

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELYAF TAKVİYELİ, TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

AYLİN BEKEM

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET ÜNAL**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELYAF TAKVİYELİ, TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Aylin BEKEM tarafından hazırlanan tez çalışması 19.11.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ali GÜRKAYNAK
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ÖKSÜZ
Marmara Üniversitesi



Bu alışma, TÜBİTAK 1501 Projeleri 3080574 numaralı ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nn 2011-07-02-DOP02 numaralı projeleri ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada plastik matrisli kompozitlerin bir türü olan termoplastik matrisli kompozitler üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Termoplastik türü matris malzemeleri çeşitli fiberlerle takviyelendirilmiş ve ortaya çıkan özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışmamın her aşamasında her zaman yanımda olan ve beni destekleyen ve sadece bilimsel değil insanlık ve hayat görüşü açısından da bana büyük örnek olan danışmanım Prof. Dr. Ahmet ÜNAL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın gerek laboratuvar ekipmanları gerek hammadde altyapısını sağlayan Mir Araştırma ve Geliştirme A.Ş.' ye ve Yük. Müh. Mustafa DOĞU ve Dr. Zafer GEMİCİ'ye teşekkürü borç bilirim.

Diğer tüm konularda danışmanım kadar bana destek olan arkadaşlarım Nilüfer Evcimen DUYGULU, Burak BİROL ve Begüm Balım BAŞ' a çok teşekkür ederim.

Benim günlere gelmemi sağlayan ailem ve eşim Tanser BEKEM' e şükranlarımı sunarım.

Kasım, 2013

Aylin BEKEM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2.....	7
KOMPOZİT MALZEME TEORİSİ	7
2.1 Hacim ve Ağırlık Oranları	9
2.2 Tek Eksenli Kompozitlerin Boyuna Yöndeki Davranışları.....	11
2.2.1 İlk Dayanımın Hesaplanması.....	12
2.2.2 Yük Paylaşımı	14
2.2.3 İlk Deformasyon Sonrası Davranış	16
2.2.4 Hasar Mekanizmaları ve Dayanım	17
2.3 Enine Yönde Dayanım	20
BÖLÜM 3.....	22
TAKVİYE MALZEMELERİ.....	22
3.1 Sürekli Fiber Ürünleri	25
3.2 Fiber Demeti Birimleri.....	26
3.3 Mevcut Lifler	27
3.3.1 Cam Elyaf	28
3.3.1.1 E-camı Fiber.....	29
3.3.1.2 S-camı Fiber.....	30
3.3.2 Basalt Fiber	30
3.3.3 Aramid Fiber	31
3.3.4 Karbon Fiber	32

BÖLÜM 4.....	33
MATRİS MALZEMELERİ	33
4.1 Termoset Polimerler	34
4.2 Termoplastik Polimerler	35
4.2.1 Poliolefin Termoplastikler	35
4.2.1.1 Polietilen	36
4.2.1.2 Polipropilen	37
BÖLÜM 5.....	38
ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ.....	38
5.1 Arayüzey.....	39
5.2 Arafaz	39
5.3 Yapışma Teorisi	42
5.4 Arayüzey Silan ve Uyumlaştırıcıları	45
5.4.1 Polietilen Matriste Kullanılan Uyumlaştırıcılar	47
5.4.2 Polipropilen Matriste Kullanılan Uyumlaştırıcılar.....	48
BÖLÜM 6.....	49
SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ.....	49
6.1 Termoplastik Prepregler	50
6.2 Geleneksel Pultrüzyon (Profil Çekme) Metodu	51
6.3 Termoplastik Pultrüzyon	55
6.3.1 Termoplasik Pultrüzyon Hattı	56
BÖLÜM 7.....	58
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
7.1 Kullanılan Malzemeler	58
7.2 Numune Hazırlama ve Kodlama İşlemi	59
7.3 Mekanik Testler	61
7.3.1 Çekme Testi	62
7.3.2 Eğme ve Kayma Testi	64
7.3.3 T-Soyulma (T-Peel) Testi	65
7.3.4 Bindirmeli-Kayma (Lap-Shear) Testi	67
7.4 Fiziksel Testler	68
7.4.1 Kalsinasyon Testi	68
7.4.2 Yoğunluk Testi	69
7.4.3 Eriyik Akış Hızı (MFR)	69
7.4.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)	71
7.5 Mikroskopik Görüntüme.....	72
7.5.1 Stereo Mikroskopik Görüntüler	73
7.5.2 Taramalı Elektron Mikroskopik (SEM) Görüntüler	73
BÖLÜM 8.....	74
DENEYSEL BULGULAR	74
8.1 Matris Karakterizasyonu	74

8.1.1	MFR Sonuçları	74
8.1.2	DSC Sonuçları	76
8.2	E-camı Fiber Takviyeli Kompozitler	80
8.3	Basalt Fiber Takviyeli Kompozitler	91
8.4	Aramid Fiber Takviyeli Kompozitler	100
8.4.1	T-Soyulma Testi Sonuçları	104
8.4.2	Bindirmeli-Kayma Testi Sonuçları	106
8.5	PP/PBT Arasındaki Bağlanmanın Ölçülmesi	111
BÖLÜM 9		118
SONUÇ VE ÖNERİLER		118
KAYNAKLAR		122
ÖZGEÇMİŞ		130



SİMGE LİSTESİ

v_f	Fiberin hacmi
v_m	Matrisin hacmi
v_c	Kompozitin hacmi
V_f	Fiberin hacim oranı
V_m	Matrisin hacim oranı
w_f	Fiberin ağırlığı
w_m	Matrisin ağırlığı
w_c	Matrisin ağırlığı
W_f	Fiberin ağırlık oranı
W_m	Matrisin ağırlık oranı
ρ_f	Fiberin yoğunluğu
ρ_m	Matrisin yoğunluğu
ρ_c	Kompozitin yoğunluğu
V_v	Boşluk hacim oranı
ρ_{ct}	Kompozitin teorik yoğunluğu
ρ_{ce}	Kompozitin deneysel yoğunluğu
ϵ_f	Fiber gerinimi
ϵ_m	Matris gerinimi
ϵ_c	Kompozitin gerinimi
P_c	Kompozitin taşıdığı yük
P_f	Fiberin taşıdığı yük
P_m	Matrisin taşıdığı yük
σ_c	Kompozitin dayanımı
σ_f	Fiberin dayanımı
σ_m	Matrisin dayanımı
A_c	Kompozitin kesit alanı
A_f	Fiberin kesit alanı
A_m	Matrisin kesit alanı
E_c	Kompozitin elastisite modülü
E_f	Fiberin elastisite modülü
E_m	Matrisin elastisite modülü
σ_{cu}	Kompozitin maksimum dayanımı

σ_f	Fiberin maksimum dayanımı
σ_m	Matrisin maksimum dayanımı
ε_f^*	Fiberin kopma gerinimi
V_{min}	Minimum hacim oranı
V_{crit}	Kritik hacim oranı
δ_c	Kompozitin uzaması
δ_f	Fiberin uzaması
δ_m	Matrisin uzaması
t_c	Kompozitin kümülatif kalınlığı
t_f	Fiberin kümülatif kalınlığı
t_m	Matrisin kümülatif kalınlığı
E_L	Boyuna yöndeki elatisite modülü
E_T	Enine yöndeki elatisite modülü



KISALTMA LİSTESİ

PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PEEK	Polieter eter keton
PEI	Polietherimit
PPS	Polifenilen sülfid
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PET	Polietilen tereftalat
PBT	Polibütülen tereftalat
POM	Polioksimetilen
PMMA	Polimetil metakrilat
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HMW-HDPE	Yüksek moleküler ağırlıklı HDPE
UHMW-HDPE	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı HDPE
MDPE	Orta yoğunluklu polietilen
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen
LLDPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
VLDPE	Çok düşük yoğunluklu polietilen
MFR	Eriyik akış hızı
PPRC	Gelişigüzel dağılımlı kopolimer polipropilen
MAH	Maleik anhidrit
PE-g-MAH	MAH aşıllı polietilen
PP-g-MAH	MAH aşıllı polipropilen
EMA-GMA	Etilen-metil akrilat-glisidil metakrilat
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Tek eksenli bir kompozitin şematik gösterimi	8
Şekil 2.2 Tek eksenli cam-epoksi kompozitin kesit görüntüsü	9
Şekil 2.3 Tek eksenli kompozitlerin boylamsal davranış modeli	12
Şekil 2.4 a) Lineer, b) Lineer olmayan matrisli kompozit malzemelerin gerilme-gerinim diyagramları	14
Şekil 2.5 Tek eksenli kompozitte boyuna yönde fiberlerin taşıdığı yük yüzdesi	15
Şekil 2.6 Sünek ve gevrek fiberli ve sünek matrisli tek eksenli kompozitin boyuna yönündeki gerilme-gerinim eğrileri	17
Şekil 2.7 Tek eksenli kompozitte fiber hacim oranının fonksiyonu olarak boyuna yönde dayanımı	19
Şekil 2.8 Fiber oranının fonksiyonu olarak tek eksenli kompozitin enine ve boyuna modül diyagramı	21
Şekil 3.1 Fiber uzunluğunun kompozitin performansına etkisi	23
Şekil 3.2 Karbon fiberler için fiber çapının bir fonksiyonu olarak fiber dayanımını	25
Şekil 3.3 Çeşitli fiberlerin çekme dayanımını-modül grafiği	27
Şekil 5.1 Fiber-matris arafazı şematik diagramı ve oluşumuna katkı sağlayan faktörler	40
Şekil 5.2 Katı fiber üzerindeki sıvı polietilen damlanın oluşturduğu temas açısı	44
Şekil 5.3 a) Kötü ıslanma, b) İyi ıslanma	45
Şekil 5.4 MAH modifikasyonu sonrası olası arayüzey bağlanmaları	47
Şekil 6.1 Pultrüzyon makinesinin genel gösterimi	52
Şekil 6.2 Termoplastik pultrüzyon makinasının şematik gösterimi	57
Şekil 7.1 Jelimat	60
Şekil 7.2 Sıcak ve soğuk kademeli pres	60
Şekil 7.3 Grup B numunelerin şematik görünümü	61
Şekil 7.4 Grup C numunelerin şematik görünümü	61
Şekil 7.5 (a) Kemik ve (b) düz kenarlı çekme test numuneleri	62
Şekil 7.6 Çekme testi numuneleri klape bağlantıları: (a) pim tipi, (b) testere çene tipi	62
Şekil 7.7 Çekme numunelerinin boyutları (Boyutlandırmalar mm cinsindendir)	64
Şekil 7.8 Eğme testi	64
Şekil 7.9 T-soyulma deney numunesi: a) şematik gösterim, b) test görüntüsü	65
Şekil 7.10 a) Fiber kasnağına alüminyum folyo yerleştirilmesi, b) fiberlerin üzerine matris yerleştirilmesi, c) preslenmiş T-soyulma test numunesi	66

