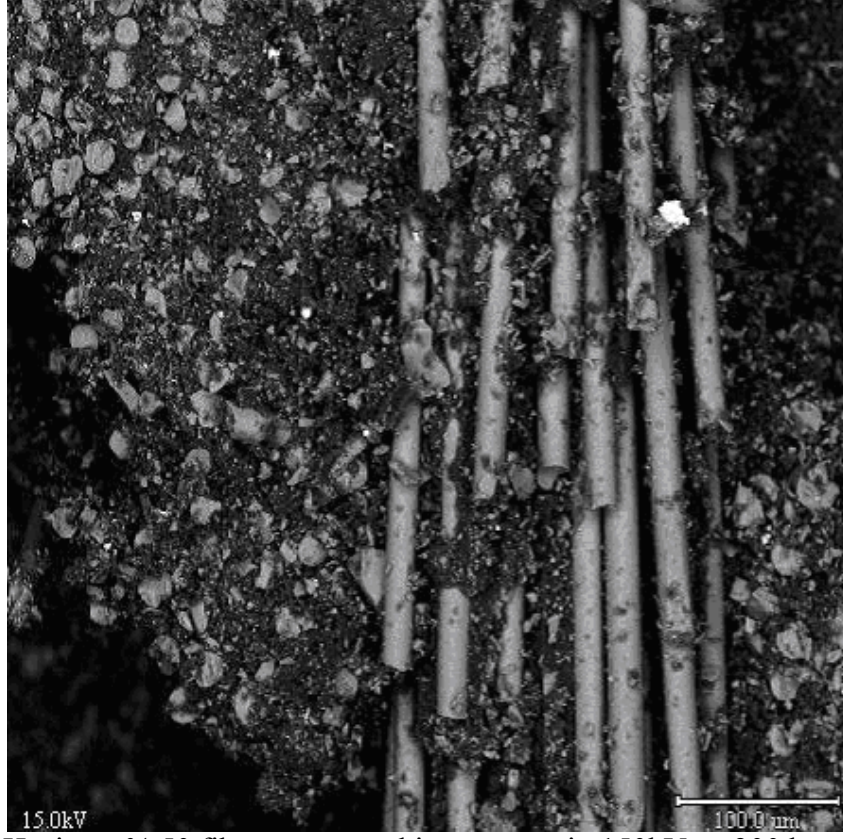
Deney numunelerinin darbe testleri sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerinde inceleme yapmak için JEOL 3400 LV Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Farklı büyütme oranlarında görüntüler incelenmiştir.

Elektron mikroskobunun Low Vacuum olması nedeniyle numunenin kırık yüzey görüntüleri numune kaplanmadan alınmıştır. Kırık yüzey görüntülerinde, fiberlerin çoğunlukla ortadan kırıldığı gözlenmiş, sıyrılma problemi (pull-out) resimlerde kırılmaya göre daha az oranda gözlenmiştir. Görüntülerde uygulanan kuvvet sonrasında kılmanın önce matristen başlayıp fiberlerin kırılması ile devam ettiği görülmüştür.