Şekil 7.11	T-soyulma testi eğrisi	66
Şekil 7.12	Bindirmeli-kayma testi numunesi şematik görünümü	67
Şekil 7.13	Bindirmeli-kayma test numunesi: a) hazırlama, b) test sonrası görüntüleri	68
Şekil 7.14	Tipik bir MFR cihazı şematik görünümü	70
Şekil 7.15	DSC cihazı şematik görünümü	71
Şekil 7.16	DSC çıktısı olan ısı akışı-sıcaklık grafiği örneği	72
Şekil 8.1	HDPE, U1 ve %15 ve %30 U1 ile harmanlanmış HDPE DSC eğrileri	77
Şekil 8.2	HDPE, U2 ve %15 ve %30 U2 ile harmanlanmış HDPE DSC eğrileri	77
Şekil 8.3	PPRC, U3 ve %15 ve %30 U3 ile harmanlanmış PPRC DSC eğrileri	78
Şekil 8.4	PPRC, U4 ve %15 ve %30 U4 ile harmanlanmış PPRC DSC eğrileri	79
Şekil 8.5	a) Çekme testi öncesi numune, b) çekme testi sonrası numune şekli	81
Şekil 8.6	E-cam/HDPE türü kompozitlerin çekme dayanımları	82
Şekil 8.7	E-cam/PPRC türü kompozitlerin çekme dayanımları	83
Şekil 8.8	HDPE matrisli kompozitlerin, ortalama teorik değer karşılama oranları	86
Şekil 8.9	PPRC matrisli kompozitlerin, ortalama teorik değer karşılama oranları	87
Şekil 8.10	Farklı kopma bölgelerindeki kırık yüzey SEM görüntüleri: a) PP-uyumlaştırıcı (%10) kullanımında cam elyaf – 500x, b) PE – cam elyaf (uyumlaştırıcı %0) – 500x, c) PE-uyumlaştırıcı (%35) kullanımında cam elyaf – 200x, d) PE-uyumlaştırıcı (%35) kullanımında cam elyaf – 750x	89
Şekil 8.11	Yapıştırıcı oranı %40 olan kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri (Vf:%10): a) U3 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, b) U3 kodlu kompozit-SEM, c) U4 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, d) U4 kodlu kompozit - SEM	90
Şekil 8.12	Grup A ve B' de HDPE için çekme dayancına fiber hacim oranı grafiği	91
Şekil 8.13	Grup A ve C' de HDPE için çekme dayancına fiber hacim oranı grafiği	92
Şekil 8.14	Grup A ve B' de PPRC için çekme dayancına fiber hacim oranı grafiği	93
Şekil 8.15	Grup A ve C' de PPRC için çekme dayancına fiber hacim oranı grafiği	94
Şekil 8.16	HDPE kompozitlerin teorik dayanımı karşılama oranları	96
Şekil 8.17	PPRC kompozitlerin teorik dayanımı karşılama oranları	96
Şekil 8.18	50X' te alınmış A-PE SEM görüntüsü	97
Şekil 8.19	A-PE SEM görüntüsü: a) 500X, b) 1000X	97
Şekil 8.20	B-PE-U1 SEM görüntüsü: a) 750X, b) 3500X	97
Şekil 8.21	C-PE-U2 SEM görüntüsü: a) 50X, b) 1000X	98
Şekil 8.22	A-PP SEM görüntüsü: a) 500X, b) 1000X	98
Şekil 8.23	B-PP-U3 SEM görüntüsü: a) 50X, b) 1000X	98
Şekil 8.24	B-PP-U4 SEM görüntüsü: a) 35X, b) 350X, c) 500X, d) 1000X	99
Şekil 8.25	C-PP-U3 SEM görüntüsü: a) 350X, b) 750X	99
Şekil 8.26	Aramid fiberli numunelerin yerleşim düzeni ve sınıflandırılması	100
Şekil 8.27	Aramid fiberli numunelerin teorik değeri karşılama oranları	103
Şekil 8.28	Aramid fiber takviyeli kompozitin T-soyulma dayanımı sonuçları	104
Şekil 8.29	Stereo mikroskop görüntüleri: a) A-2, b) B-U1-2-iç, c) B-U2-2-iç	105
Şekil 8.30	Aramid fiberli kompozitlerin SEM görüntüleri: a) B-U1-2-iç, b) B-U2-2-iç	105
Şekil 8.31	Bindirmeli-kayma testi numune türlerinin şematik görünümü	106
Şekil 8.32	Bindirmeli kesme dayanım ve çekme dayanım grafiği	106

Şekil 8.33	Kesit görüntüleri (15X): a) A-PE, b) B-PE-U1-4, c) B-PE-U2-4.....	108
Şekil 8.34	Kesit görüntüleri (100X): a) B-PE-U1-4, b) B-PE-U2-4.....	109
Şekil 8.35	Kırık kesit görüntüleri: a) B-PE-U1-4, b) B-PE-U2-4.....	110
Şekil 8.36	Şematik kırık kesit görünümü: a) B-PE-U1-4, b) BF-PE-U2-4.....	110
Şekil 8.37	PP/U4/PBT bağlantılarının bindirmeli-kayma dayanımları.....	112
Şekil 8.38	PP/U4/PBT bağlantılarının kırık görüntüleri: a) TL, b) %50, c) %40, d) %30, e) %20, f) %10.....	113
Şekil 8.39	PP/U3/PBT bağlantılarının bindirmeli-kayma ve tabakalar arası kayma dayanım değerleri.....	114
Şekil 8.40	PP/U3/PBT bağlantılarının eğme dayanımı ve sehim değerleri.....	115
Şekil 8.41	PP/U3/PBT bağlantılarının kırık görüntüleri: a) TL, b) %30, c) %20, d) %10, e) %5.....	116



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Cam elyafı/polyester kompozit malzemenin fiber türüne göre dayanım özellikleri.....	24
Çizelge 3.2 Çeşitli cam kompozisyonları.....	28
Çizelge 4.1 Termoset ve termoplastik arasındaki genel farklılıklar.....	34
Çizelge 7.1 Çalışmada kullanılan matris ve uyumlaştırıcıların içerik ve akışkanlık özellikleri.....	59
Çizelge 8.1 MFR test sonuçları.....	75
Çizelge 8.2 Matris polimerlerin DSC verileri.....	80
Çizelge 8.3 Uyumlaştırıcı oranına göre ortalama çekme dayanımları ($V_f=\%5$).....	85
Çizelge 8.4 E-camı fiberli numunlerin elastisite modülü ve uzama değerleri ($V_f=\%5$).....	86
Çizelge 8.5 Basalt fiberli numunlerin elastisite modülü ve uzama değerleri ($V_f=\%5$).....	95
Çizelge 8.6 Aramid fiberli kompozitlerin çekme testi verileri.....	102

**ELYAF TAKVİYELİ, TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Aylin BEKEM

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Kimyasal ve/veya fiziksel özellikleri açısından birbirinden farklı malzemelerin aralarında ara yüzey oluşturarak meydana getirdikleri yeni malzeme grubu olan kompozit malzemelerin en önemli avantajı özelliklerinin kendisini oluşturan diğer bileşenlerden üstün olmasıdır.

Kompozit malzemelerin yüksek mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler sunması kullanım alanlarını genişletmektedir. Kırık cam elyafli kompozitler, otomotiv endüstrisi başta olmak üzere çoğu alanda kullanılırken; sürekli elyafli kompozitler daha yüksek mekanik özelliklerin gerektiği uygulamalarda büyük öneme sahiptir.

Günümüz plastik matrisli kompozit uygulamalarında termoset polimerlerden tercih edilmektedir. Bunun nedeni epoksi, vinil ester, polyester gibi termoset polimerlerin elyaf malzemeleri iyi ıslatması ve kolaylıkla yapışmasının gerçekleşmesi; dolayısıyla fiber-matris arayüzey bağlantısının kuvvetli olmasının sağlanmasıdır. Bunun yanı sıra termoset kompozitlerin proses edilmesi kolaydır, dolayısıyla üretim el yatırması gibi basit yöntemlerle bile gerçekleştirilebilmektedir.

Plastik kompozit uygulamalarının özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yapılan yeni uygulamalarda termosete göre daha iyi özellikler gösteren diğer bir plastik türü olan termoplastikler kullanılmaya başlanmıştır. Termoplastik polimerler yüksek kimyasal

dayanım, yüksek gerinim, esneklik, hafiflik ve geri dönüşüm gibi pek çok avantaja sahiptir. Ancak bunlarda yaşanan başlıca problem arayüzeyin oluşumunu sağlayacak ıslatma ve yapışmanın yetersiz olması; buna bağlı olarak mekanik özelliklerden beklenen performansların alınamamasıdır. Ayrıca termoplastik kompozit üretimi, termoset kompozit üretimden çok daha karmaşık ve makineleşmiş (örneğin enjeksiyon, ekstrüzyon gibi) prosesler gerektirmektedir. Termoplastik hammaddesi katı durumda olmasından ötürü, bu hammaddenin öncelikle ergitilip daha sonra takviye malzemesi ile buluşturulmasını gerekmektedir. Bu işlem sırasında yüksek viskozitedeki termoplastik eriği matrisin, elyaflar üzerinde yayılımını ve takviye düzenini olumsuz yönde etkilemektedir. Elyaflarda topaklaşma ve ürün homojenizasyonunda bozulmalar bu esnada görülen hata türlerindendir.

Termoplastik matrisin sebep olduğu bu gibi zorluklar bu tür kompozitlerin üretimleri günümüze kadar geciktirmiştir. Fakat günümüzde yeni geliştirilen gerek kimyasallar gerekse de üretim teknolojileri sayesinde bu zorlukların üstesinden gelinmekte ve termoplastik matrisin sağladığı avantajlar gün yüzüne çıkmaktadır. Bu sayede bugün endüstride üretimi yapılan termoplastik kompozit uygulamaları enjeksiyon ve ekstrüzyon prosesiyle kırık cam elyafı kullanımıyla gerçekleşir hale gelmiştir. Ancak; sürekli elyafli kompozit üretimine izin veren proses dünyada yeni gelişmekte olup, henüz ülkemiz endüstrisinde yerini alamamıştır. Bunun sebebi; sürekli elyaflarda elyaf konsantrasyonunun fazla olmasından dolayı, yüksek viskozitedeki eriyik termoplastiğin fiberlere nüfuzunun proses boyunca homojen olarak sağlanamaması ve fiber-matris arayüzey ıslanma ve bağlanma sorunlarının oluşmasıdır.

Bu çalışmada termoplastik polimerlerden en ucuz ve en düşük yoğunluğa sahip olan polietilen ve polipropilen matris malzemesi olarak kullanılıp, dayanım ve maliyet yönünden optimum sonuçlar sunan sürekli tarzda E-camı, E-camına alternatif yeni bir fiber türü olan basalt fiber ve yüksek performans özellikleri sunan aramid fiber ile takviyelendirilmiştir. Arayüzey özelliğinin iyileştirilmesi için çeşitli uyumlaştırıcılar denenerek, fiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak ideal uyumlaştırıcı oranları saptanmış ve polietilen ve polipropilen matrisli kompozit malzemelerin ara yüzeyi oluşumunun iyileştirilmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompozit, termoplastik, polietilen, polipropilen.

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIAL

Aylin BEKEM

Department of Metallurgical and Materials Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

The most important advantage of the composite, a new set of material which is formed by creating an interface between at least two materials with different chemical and/or physical properties, is to exhibit superior properties than its constituents.

Composite materials have wide application areas due to its higher mechanical, chemical and physical properties. Composites with chopped glass fiber have been using in many areas like automobile and marine industries, while continuous fiber composites have applications in the areas require higher mechanical properties.

In today's plastic matrix composite applications, thermosetting polymers are preferred. This is because thermosetting polymers such as epoxy, vinyl ester and polyester have better wetting and easier adhesion on fiber materials, therefore strong connection between fiber-matrix interfaces ensure. Additionally, it is easy to process thermoset composites, even if with a simple methods such as hand lay-up technic.

Thermoplastics, another type of plastic exhibiting better properties than thermosetting polymers, have been used in new applications with the purpose of improvement of plastic composites. Thermoplastic polymers have many advantages such as higher chemical resistance, higher strain, flexibility, light weight and recycling. However, the main problems in these are insufficient wetting and adhesion that would form

interface, due to this expected performances from the mechanical properties, failure. Also production of thermoplastic composites is much more complex than thermosetting composite production and required mechanized processes (eg., injection molding, extrusion molding, etc.). Because thermoplastic raw materials are in the solid state, these raw materials have to be first melted and then consolidated with reinforcing materials. During this process, melt of thermoplastic matrix at high viscosity effect a negative role on matrix dispersion on fibers and arrange of reinforcement. Agglomeration in fibers and product homogenization are versions of failures in the meantime.

Such difficulties caused by thermoplastic matrix have delayed the production of these composites until today. However, thanks to new developed chemicals as well as production technologies overcome these difficulties today and the advantages of thermoplastic matrix can appear on composites. By this way, the production in the today's industry of thermoplastic composite applications has been possible by extrusion and injection processes with the use of chopped glass fibers. However, the process that allows the production of continuous fiber composite is new developing in the world, and could not take a part in our industry yet. The reason for this is higher fiber concentrations in continuous fibers, so thermoplastic melt with higher viscosity could not penetrate to fibers uniformly throughout the process and fiber-matrix interfacial wetting and bonding problems occur.

In this study, polyethylene and polypropylene, the cheapest thermoplastic polymers with lowest densities, were used as the matrix material. These were reinforced with continuous E-glass which offers optimum strength and cost results, basalt fiber as a new type of fiber alternative to E-glass and aramid fiber as a high performance fiber. To improve interfacial adhesion various compatibilizers were applied and some physical and mechanical tests were done. The ideal compatibilizer ratios were determined by comparing results and formation of interface was improved in polyethylene and polypropylene matrix composite materials.

Keywords: Composite, thermoplastic, polyethylene, polypropylene.

1.1 Literatür Özeti

Polimer matrisli kompozitler sahip oldukları yüksek dayanım/ağırlık oranı ve korozyon direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı günümüzde uçak [1, 2], denizcilik [3], otomotiv [4], inşaat [5] ve diğer alanlarda önemli bir rol almaktadır [6]. Özellikle termoplastik bazlı malzemeler görece kolay prosesi ve geridönüşebilirliği sayesinde günlük hayatın çoğu uygulamalarında artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır [7, 8]. Polietilen (PE) ve polipropilen (PP), dünyada kullanım alanı en fazla olan ve en çok kullanılan termoplastik malzemelerdir [9]. Bunun başlıca nedenleri; toklukları, sifıra yakın nem absorpsiyonları, mükemmel kimyasal soylulukları, düşük sürtünme katsayıları, görece kolay prosesi ve olağandışı elektriksel özellikleridir. Bu sayede her türlü ambalaj ve paketlemede, boru ve bağlantı parçalarında, film uygulamaları ve torbalamada ve vida contaları gibi pek çok alanda kullanım bulmaktadırlar [10, 11].

Bu termoplastik malzemeler kompozit yapımında matris malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Çeşitli fiber veya dolgular takviye elemanı olarak kullanılarak malzemenin dayanım, rijitlik, sertlik gibi özelliklerin artması ve maliyetinin düşürülmesini sağlanmaktadır [12]. Doğal ve sentetik fiberlerden üretilen termoplastik bazlı kompozitler mevcuttur [13-16]. Cam fiberler ise düşük maliyeti, sentetik fiberlere kıyasla oldukça iyi mekanik özelliklerinden dolayı en çok kullanılan takviyedir. Cam fiber takviyeli polimerler yüksek dayanım ve düşük ağırlık gibi üstün sahiptir ve bu sayede otomobil ve uçak endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [17, 19].

Sürekli elyaf takviyeli termoset plastik kompozitler uzun zamandır ticari olarak kullanımı olan malzemelerdir. Borular, tanklar, tekneler, vb. gibi yüksek hacimli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. Ayrıca bu malzemelerin yüksek performanslıları uçak, uzay ve spor malzemeleri gibi kritik uygulamalar için kabul görmüştür [20, 21] Bu malzemelerin iki önemli dezavantajı çözücü kullanımı gerektirmesi ve kullanım sonrası malzeme geri dönüşümünün olmamasıdır. Çeşitli termoplastik matris malzemeleri bu iki büyük sorunu çözmek için kullanılmaktadır. Düşük maliyetli ürünlerinde ürün fiyatını kabul edilebilir bir seviyede tutmak ve aynı zamanda diğer malzemeler ile rekabet edebilecek kalitede ürün elde etmek önemlidir. Bu uygulama alanında termoplastik matris kompozitler şimdiye kadar termoset kompozitler kadar bir yaygın ticari kullanım kazanmış değildir. Günümüzde kullanılan kompozitlerin %85'i halen termoset matrisli kompozitler oluşturmaktadır. Buna rağmen termoplastik kompozitler çok çeşitli uygulamalarda kullanılan, endüstriyel ürünler halini almıştır. Bu malzemeler günümüzde Amerika' da yıllık 455 milyon kilogramın üzerinde pazara sahiptir. Termoplastik kompozit pazarının gelecek yıllarda şiddetli bir büyümesi beklenmektedir [22].

Günümüzde çoğu termoplastik kompozit malzeme üretiminde kısa cam fiberler ile (genellikle ağırlıkça %10-40 fiber içeriğinde) polipropilen, polietilen, naylon, polikarbonat, polyester gibi düşük maliyetli polimer matris birleştirilerek kullanılmaktadır. Bu birleştirilmiş ürünler genellikle kırılmış cam fiber ve polimerin ekstrüderde harmanlanması ve çıkan ekstrüde edilmiş kompozit çubuğundan pelet elde edilmek üzere kırılıp, enjeksiyonla kalıplanması ile üretilmektedir. Ancak bu işlem fiber boyunu çok kısaltmaktadır (genellikle <2 mm). Takviye fiberin tüm avantajlarını göstermese bile, bu kompozitler takviye edilmemiş matris polimerinden daha iyi özelliklere sahiptir. Kullanılan polimere bağlı olarak bu ürünler gram başına 0,85-1,50 dolara satılmaktadır [22].