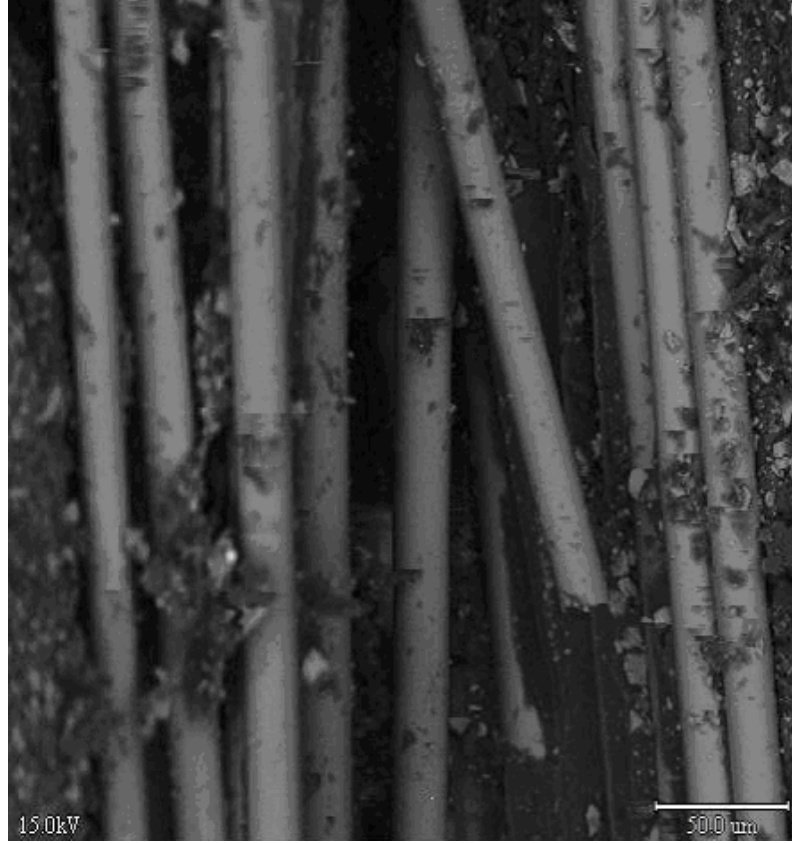
Artan cam elyaf oranlarında birim alana düşen elyaf miktarının arttığı görülmektedir. ( Hacimce %50) Cam elyafların polyester matris içinde dağılım gösterdikleri de açıkça görülmektedir. Ayrıca, uzun elyafların matrisle daha iyi bağlantı sağlamaları sonucu koparak ayrıldıkları, kısa elyafların ise matrise yeterince güçlü tutunamayıp sıyrılarak ayrıldıkları görülmüştür ki bu gözlem mekanik testler sonucunda uzun elyaflarla takviyeli numunelerin daha iyi dayanım göstermelerini destekler niteliktedir.



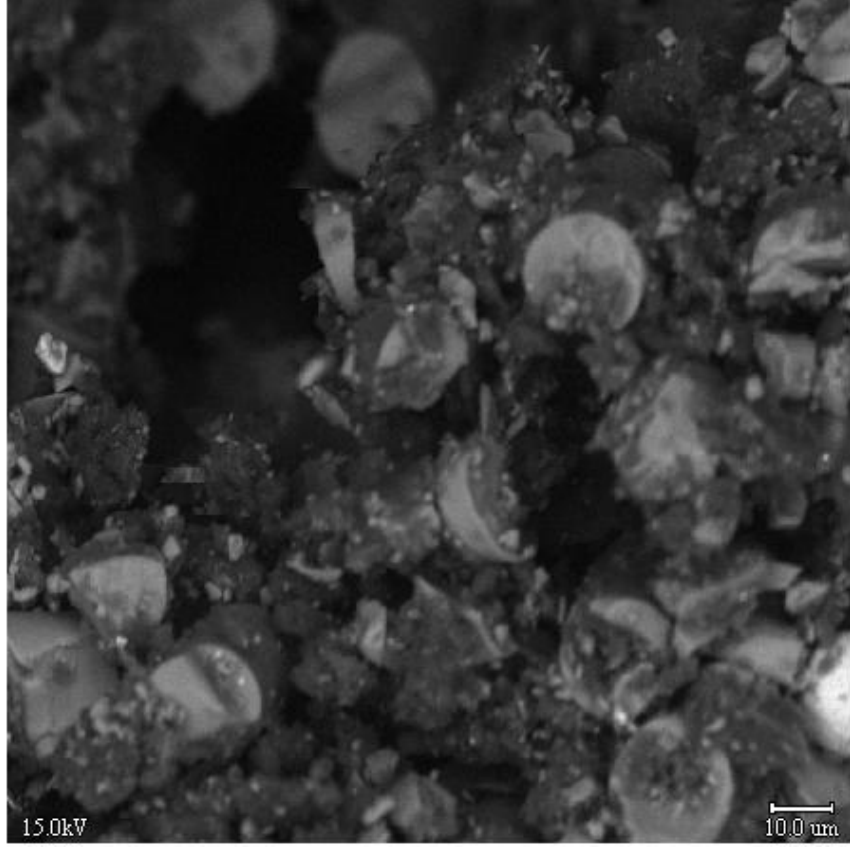
Şekil 5.13 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 50 büyütmede elde edilen görüntüsü



Şekil 5.14 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 200 büyütmede elde edilen görüntüsü