Daha uzun fiberli (~10-13 mm) pelet ürünler ve cam termoplastik kompozit levha ürünler ticari olarak mevcuttur. Bu ürünlerin avantajı fiberin özelliklerini daha iyi iletmesi ve böylece daha yüksek yapısal performans sağlamasıdır. Bu ürünleri üretmek için kullanılan prosesler standart harmanlamadan daha pahalıdır ve genellikle gram

başına 1,20 ila 3,00 dolardır. Bu malzemelerin Dünya genelindeki pazarının 28 milyon kg olduğu tahmin edilmektedir [22]. Sürekli fiberli termoplastik kompozitlerin pazarı ise bu ürünlerin üretim maliyetinin fazla olması nedeni ile çok sınırlıdır. Termoplastik kompozit ürünlerde karbon, aramid ve diğer fiberler gibi cam haricindeki fiberli ürünlerin piyasası da yüksek maliyetler nedeni ile kısıtlıdır [23].

Son yıllarda yarı-yapısal ve mühendislik uygulamalarında cam fiberli polipropilen kompozit sistemlerinin kullanımı giderek artan büyüme göstermiştir. Bu termoplastik matrisli kompozit sistemleri, yüksek tokluk ve sınırsız raf ömrü avantajları ile birlikte işleme kolaylığına da sahiptir. Ayrıca, geri dönüşümleri ileri uygulamalar için güçlü bir itici kuvvet olarak kabul edilmektedir.

Termoplastik bir malzeme olan polipropilen esaslı kompozit sistemleri giderek genişlemekte ve büyüyen bir aralığa sahip olmaktadır. Bu aralık takviye boy oranına göre kategorilere ayrılabilir [24]:

- Enjeksiyonla kalıplama için inorganik dolgularla karıştırılmış PP
- Enjeksiyon kalıplama için kısa fiber takviyeli PP (ortalama 1 mm civarında fiber boyunda)
- Enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama için uzun fiber takviyeli PP (1-25 mm fiber boyunda)
- Basmalı kalıplama için cam keçe olarak bilinen gelişigüzel, düzlemsel fiber takviyeli PP
- Basmalı kalıplama için sürekli fiberli PP.

Listeden aşağı doğru inildiğinde daha yüksek performanslar elde edilmektedir. Ancak daha karmaşık ve zaman alıcı üretim yüzünden yükselen maliyetler de ortaya çıkmaktadır. Ancak yüksek dayanım/hammadde maliyet oranı bakımında karşılaştırıldığında sürekli cam elyaf ve polipropilenden yapılan kompozitler umut verici düşük maliyetli malzemelerdir. Maliyeti arttıran ve bu malzemelerin sınırlı kullanımına en önemli bir nedeni polipropilenin yüksek viskozitesi nedeniyle fiberleri ıslatma zorluğu ve dolayısıyla ortaya çıkan kötü kalitede malzeme oluşumudur. Bu malzemenin üretimi ile ilgili zorlukların üstesinden gelmek için, fiber ile matris malzemelerinin

birleşmesini sağlayıcı, karmaşık prosesler [25] son on yıl boyunca geliştirilmiştir. Prosesteki gelişmeler fiberin matris tarafından ıslatılmasını arttırmak üzerine olmuştur. Ön emdirilmesi yapılmış malzemeler yapıya uygulanmadan önce tamamen fiber matris tarafından ıslatılırken, kendinden emdirilmiş malzemelerde nihai birleşme ürün son halini alırken gerçekleştirilmektedir. Ancak kullanılan bu karmaşık yöntemler ürünlerin maliyetinin artmasına sebep olmaktadır.

Daha basit prosesler kullanarak fiberleri ıslatmanın diğer bir yolu da termoplastik matrisin viskozitesini yükseltici katkılar (uyumlaştırıcılar) kullanmaktır. Son zamanlarda piyasada farklı üreticilere ait termoplastik uyumlaştırıcılar mevcuttur. Termoplastik matrisin viskozitesinin bu uyumlaştırıcılar vasıtasıyla düşürülmesi sayesinde daha akışkan hale gelen matris fiberlere daha iyi şekilde nüfuz edebildiği gibi aynı zamanda fiberlere yapışması da artmaktadır. Böylece yüksek performans özellikleri sergilenen, aynı zamanda maliyetleri yüksek olmayan ürünlerin üretimi mümkün olabilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde Dünya çapında kullanımı yaygın olan kompozit malzemeler düşük ve orta düzey performans özelliğine sahip olanlar genellikle E-camı takviyeli, yüksek performanslı olanlar ise aramid veya karbon fiber takviyeli olmak üzere termoset matrisli malzemelerdir. Bu termoset malzemeler epoksi, vinilester, polyester ve furan gibi reçinelerdir. Bu malzemeler özellikle sürekli elyafların kullanıldığı pultrüzyon, elyaf sarma gibi yüksek fiber hacim oranının eldesine elverişli yöntemlerde: yüksek mekanik dayanım, hafiflik, mükemmel elektrik yalıtkanlığı, aşınma dayanımı ve metal malzemelerden daha iyi korozyon dayancısı kazanmaktadırlar.

Fakat termoset malzeme bu avantajlarının yanında termoplastik kompozitlere göre pek çok dezavantaja da sahiptir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Rijit ve kırılğandırılar.
- Geri dönüşümü olmayan malzemelerdir.
- Kurlenme gösterdiklerinden prosesi zordur.

- Montajları ve birleştirilmeleri zordur (kaynak türü birleştirme yöntemleri mümkün değildir).
- Bakım ve onarımı zordur.
- Korozyon direnci ve kimyasal dayanımı (termoplastiklere göre) düşüktür.
- Pahalıdır.

Termoset malzemelerin bu dezavantajlarından dolayı termoplastik malzemenin matris malzemesi olarak kullanımı fikri ortaya çıkmıştır. Ancak termoplastik matris yüksek eriyik viskozitesine sahip olduğundan fiberler demetlerini çok iyi ıslatamamaktadır. Ayrıca yüksek kimyasal dirence sahip olmasından dolayı fiber malzemesine bağlanma ve yapışması da güçtür. Bu gibi fiber-matris arayüzey sorunlarından ötürü termoplastik matrisli kompozitler gelişmemiştir.

Bu çalışmada, poliolefin türü termoplastik polimerler olan polietilen ve polipropilen matris malzemesi olarak tercih edilerek; E-camı, basalt ve aramid fiberler ile takviyelendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca fiber-matris arayüzeylerinde ıslatma ve bağlanma özelliklerinin arttırmak için çeşitli ticari uyumlaştırıcı alternatifleri farklı oranlarda denenmiştir. Bu sayede termoset matrisli kompozitlerle yarışabilecek duruma gelmiş termoplastik matrisli kompozit malzemeler üretilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Günümüze kadar plastik matrisli kompozit üretiminde iyi arayüzey oluşturan termoset reçineler kullanılarak yüksek mekanik dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Fakat bu tür reçinelerin sahip olduğu bazı dezavantajlar ve artan ihtiyaçlar doğrultusundan bu dezavantajların ortadan kaldırılması için termoplastik matrisli kompozitler geliştirilmeye başlanmıştır. Ancak özellikle poliolefin türü termoplastik malzemelerde kompozit üretimi için en önemli sorun fiber-matris arayüzey oluşumunda yaşanmaktadır.

Bu çalışmada poliolefin türü termoplastik malzemelerden olan polietilen ve polipropilen plastikler E-camı, basalt, aramid fiberlerle takviye edilerek mevcut mekanik özellikleri saptanmış ve bu özelliklerin geliştirilmesine çalışılmıştır. Bu

kapsamda farklı ticari polimer uyumlaştırıcıları farklı yöntemlerle hem doğrudan fiber-matris arayüzeyinde hem de matris malzemelerine harmanlanarak kullanılmıştır. Uyumlaştırıcı türü ve oranlarında optimizasyonlar yapılarak en iyi değerleri veren koşullar belirlenmiştir.

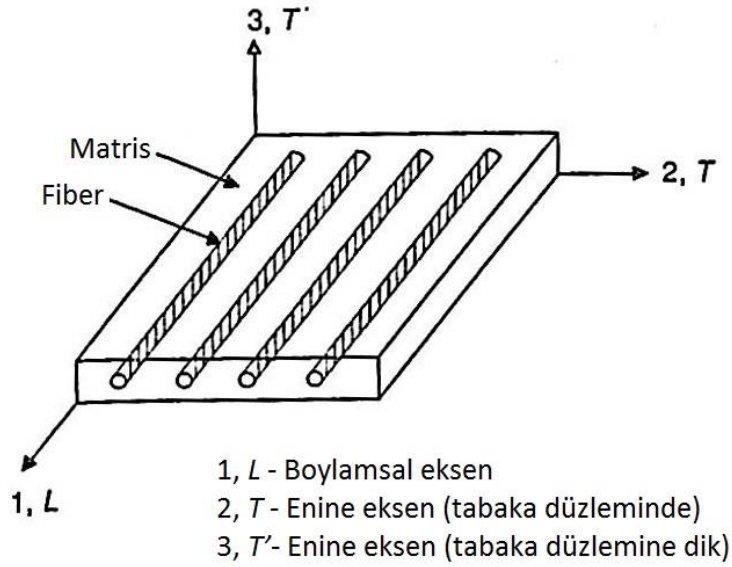


KOMPOZİT MALZEME TEORİSİ

Fiber takviyeli kompozitler en eski ve halen en yağın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. Bunlar yüksek yapısal potansiyele sahiptirler. Çoğu yapısal elemanlar veya tabakalar ayrı katmanlardan oluşan fiberli kompozitlerdir. Her tabaka veya katman aynı bileşenlerden (örneğin: reçine ve cam) yapılmaktadır. Ancak bunlardan her biri;

- bileşen malzemelerinin hacim oranları,
- sürekli veya süreksiz fiberler, dokuma ve dokumasız takviyeler gibi kullanılan takviyenin şekli,
- referans alınan eksene göre fiberlerin oryantasyonuna göre

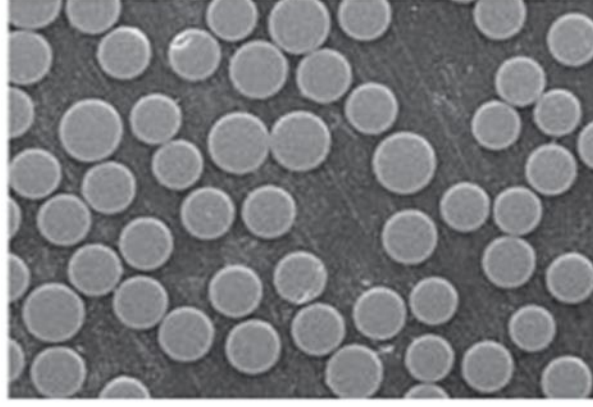
katmandan katmana değişiklik gösterebilir. Ayrıca farklı fiber ve/veya matris malzemelerinden oluşan hibrit tabakalarda üretilebilir. Bu gibi farklılıklara sahip tabakların özellikleri büyük farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle en küçük yapısal elemanın analiz ve tasarımı için her tabakanın özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Matris içerisinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş fiberlerden oluşan tek eksenli kompozit tabakaların veya çok katmanlı kompozitlerin temeli oluşturmaktadır [26-33]. Şekil 2.1' de bu yapının şematik çizimi yer almaktadır.



Şekil 2.1 Tek eksenli bir kompozitin şematik gösterimi

Tek eksenli birkaç tabaka belirli bir yönlenme düzeninde biraraya getirerek oluşturduğu tabakalı yapıda beklenen dayanım ve rijitlik değerleri karşılanmaktadır. Tek eksenli bir kompozitin her katmanı bir katman, kat veya lamina olarak adlandırılmaktadır. Bu katmanlarda fiberlere paralel yön boylamsal eksen (1, L) olarak adlandırılırken, fiberlere dik yön enine eksendir (2-3 düzleminde herhangi bir yön).

Şekil 2.1' de gösterilen katmanda sadece bir kat fiber görülmektedir. Pratikte bu sadece bor fiber gibi kalın çaplı fiberler için mümkündür. Diğer fiberlerden yapılan katmanlarda gerçek katman kalınlığı boyunca birkaç fiber üst üste konumda yerleşmektedir. Şekil 2.2' de tek katmandan alınmış bir kompozitin kesiti görülmektedir. Fiberler kesit boyunca gelişigüzel şekilde dağılmıştır ve bazı bölgelerde birbirleri ile temas halindedir. Katmanlardaki bu tip fiber dağılımı çoğu fiber-reçine sistemleri için benzerdir. Bu katmanlar genellikle tek uçlu veya çok uçlu roving (bükümsüz fiber demeti) demetlerinin matriste ıslanması sonucu oluşmaktadır. Tipik bir fiberin çapı $10\ \mu\text{m}$ civarında iken, bir katmanın kalınlığı $0,1\ \text{mm}$ ' den genellikle fazladır. Dolayısıyla katman kalınlığı-fiber çapı oranı genellikle $10'$ dur.



Şekil 2.2 Tek eksenli cam-epoksi kompozitin kesit görüntüsü

Kompozitin yapısından dolayı tek eksenli kompozitler boyuna ve enine yönlerde farklı özellikler göstermektedir. Bu nedenle tek eksenli kompozitler ortotropiktir. Bu kompozitlerde fiberlere paralel olunan boylamsal yönde en yüksek özellikler görülmektedir. Kesitteki gelişigüzel fiber dağılımından dolayı diğer iki yönde (2, 3) malzeme davranışı benzerdir. Bu nedenle tek yönlü kompozit veya katman enine ekseninde(2-3 düzleminde) izotropik olarak düşünülebilir.

2.1 Hacim ve Ağırlık Oranları

Kompozitlerin özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden bir tanesi takviye ve matris malzemelerinin oranlarıdır. Bu oranlar ağırlık oranı veya hacim oranı cinsinden verilebilir. Ağırlık oranı üretim sırasında veya üretim sırasında deneysel yollar ile basitçe bulunabilir. Fakat hacim oranı özellikle kompozit malzemelerin teorik analizinde kullanılmaktadır. Bu nedenle ağırlık oranı ve hacim oranları arasında dönüşüm yapılması gerekmektedir. Bu ifadeler iki fazlı malzemeden türetilmekte ve daha sonra çok fazlı bir malzemeye genellenmektedir [26-33].

Fiber hacmi v_f ve matris hacmi v_m ' den oluşan kompozit malzemenin hacminin v_c olduğunu ve bunların ağırlık oranlarının da aynı sırayla w_f , w_m ve w_c olduğunda hacim ve ağırlık oranları Eşitlik 2.1a, b, c ve d' deki gibi tanımlanmaktadır (V ve W, hacim ve ağırlığı temsil etmektedir):

$$v_c = v_f + v_m \quad (2.1a)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad \text{ve} \quad V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.1b)$$

$$w_c = w_f + w_m \quad (2.1c)$$

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad \text{ve} \quad W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (2.1d)$$

Ağırlık ve hacim oranları arasındaki dönüşümü saptamak için kompozit malzemenin yoğunluğunun ρ_c elde edilmesi gereklidir. Kompozit malzemenin yoğunluğu bileşenlerinin yoğunlukları ve bunların hacim ve ağırlık oranlarından basitçe çıkmaktadır. Son olarak bunlar Eşitlik 2.1c' deki ağırlık eşitliğine yerleştirildiğin Eşitlik 2.2 elde edilmektedir:

$$\rho_c v_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2'nin her iki tarafını hacim oranlarını temsilen Eşitlik 2.1b' ye bölündüğünde Eşitlik 2.3 elde edilmektedir:

$$\rho_c = \rho_f \frac{v_f}{v_c} + \rho_m \frac{v_m}{v_c} \quad (2.3a)$$

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (2.3b)$$

Eşitlik 2.1a'deki benzer işlemler ile kompozit malzemenin yoğunluğu ağırlık oranı cinsinden Eşitlik 2.4' deki gibi bulunabilir:

$$\rho_c = \frac{1}{(W_f/\rho_f) + (W_m/\rho_m)} \quad (2.4)$$

Ağırlık oranı yoğunluk ve hacim cinsinden düşünülerek ağırlık ve hacim oranlarına Eşitlik 2.5' teki gibi dönüştürülebilir:

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} = \frac{\rho_f v_f}{\rho_c v_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (2.5a)$$

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (2.5b)$$

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (2.5c)$$

Eşitlik 2.1 veya 2.5' deki gibi ters çevrilerek Eşitlik 2.6 elde edilir:

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f \quad (2.6a)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} W_m \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.3-2.6 sadece iki bileşenli kompozit için türetilmiştir ancak istenilen sayıda bileşene genellemek mümkündür. Bu genelleştirme Eşitlik 2.7' de verilmiştir:

$$\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (2.7a)$$

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (W_i / \rho_i)} \quad (2.7b)$$

$$W_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} V_i \quad (2.7c)$$

$$V_i = \frac{\rho_i}{\rho_c} W_i \quad (2.7d)$$

Ancak Eşitlik 2.5 ile ağırlık oranından hesaplanan kompozitin teorik yoğunluğu her zaman deneysel olarak bulunan yoğunlukla örtüşmeyebilir. Bu ise kompozitte boşlukların olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Yoğunluklar arasındaki bu fark boşluk veya gözenektir. Kompozitin teorik yoğunluğu ρ_{ct} ve deneysel yoğunluğu ρ_{ce} ile ifade edildiğinde gözenek hacmi V_v Eşitlik 2.8 ile ifade edilebilir:

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (2.8)$$

Kompozitlerde gözenek içeriği mekanik özelliklerinin önemli ölçüde etkilenmesine sebep olabilmektedir. Yüksek gözenek içeriği; düşük yorulma dayanımı, su penetrasyonuna aşırı duyarlılık ve hava şartlarından etkilenme ve dayanım özelliklerinde değişimlere yol açmaktadır. İyi hazırlanmış bir kompozitte gözenek oranı %1' den az iken, kötü bir kompozitte %5'e kadar çıkabilmektedir.

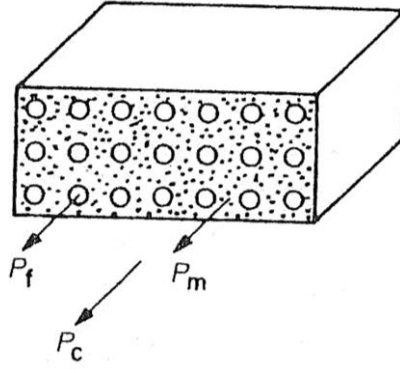
2.2 Tek Eksenli Kompozitlerin Boyuna Yöndeki Davranışları

Kompozit malzemelerin özellikleri bileşenlerinin özelliklerine ve bunların dağılımları ve fiziksel ve kimyasal etkileşimlerine bağlıdır. Kompozitlerin özellikleri deneysel ölçümlerle belirlenebilir. Deneysel yöntemler basit ve kesindir. Ancak bir set deneysel ölçüm tek üretim prosesi ile üretilmiş belirli bir fiber matris sisteminin özelliklerini belirlemektedir. Bileşenlerin hacim oranları, özellikleri ve üretim yöntemi gibi sistemde meydana gelen bir değişiklikte ilave ölçümler gerektirmektedir. Bu nedenle deneyler zaman alıcı ve maliyetlidir. Kompozit özelliklerinin belirlenmesinde teorik ve yarı-ampirik yöntemlerin kullanılarak çoğu sistem değişkeninin etkileri öngörülebilir. Bu yöntemler parça tasarım amaçlı kullanıldığında çok güvenilir olmayabilir, fakat tek

yönlü kompozitte enine yönlerdeki özelliklerin modellenmesi gibi durumlarda bu matematiksel modeller kullanılabilir. Tek yönlü kompozitlerde boyuna özelliklerini (çekme dayanımı ve Elastisite modülü) belirlemede kullanılan oldukça gerçekçi matematiksel modeller de mevcuttur [26-33]. Bunlar aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.