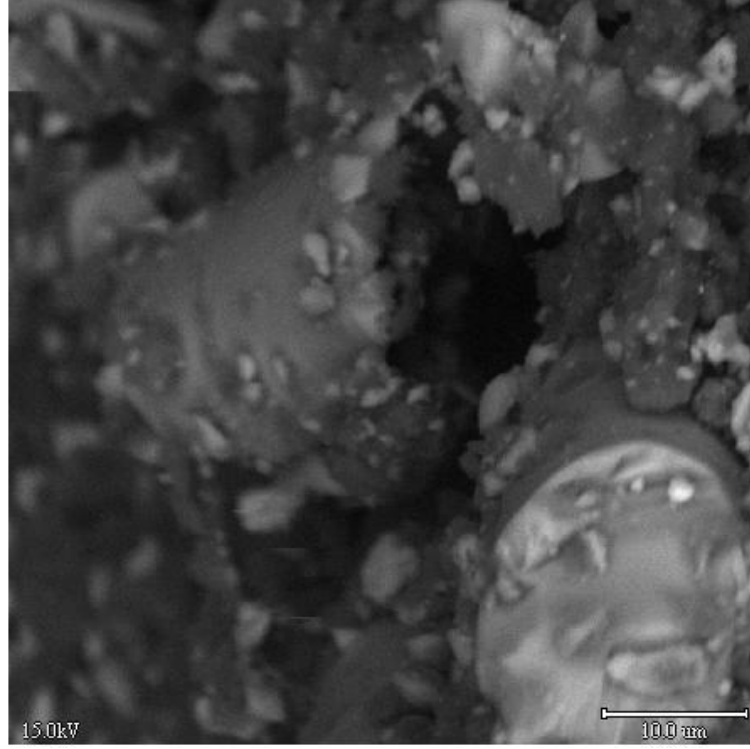
Şekil 5.15 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 350 büyütmede elde edilen görüntüsü



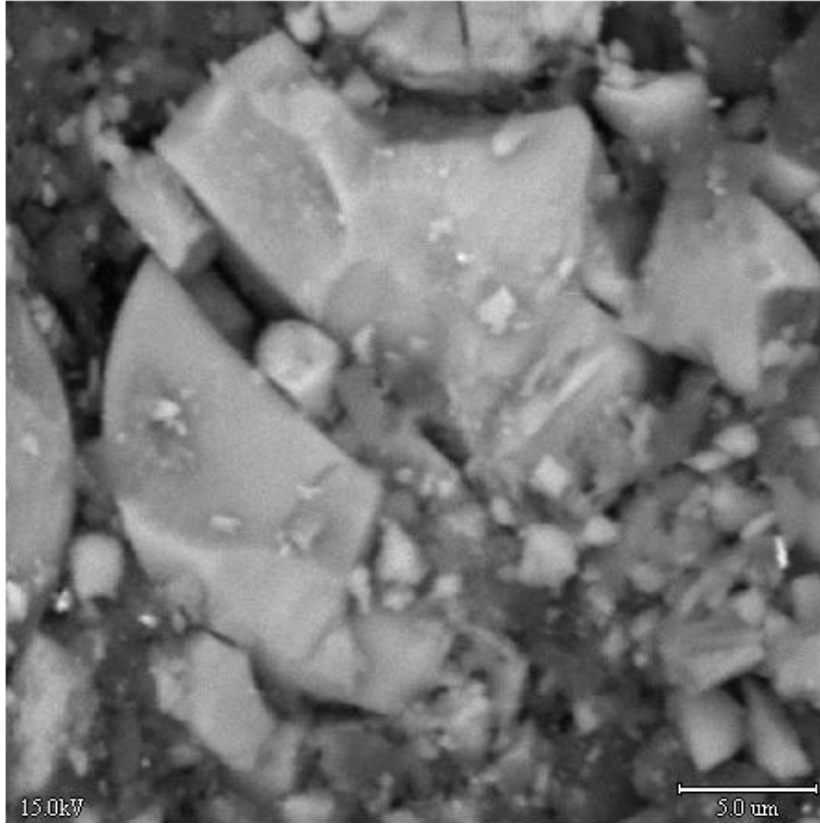
Şekil 5.16 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 750 büyütmede elde edilen görüntüsü