2.2.1 İlk Dayanımın Hesaplanması

Tek eksenli kompozitler fiberlerin aynı özelliklerde ve çapta, sürekli ve paralel olduğu farzedilerek modellenmektedir (Şekil 2.3) Aynı zamanda modellemelerde fiber ve matris arasında mükemmel bağlanmanın olduğu, arayüzeyde hiç kaymanın olmadığı ve fiber, matris ve kompozitin eşit gerinimde olduğu (Eşitlik 2.9) da düşünülmektedir [26-33]:



Şekil 2.3 Tek eksenli kompozitlerin boylamsal davranış modeli

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c \quad (2.9)$$

Bu model için kompozitin taşıdığı yük P_c , fiberler P_f ve matris P_m arasında paylaşılmaktadır. Böylece Eşitlik 2.10 oluşmaktadır:

$$P_c = P_f + P_m \quad (2.10)$$

Kompozit, fiber ve matris tarafından taşınan yükler P_c , P_f , P_m ; gerilimler σ_c , σ_f ve σ_m ve bunların kesit alanları A_c , A_f ve A_m cinsinden Eşitlik 2.11' de görüldüğü üzere yazılabilir:

$$P_c = \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.11a)$$

veya;

$$\sigma_c = \sigma_f \frac{A_f}{A_c} + \sigma_m \frac{A_m}{A_c} \quad (2.11b)$$

Paralel fiberli kompozitlerde hacim oranı alan oranına Eşitlik 2.12' de görüldüğü gibi eşittir:

$$V_f = \frac{A_f}{A_c} \quad \text{ve} \quad V_m = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.12)$$

Böylece Eşitlik 2.13 elde edilir:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.13' ün kompozit, fiber ve matris için aynı olan gerinime göre diferansiyeli alındığında Eşitlik 2.14 oluşmaktadır:

$$\frac{d\sigma_c}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma_f}{d\varepsilon} V_f + \frac{d\sigma_m}{d\varepsilon} V_m \quad (2.14)$$

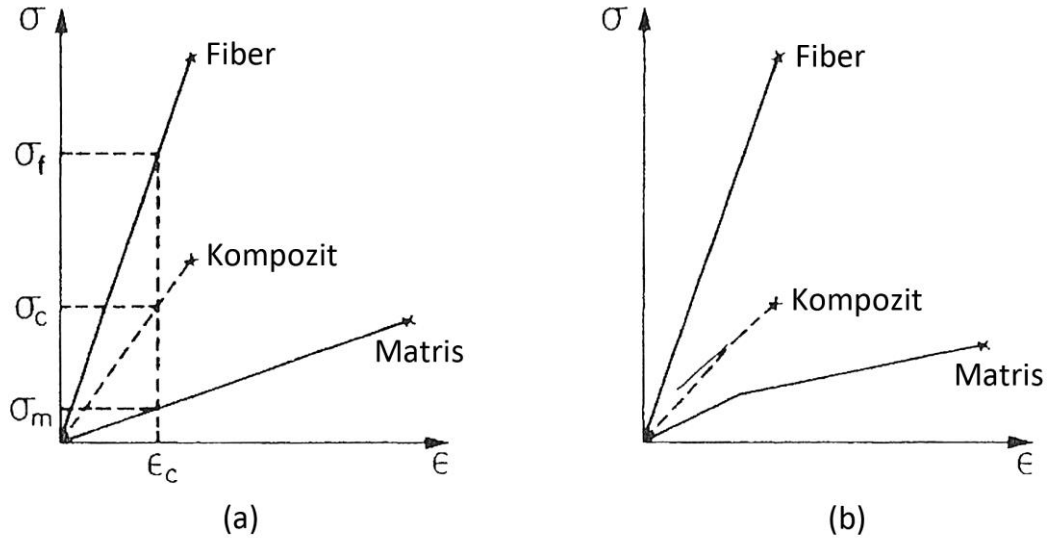
$(d\sigma/d\varepsilon)$ gerilme-gerinim diyagramındaki eğimi temsil etmektedir. Malzemenin gerilme-gerinim eğrisi lineer ise, $(d\sigma/d\varepsilon)$ eğim sabittir ve Eşitlik 2.14'te Elastisite modülü olarak yerleştirilerek Eşitlik 2.15' e ulaşılabilir:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.13 ve 2.15, fiber ve matrisin hacim oranlarına bağlı olarak kompozitin ortalama özelliklerine katkısını göstermektedir. Bu bağıntılar “Karışımlar Kuralı” olarak adlandırılmaktadır. Eşitlik 2.13 ve 2.15, daha fazla bileşenli kompozitler için Eşitlik 2.16 ve 2.17' deki gibi genelleştirilebilir:

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^n \sigma_i V_i \quad (2.16)$$

$$E_c = \sum_{i=1}^n E_i V_i \quad (2.17)$$



Şekil 2.4 a) Lineer, b) Lineer olmayan matrisli kompozit malzemelerin gerilme-gerinim diyagramları

Eşitlik 2.13 ile yapılan öngörüler gerilme-gerinim diyagramına aktarılabilir. Bunun için iki kompozit ele alınabilir. Bu iki kompozitinde fiberlerinin kopma anına kadar lineer gerilme-gerinim eğrisine sahip olduğunu, fakat matrislerden bir tanesinin lineer, diğerinin lineer olmadığında oluşan diyagramlar Şekil 2.4' de verilmiştir. Belirli bir gerinim değerinde kompozitin gerilimi Eşitlik 2.13' e ilgili gerilme-gerinim diyagramında göre önce matris ve fiber gerilimlerini bulup, ardından bunları hacim oranına orantılı şekilde ekleyerek hesaplanabilir. Bu işlem fiber hasarı gerçekleşene kadar uygulanabilir. Böylece oluşan kompozitin tüm gerilme-gerinim diyagramı elde edilir.

2.2.2 Yük Paylaşımı

Kompozit malzeme yüklemeye maruz kaldığında yükün ve oluşan gerilmenin bileşenler arasında nasıl paylaşıldığı önemli bir konudur. Buna göre Eşitlik 2.9 lineer elastik fiber ve matris için Eşitlik 2.18 gerilme ve elastisite modülü cinsinden yazılabilir [26-33]:

$$\frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (2.18)$$

Böylece

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m} \quad \text{ve} \quad \frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{E_f}{E_c} \quad (2.19)$$

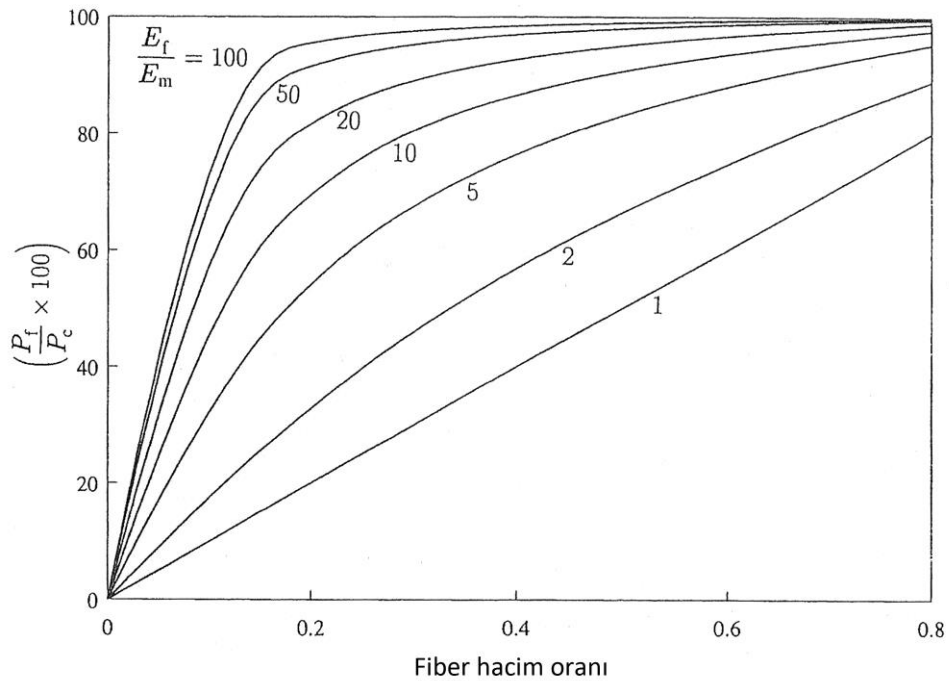
Eşitlik 3.19 gerilmelerin ilgili elastisite modülü oranı ile aynı oranda olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla fiberlerde yüksek gerilmelere ulaşmak için yüksek dayanımlı fiberler kullanmak daha etkilidir ve fiberlerin modülünün matrisin modülünden çok daha büyük olması önemlidir.

Yüklerin oranları elastisite modülü ve hacim oranı cinsinden Eşitlik 2.20 ve 2.21' deki gibi yazılabilir:

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (2.20)$$

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m} = \frac{E_f/E_m}{(E_f/E_m) + (V_m/V_f)} \quad (2.21)$$

Şekil 2.5' te fiberler tarafından taşınan yükler kompozitin bir oranı cinsinden işaretlenmiştir. Fiberler tarafından taşınan yükün yüzdesi fiber ve matrisin elastisite modülü yükseldikçe ve fiber hacim oranı arttıkça artmaktadır. Bu yüzden bir fiber matris sisteminde fiberler kompozit yükünü büyük ölçüde taşıyacaksa fiber hacim oranı maksimum olmalıdır. Ancak silindirik fiberlerin kompozit içindeki yerleşimi en fazla %91 hacim oranındadır ve %80' in üzerinde kompozit özellikleri matrisin fiberleri iletmesinin yetersizliğinden dolayı genellikle düşmektedir.



Şekil 2.5 Tek eksenli kompozitte boyuna yönde fiberlerin taşıdığı yük yüzdesi

Cam elyaf takviyeli plastiklerde elde edilen E_f/E_m oranı yaklaşık 20' dir ve %10 cam hacim oranında bile fiber toplam yükün %70' ini karşılamaktadır.