Şekil 5.17 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 1000 büyütmede elde edilen görüntüsü



Şekil 5.18 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 2000 büyütmede elde edilen görüntüsü



Şekil 5.19 Hacimce % 50 fiber oranına sahip numunenin 150kV ve 3500 büyütmede elde edilen görüntüsü

## 6. SONUÇLAR

SMC yöntemi ile üretilen çok bileşenli kompozitler, hibrit (melez) kompozitlerin ilk örneğidir. Termoset matris, E-Camı ve kalsit sistemleri ile desteklenmektedir. Endüstriyel uygulamalarda E-Camı 12- 15  $\mu\text{m}$  çapları arasında seçilmektedir. Kalsit sistemlerinden  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$  yaygın olarak kullanılmaktadır. Maliyet analizi yapıldığında  $\text{CaCO}_3$  tercih edilmektedir. A.B ve ülkemizde de SMC polyester reçine matris, E-Camı fiberli ve  $\text{CaCO}_3$  dolgulu hibrit sistemler olarak seçilir. SMC ( Sheet Molding Compound )'nin alternatifi BMC ( Bulk Molding Compound)'dir. Aradaki önemli fark fiber boyudur. SMC'de fiberlerin boyu 30-55 mm seçilir. ( en çok seçilen uzunluk 45-50mm'dir.) BMC'de ise maksimum fiber boyu 10 mm'yi geçmez. Dolayısıyla yük taşıyan konstrüktif amaçlı uygulamalarda SMC, yük taşımayan uygulamalarda BMC seçilir. Buradan hareketle SMC otomotiv endüstrisi, doğalgaz kutuları, bazı havacılık uygulamalarında tercih edilir. Buna karşın BMC de sıva altı elektrik kutuları, elektrik panoları, aydınlatma elemanları gibi izolatörlük isteyen yerlerde kullanılır. Ülkemizde otomotiv ve doğalgaz uygulamaları ile SMC kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Özellikle hazır bileşenin ( pestil ) karmaşık şekilli parçalar için kalıpta kullanılması büyük avantajdır. Deneylerde önemli kompozit üreticilerinden Avitaş'tan sağlanan farklı hacim oranındaki numuneler kullanılmıştır. Numunelerin mekanik karakterizasyonu yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

1. Deneylerde 9 farklı hacim oranı kullanılmıştır. Her bir numuneye çekme, 3 noktalı eğme, darbe ve yoğunluk deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca çekme ve darbe deneyinde denenen numunelerin kırılmış kesitlerinde kırık yüzey analizleri SEM mikroskobuyla yapılmıştır.
2. Cam hacim oranının artmasıyla malzemenin çekme dayancında lineer artışlar gözlenmiştir. Ayrıca fiber boyunun 10mm'den 50 mm'ye artışıyla da yine çekme dayancında artışlar gözlenmiştir. En iyi sonuç 50 mm boyda elde edilmiştir. Öte yandan 30 ila 50 mm fiber boyunda çok önemli azalmalar görülmemesine rağmen 10 mm fiber boyunda önemli azalışlar gözlenmiştir. Bu da SMC'den BMC'ye geçişi sayısal olarak simgelemektedir.
3. Benzer davranışlar 3 noktalı eğme deneyinde de gözlenmiştir. Burada eğme dayancını fiber boyu ve hacim oranının etkisi net biçimde görülmüştür. Her iki uygulamada da fiber boyunun 50mm'yi geçmemesinin sebebi dokuda birikintilerin ( yığılmaların ) önlenmesi amacıyla. Burada da en iyi koşulları 50 mm olan uygulamalar göstermiştir.



4. Darbe deneyi dinamik yükler karşısında malzeme tavrını simgeleyen deneylerdendir. Burada da gevrek olmasına rağmen cam hacim oranının artışıyla lineer artışlar gözlenmiştir. Cam fiberlerin en büyük özelliği dokuda kırılmaya karşı dayancı arttırmasıdır. Pull-out görülmesine rağmen kritik boyun dışında kalan faydalı boy nedeniyle darbe dayancının artışı açıklanabilir. Bu açıklamalar SEM, kırık yüzey fotoğraflarıyla da desteklenmiştir.
5. SMC'nin en çarpıcı özelliklerinden biri de fiber hacim oranının artmasına karşılık yoğunluğun azalmasıdır. Bu azalışın nedeni camın yoğunluğunun azalmasıdır. Bu azalışın nedeni camın yoğunluğunun kalsit sistemlerinden daha düşük olmasındandır. Böylece yüksek performans olarak tanımlanan özgül dayanç artışı sağlanır ki bu da birim kesitin taşıyacağı maksimum yükün artacağı anlamındadır.
6. Kırık yüzey resimleri incelendiğinde klasik problem sıyrılma yani pull-out gözlenmiştir. Ancak yüzey taramaları içerisinde yapılan çalışmalarda bu oranın (pull-out görülme oranı ) %10'un altında kaldığı izlenmiştir. Bu izlenimden hareketle fiber matris ara yüzey bağının doğru seçildiği ( uygun sizing) ve uygun imalat koşullarının optimizasyonunun sağlandığı sonucu varılır. Böylesi kompozitlerde önemli iki değişken ara yüzey analizleri ve en iyi imalat koşulları olduğundan, sonuçlardan optimizasyon koşullarının doğal olarak çıktığı görülmüştür.
7. Çalışmanın geliştirilmesi ile öncelikle fiber çapı, fiber türü, fiber boyu, partikül boyutu, partikül boyut çeşitliliği, curing sıcaklığı ve zamanı gibi parametrelerin değiştirilerek yeni özgün sonuçların çıkacağı açıktır.

**KAYNAKLAR**

- [1] V. Massardier-Nageotte, A. Maazouz, G. Peix, S. Bres, (2003), Methodologies for the characterization of glass fibre orientation and distribution in large components moulded from SMC, *Polymer Testing* 22 867–873
- [2] K. Derrien, J. Fitoussi, G. Guo, D. Baptiste., (2000), Prediction of the effective damage properties and failure result for SMC composites, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 185 93-107
- [3] Dima Merhi, Veronique Michaud, Emmanuelle Comte, Jan-Anders E. Manson, (2006), Predicting sizing dependent bending rigidity of glass fibre bundles in SMC, *Composites: Part A* 37 1773–1786
- [4] V. Massardier-Nageotte, F. Cara, A. Maazouz , G. Seytre, (2004), Prediction of curing behaviour for unsaturated polyesterstyrene systems used for monitoring sheet molding compounds process, *Composites Science and Technology* 64 1855–1862
- [5] Z. Jendli, F. Meraghni, J. Fitoussi, D. Baptiste, (2004), Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution, *Composites: Part A* 35 779–785
- [6] S. Y. Kim, Y. T. Im , (1997), Three dimensional thermo-viscoplastic analysis of compression molding of sheet molding compounds with fiber volume fraction prediction, *Journal of Materials Processing Technology* 63 631-636
- [7] S.-Y Fu, B. Lauke, E. Mader, C.-Y Yue, X. Hue, (2000), Tensile properties of short glass fibre and short carbon fibre reinforced PP composites, *Composites: Part A* 31 1117–1125
- [8] Shao-Yun Fu, Guanshui Xu, Yiu-Wing Mai, (2002), On the elastic modulus of hybrid particle/short fiber/ polymer composite, *Composites: Part B* 33 291-299
- [9] Seong Sik Cheon, Tae Seong Lim, Dai Gil Lee, (1999), Impact energy absorption characteristics of glass fiber hybrid composites, *Composite Structures* 46 267-278
- [10] Sanjay K. Mazumdar, Ph.D., (2002), *Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*, CRC PRESS LLC,
- [11] Rosato D., Rosato D, (2000), *Reinforced Plastics Handbook*, 3ed Elsevier
- [12] Valery V. Vasiliev Evgeny V. Morozow, (2001), *Mechanics Analysis Composite Materials*, Elsevier
- [13] Robert M. Jones, (1999), *Mechanics of Composite Materials* 2nd Edition, Taylor & Francis
- [14] George Wypych, (2000), *Handbook of Fillers A Definitive User's Guide and Databook* 2nd Ed. , ChemTec Publishing