2.2.3 İlk Deformasyon Sonrası Davranış

Karışımlar kuralı tek eksenli kompozitlerde boylamasına maruz kalınan yükler altında gerilme-gerinim davranışını kesin olarak öngörmektedir. Bu Eşitlik 2.13' te gerilme için, 2.14' te ise gerilme-gerinim eğrisi için sağlanmıştır. Ancak Eşitlik 2.14' ün 2.15' e eğimin elastisite modülü ile yer değiştirilmesi ile basitleştirilmesi sadece her iki bileşenin de elastik deforme olması durumunda mümkündür. Bu sadece küçük bir gerilme-gerinim davranışını oluşturmaktadır ve başlıca cam veya seramik fiber takviyeli termoset plastiklere uygulanabilir. Genel olarak kompozitin deformasyonu dört basamakta ilerlemektedir [26-33]. Bunlar:

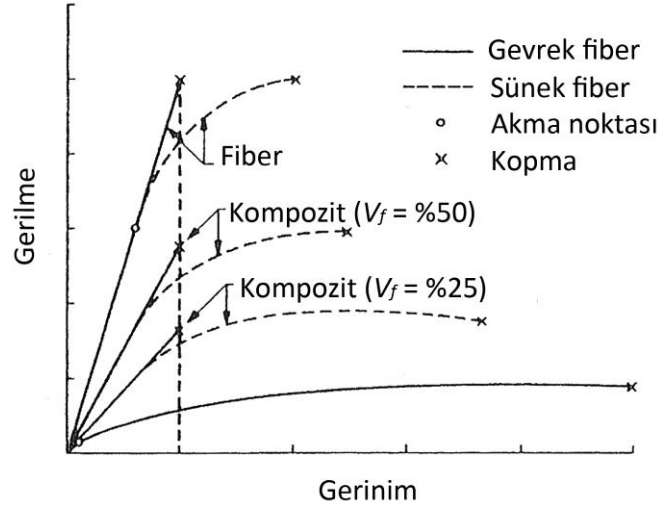
1. Fiber ve matris birlikte lineer elastik biçimde deforme olmaktadır.
2. Fiberler elastik olarak deforme olmaya devam etmektedir, fakat matris lineer olmayan veya plastik şekilde deforme olmaya başlamaktadır.
3. Fiber ve matris birlikte lineer olmayan veya plastik şekilde deforme olmaktadır.
4. Fiberler, kompozitin hasar anını takiben kopmaktadır.

Özellikle metal matrisli kompozitlerde ikinci basamak gerilme-gerinim eğrisinin en geniş kısmını oluşturmaktadır ve matrisin gerilme-gerinim eğrisi artık lineer değildir. Bu nedenle kompozitin modülü her gerinim için Eşitlik 2.22 ile hesaplanmalıdır:

$$E_c = E_f V_f + \left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m} \right)_{\varepsilon_c} V_m \quad (2.22)$$

$(d\sigma_m/d\varepsilon_m)_{\varepsilon_c}$ matrisin ε_c gerinimindeki gerilme-gerinim eğrisidir.

Üçüncü basamak gevrek fiberlerde gözlenmemesine rağmen, sünek fiberli kompozitlerin elastisite modülü Eşitlik 3.14' ten hesaplanmalıdır. Ayrıca boyun vererek kopan sünek fiberler için basit karışımlar kuralında sapmayı önleyici ilave faktörler uygulanmaktadır.



Şekil 2.6 Sünek ve gevrek fiberli ve sünek matrisli tek eksenli kompozitin boyuna yönündeki gerilme-gerinim eğrileri

Sünek ve gevrek fiberli sünek matrisli kuramsal kompozit malzemeler için gerilme-gerinim eğrileri Şekil 2.6' da görülmektedir. Kompozitin gerilme-gerinim eğrileri fiber ve matrisinin eğrilerinin arasında kalmaktadır. Gevrek fiberli kompozitlerin fiberin kopma geriniminde hasara uğradığı görülmektedir. Ancak fiberler matriste plastik olarak deforme olsalardı, kompozit içinde fiberlerin kopma gerinimi haricinde test edildiğinde (matrissiz) oluşan kopma geriniminden büyük olmaktadır. Bu durum Şekil 2.6' da gösterilmiştir. V_f azaldıkça ve matris-fiber dayanım oranı arttıkça, iki kopma gerinimi arasındaki fark artmaktadır.

2.2.4 Hasar Mekanizmaları ve Dayanım

Boyuna yönde yüke maruz tek eksenli bir kompozitte hasar, fiberler kopma gerinmesine geldiğinde başlamaktadır. Bu, fiberlerin kopma geriniminin matrisinkinden düşük olduğunu anlamına gelmektedir. Teorik öngörülerde tüm fiberlerin aynı gerinimde koptuğu varsayılmaktadır. Fiber hacim oranı yeterince fazla ise tüm fiberler kırıldığında matris tüm yükü taşıyamamakta ve ani şekilde kompozit hasara uğramaktadır. Bu durumda fiber kopma gerinimi' ϵ_f^* de kompozitin maksimum çekme dayanımına kompozitin gerilimi eşit kabul edilmektedir. Bu nedenle karışımlara kuralı (Eşitlik 2.13) Eşitlik 2.23 için kullanılabilir [26-33]:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_f^*}(1 - V_f) \quad (2.23)$$

burada σ_{cu} kompozitin maksimum dayanımı, σ_{fu} fiberin kasimum dayanımı ve $(\sigma_m)_{\varepsilon_f^*}$ fiber kopma gerinimi ε_f^* olduğunda matrisin gerilimidir.

Fiber hacim oranı, minimum fiber hacim oranı olarak adlandırılan V_{min}' den küçük ise tüm fiberler koptuğunda, matris kompozitin tüm yükünü taşıyabilmektedir. Üstelik artan gerinimle birlikte ilave yük bile taşıyabilmektedir. Kompozit fiberin kopma gerinmesinden daha fazla gerindiğinde fiberin hiç yük taşımadığı ($\sigma_f = 0$) varsayılmaktadır. Matrisin gerilimi, dayanımına eşit olduğunda ($\sigma_m = \sigma_{mu}$) kompozit sonunda hasara uğramaktadır. Fiber hacim oranı V_{min}' in altında olan kompozitlerin maksimum dayanımı (σ_{cu}) Eşitlik 2.24' te verilmiştir:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{mu}(1 - V_f) \quad (2.24)$$

V_{min} kompozitin fiber kontrolündeki hasarını sağlayan minimum fiber hacim oranı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik 2.23 ve 2.24' teki denklemlerin sağ tarafları eşitlendiğinde V_{min}' in ortaya çıktığı Eşitlik 2.25' te görülmektedir:

$$V_{min} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\varepsilon_f^*}}{\sigma_{fu} + \sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\varepsilon_f^*}} \quad (2.25)$$

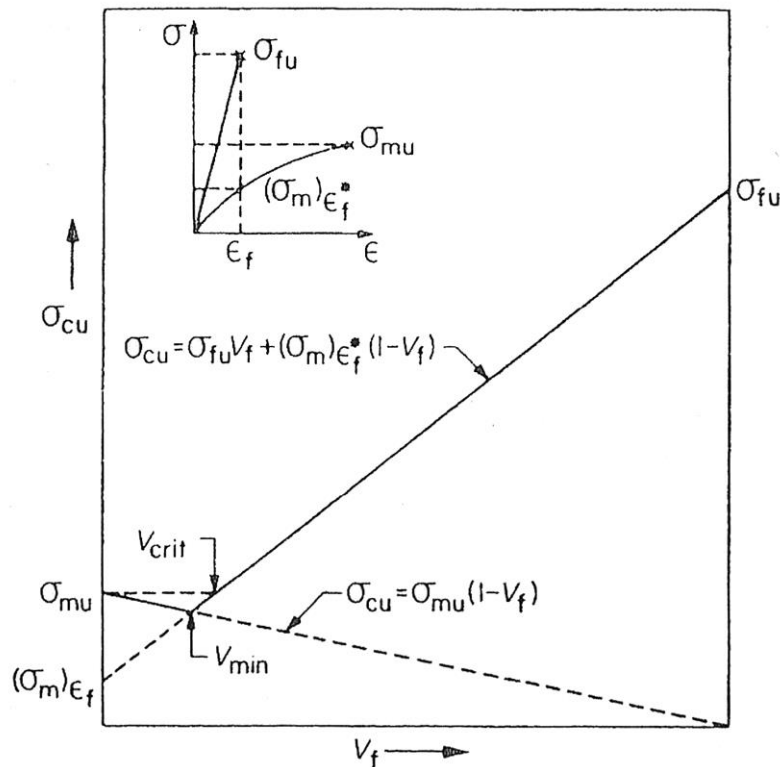
Eşitlik 2.23 ile hesaplanan kompozitin boyuna dayanımı Şekil 2.7' de fiber hacim oranına karşı çizilmiştir. Matris ister gerinim sertleştirilmesi uygulanmış metal olsun ister elastik olmayan polimer tipik gerilme-gerinim eğrisi bu şekildeki gibidir. Çizgilerin kesiksiz kısımları bu kısımların uygulanabilirliklerini ve V_{min} ile kesişimini tanımlamaktadır. Eşitlik 2.24 ile hesaplanan kompozitin dayanımı her zaman takviyesiz matrisin dayanımından düşük olacağı unutulmamalıdır. Diğer taraftan ise Eşitlik 2.23 ile hesaplanan kompozitin dayanımı fiber hacim oranına bağlı olarak matrisin dayanımından düşük ya da yüksek olabilmektedir. Bu nedenle güçlendirmek için fazla olan kritik fiber hacim oranı V_{crit} Eşitlik 2.26' daki gibi tanımlanabilir:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_f^*}(1 - V_f) \geq \sigma_{mu} \quad (2.26)$$

veya

$$V_{crit} = \frac{\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon_f^*}}{\sigma_{fu} - (\sigma_m)_{\epsilon_f^*}} \quad (2.27)$$

Böylece V_{crit}' in, V_{min}' den daha önemli bir sistem özelliği olduğu görülmektedir. Eşitlik 2.25 ve 2.27, matrisin gerilim sertleşmesi ve plastik akışının sonucu olarak V_{crit} ve V_{min} ortaya çıktığını ve fiber kopma geriniminde matrisin dayanımının matrisin geriliminden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Metal matrisli kompozitlerde matrisin gerinim sertleşmesi derecesi arttıkça V_{crit} ve V_{min} artmakta ve matrisin dayanımı fiberin dayanımına yaklaşmaktadır. Marjinal dayanımın fiberleri ile takviyelenecek kuvvetli bir matrisde güçlenme görülmeden önce büyük hacim oranları gerekmektedir. Polimer matrisli kompozitlerde çoğu polimer sınırlı miktarda plastik akış ve gerinim sertleşmesi gösterdiğinden V_{crit} ve V_{min} çok küçüktür. Örneğin; cam fiber takviyenin 2,8 GPa ($E_f = 70$ GPa) dayanımda olduğu düşünüldüğünde kompozitin maksimum kopma gerinmesi %4 ve tipik bir epoksi reçine sisteminde $\sigma_{mu} - (\sigma_m)_{\epsilon_f^*}$ 7-28 MPa aralığında değişebilmektedir. Bu yüzden V_{min} %0,25 ila 1,00 arasında olmaktadır.