- [15] Garmendia J, Olaizola M., Etxeberria I, Franco J. C., (1995), Mondragon I., Influence of Processing and testing conditions on the mechanical behaviour of sheet moulding compound laminates, *Journal of Material Science* 305287-5294
- [16] Mei T, Piggott M. R., ( August 1996), Mesosstructure development during molding of sheet molding compounds, *Polymer Composites*, , Vol.17, No.4
- [17] Malaczynski G. W., Cinpinsky G. J., (Mid-January 1996), Selection of adhesive system for ratio-frequency heating of structural sheet molding compound components, *Polymer Engineering and Science*, , Vol.36, No.1
- [18] Chan-Park M. B. , MCGarry F. J., (August 1996 ), Tough low profile additives in sheet molding compound, *Polymer Composites*, , Vol.17, No.4
- [19] Smith C. L. , Good F. J., Class A, (January 1996), Zero-Shrink SMC with post-consumer PET, *Plastics Engineering*,
- [20] Caprino G. , Santo L., (1998), Interpretation of size effect in orthogonal machining of composite materials. Part 2 Sheet molding compound, *Composites Part A* 29A 893-897
- [21] Derrien K. , Fitoussi J. , Guo G. , Baptiste D., (2000), Predicting of the effective damage properties and failure properties of nonlinear anisotropic discontinuous reinforced composites, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 18593-107
- [22] Dwyer J. F. , Dulieu- Smith J. M. , Stanly P., (1996), Predicting the thermoelastic response and relevant material properties of SMC, *Journal of Materials Processing Technology* 56 (1996) 655-667
- [23] Marissen R. , Linsen J., (1999), Variability of the flexural strength of sheet moulding compounds, *Composite Science and Technology* 59 2093-2100
- [24] Atodaria D. R , Putatunda S. K. , Mallic P. K., (April 1999), Fatigue Crack Growth Model and mechanism of a random fiber SMC composite, *Polymer Composites*, Vol.20, No.2
- [25] Torres A. , Marco I. , Caballero B.M. , Laresgoiti M. F. , Legerreta J. A. , Cabrero M. A. , Gonzales A. , Chomon M. J. , Gondra K., (2000), Recycling by prolysis of thermoset composites: chacterisation of the liquid and gaseous fuels obtained, *Fuel* 79 897-902
- [26] Vina j. , Belzunce F. J. , Arguelles A. , Vina I. , Canteli A. F., (1994), Mechanical properties of SMC-35 after prolonged exposure to the atmosphere, *Composites Volume 25 Number 9*
- [27] Güçlü, G. T. , (2007), Mold Design in Resin Transfer Molding (RTM) Process Using Point-Voltage Sensors, Master of Science in Mechanical Engineering Koç University
- [28] Erbil, C. E. , (2005), Cam Elyaflı Kompozit Malzemelerin Korozif Ortamda Yorulması, Ege Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü. Makina mühendisliği Anabilim Dalı

- [29] Ekrem, M. , (2006), Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D.
- [30] Karadeniz, E., (1989), Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitlerin Mukavemeti, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Güleşen, M., (2005), Fiber Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Bulunması, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [32] Demircioğlu, G., (2006), Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [33] Sabancı, Ş., (2005), Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozitlerin Enjeksiyon Yöntemi ile Üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [34] Deniz, M. E., (2005), Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri Ve Isıl İşleme Presleme Tekniği Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım Ve İmalatı, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [35] Sakin, R., (1994), Düzlemsel Rastgele Dağılımlı Keçe Elyafı Takviyeli Kompozit Malzemede Kırılma Tokluğunun Elyaf Hacmi, Elyaf Yönlenmesi Ve Deformasyon Hızı İle Değişiminin Saptanması, BAÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
- [36] Şamiloğlu, M. C., (2007), Silan Kaplamalı Kısa Cam Elyaf Poliester Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin Karakterizasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [37] Başbudak M, Akar A., (2003), Termoset Plastikler, Maya
- [38] Ersoy, M. S., (2005), Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [39] Agarwall, B.D., Broutman L.J., Chandrashekhara, K., (2006), Analysis and Performance of Fiber Composites. John Wiley & Sons, New York
- [40] Mallick, P.K., (1988), Fiber Reinforced Composites. Marcel Dekker, INC., New York and Basel, 469s.
- [41] Chawla Krisan K., (1998), Composite Materials Science and Engineering, Springer, Alabama, USA, 133-163
- [42] Schwartz Mel M., (1994), Composite Material Handbook, McGraw-Hill Inc, USA
- [43] Smallman R. E., Bishop R. J., (1999), “ Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering” Butterworth Heinemann, Oxford, UK, 350-369

- [44] TS 1398-1 EN ISO 527-1, Plastikler-Çekme Özelliklerinin Tayini-Bölüm 1: Genel Prensipler Mart 1997
- [45] TS 4650-1 /ISO 3597-1 .Plâstikler - Cam Elyaf Takviyeli - Fittile Takviye Edilmiş Reçine Çubukların Mekanik Özelliklerin Tayini, Şubat 1997
- [46] TS 4650/ISO 3597, .Plâstikler - Cam Elyaf Takviyeli - Fittile Takviye Edilmiş Reçine Çubukların Mekanik Özelliklerin Tayini, Şubat 1997
- [47] TS EN ISO 179-1 Plâstikler - Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini - Bölüm 1: Ölçü Aletsiz Darbe Deneyi, Ekim 2006
- [48] TS EN ISO 179-2 Plâstikler - Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini - Bölüm 2: Ölçü Aletli Darbe Deneyi , Ekim 2006
- [49] TS ISO 4899 Tekstil-Cam Takviyeli Termoset Plastiklerözellikler Ve Deney Metotlari, 2006
- [50] TS 702 EN ISO 62 - Plastikler- Su Absorpsiyonunun Tayini, Nisan 2002
- [51] TS EN ISO 527-4 Plâstikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 4: İzotropik Ve Ortotropik Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartlari, Şubat 2007
- [52] TS EN ISO 527-5 Plâstikler – Çekme Özelliklerinin Tayini – Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Şartları, Şubat 2007
- [53] TS EN ISO 14125 Plastik Kompozitler - Elyaf Takviyeli – Eğilme Özelliklerinin Tayini , Nisan 1999
- [54] TS ISO 1268-8, Elyaf Takviyeli Plastikler-Deney Levhaları Hazırlama Metotları-Bölüm 8: Smc ve Bmc'nin Sıkıştırma ile Kalıplanması , Mart 2007
- [55] Engineered Materials Handbook Volume 1 (Composites), (1987), ASM International, USA,107-111,122
- [56] Pişkin, E., 1999. Polimerler II Mühendislik Polimerleri. Pagay Yayıncılık, İstanbul, 145s.
- [57] Design For Success, (2009), A Design And Technology Manual For SMC/BMC, European Alliance For SMC/BMC
- [58] ASM Handbook, (2001), ASM International, USA
- [59] Kelly A. CBE, FRS,(2004), Concise Encyclopedia Of Composite Materials, Churchill College Cambrida, U.K., Pergamon Press, Oxford
- [60] Hull, D., (1992), An Introduction To Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press
- [61] Daniel I. M., Ishai O., (1994), Engineering Mechanics Of composite Materials, Oxford University Press.

- [62] Gibson R. F., (1994), Principles Of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill Inc.
- [63] Dave R. S., Loos A. C., (2000), Processing Of composite, Hanser/Gardner Publications Inc.
- [64] Harris B., (2000), Engineering Composite Materials, The Institute Of Metals, Printed By Britain.
- [65] Strong A. B., (2008), Fundamentals Of Composite Manufacturing Materials, Methods And Applications, Society Of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.
- [66] Vinson J. R., Sierakowski, R.L., (2002) The Behaviour Of Structures Composed Of Composite Materials, Kluwer Academic Publishers.
- [67] Teodorescu H., Vlase S., Cotoros D., Monteanu V., Guiman V., (2007) , Modelling Of Tensile Behaviour Of Sheet Molding Compounds, WLE.
- [68] Ünal A., Ders Notları, 2006
- [69] <http://www.camelyaf.com.tr/turkce/index.php>, 20.04.2009

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	15.03.1982	
Doğum yeri	Bursa	
Lise	1996-2000	Bursa Erkek Lisesi
Lisans	2001-2006	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007- ...	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Anabilim Dalı,

**Çalıştığı kurumlar**

2005-2006	YTÜ Öğrenci Asistanı
2006-2007	İlkerler Otomotiv A.Ş.
2009- ....	Onur Air Satın Alma Uzmanı