Şekil 2.7 Tek eksenli kompozitte fiber hacim oranının fonksiyonu olarak boyuna yönde dayanımı

2.3 Enine Yönde Dayanım

Kompozitlerin enine özellikleri çalışmak için boyuna özellikler için olanla aynı mantıkla basit matematiksel bir model geliştirilmiştir. Fiberlerin aynı özellikte ve çapta, sürekli ve paralel olduğu varsayılmaktadır. Kompozit paralel dizili fiberlere dik, enine yönde gerilime maruz kalmaktadır. Bu model Şekil 2.8' de görülen fiber ve matris tabakalarından oluşmaktadır. Her tabaka yüklemeye dik doğrultudadır ve yükün etkidiği bölgededir. Her tabakanın aynı yükü ve gerilmeyi taşıyacağı açıktır ve bu Eşitlik 2.28 ile gösterilmiştir [26-33]:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m \quad (2.28)$$

Her tabakanın eşit kalınlıkta olduğu, böylece fiber ve matris tabakalarının kümülatif kalınlıklarının hacim oranlarıyla orantılı olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda yük yönünde kompozitin uzaması δ_c , fiber uzaması δ_f ve matrisin uzamasının δ_m toplamıdır. Bu Eşitlik 2.29' da verilmiştir:

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m \quad (2.29)$$

Malzemedeki uzama ise gerinim ve kümülatif kalınlık t cinsinden Eşitlik 2.30 olarak yazılabilir:

$$\delta_c = \varepsilon_c t_c \quad (2.30a)$$

$$\delta_c = \varepsilon_f t_f \quad (2.30b)$$

$$\delta_m = \varepsilon_m t_m \quad (2.30c)$$

Eşitlik 2.30, Eşitlik 2.29' da yerine konulduğunda Eşitlik 2.31 elde edilmektedir:

$$\varepsilon_c t_c = \varepsilon_f t_f + \varepsilon_m t_m \quad (2.31)$$

Eşitlik 2.31' in her iki tarafı, kalınlığın hacim oranı ile orantılı olduğu düşünülerek t_c ' ye bölündüğünde Eşitlik 2.32' e ulaşılmaktadır:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \frac{t_f}{t_c} + \varepsilon_m \frac{t_m}{t_c} = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad (2.32)$$

Fiber ve matrisin elastik deforme olduğu varsayılırsa; gerinim, gerilme ve elastisite modülü cinsinden Eşitlik 2.33' teki gibi yazılabilir:

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m \quad (2.33)$$

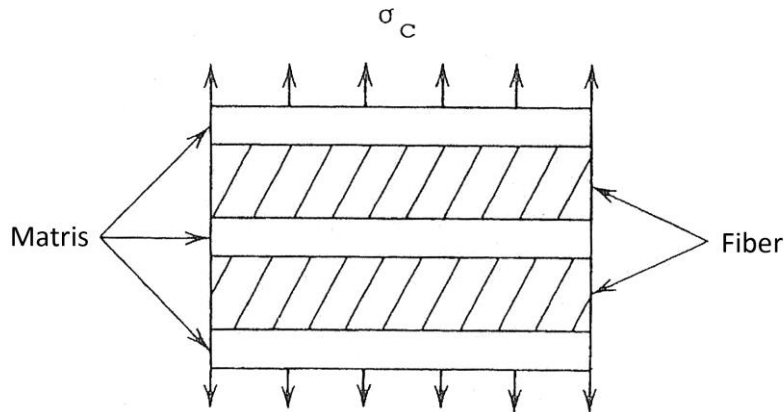
Eşitlik 2.28' e göre Eşitlik 2.33, Eşitlik 2.34' teki gibi sadeleştirilebilir:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.34)$$

n sayıda malzemeden oluşan bir kompozit malzemenin enine yöndeki modülü ise Eşitlik 2.34 genelleştirilerek Eşitlik 2.35' teki gibi yazılabilir:

$$E_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (V_i/E_i)} \quad (2.35)$$

Eşitlik 2.34' te belirtilen tek eksenli kompozitin enine yöndeki modülü (E_T) Şekil 2.7' a taşınmıştır. Bu şekilde Eşitlik 2.15' teki karışımlar kuralı ile hesaplanmış boyuna yöndeki modül (E_L) de verilmiştir. Burada kompozitin enine yönünde fiberlerin etkisinin boyuna yönüne göre çok daha etkisiz olduğu görülmektedir.



Şekil 2.8 Fiber oranının fonksiyonu olarak tek eksenli kompozitin enine ve boyuna modül diyagramı

Örneğin; $(E_f/E_m) = 10$ iken kompozitin enine yöndeki modülünü matris modülünün iki katına çıkarmak için hacimce %55' ten fazla fibere ihtiyaç vardır. Ancak boyuna yöndeki modülü aynı değere yükseltmek için sadece hacimce %11 fiber gerekmektedir. Teorik olarak enine yöndeki modül, %90 fiber oranında (ki bunun mümkün olmadığı bilinmektedir) matris modülünün beş katına kadar çıkartılabilir. Dolayısıyla fiberlerin, çok yüksek oranlarda olmadığı müddetçe, enine yöndeki modüle çok fazla etki etmediği ve ayrıca yüksek modüllü fiberlerin de bu modülü büyük ölçüde arttırmadığı görülmektedir.

BÖLÜM 3

TAKVİYE MALZEMELERİ

Kompozit malzemenin ana bileşen grubu takviye malzemeleridir. Bu bölümde takviye malzemelerinin özellikleri, çeşitleri, terminolojisi ve piyasadaki mevcut lif türleri incelenmiştir.

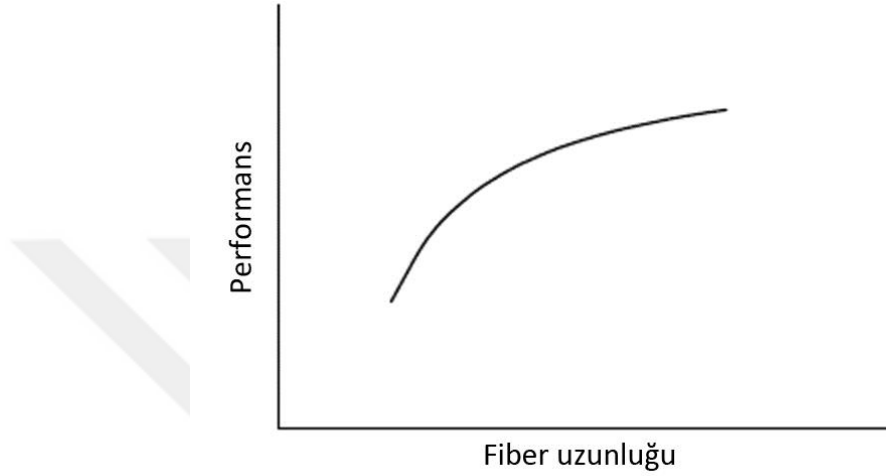
Takviye elemanı olan fiberler, matris içerisine yayılmış durumda bulunan başlıca kompozit elemanlarından. Kompozit içindeki başlıca görevleri [34]:

- Yükü taşımaktır; yapısal kompozitlerde yükün %70 ila 90' ı fiberler tarafından taşınmaktadır.
- Kompozite rijitlik, dayanım, ısı kararlılık ve diğer yapısal özellikleri kazandırmaktır.
- Kullanılan fiber türüne bağlı olarak elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı sağlamaktır.

Kompozit yapı içinde fiberler; sürekli fiberler (bükümlü veya bükümsüz ip, kumaş), süreksiz fiberler (keçe veya kırılmış fiber), partiküler (toz veya whiskers) veya yonga şeklinde bulunabilir [34-37]. Kompozitin mekanik performansına etki eden çeşitli fiber faktörler mevcuttur. Bunlar:

Uzunluk: Fiberler uzun ya da kısa olabilmektedir. Uzun süreksiz ve sürekli fiberleri yönlendirmek ve proses etmek kolaydır, ancak kısa fiberlerde tam bir yönlenme tümüyle kontrol edilemez. Uzun fiberlerin kısa fiberlere göre pek çok yararı vardır. Bunlar; yüksek dayanım, düşük çekme büzülmesi, daha düzgün ürün yüzeyi ve

boyutsal kararlılık vardır. Ancak kısa fiber ise düşük maliyet, kolay ve hızlı üretim prosesi avantajlarına sahiptir. Şekil 3.1’ de fiber uzunluğunun kompozitin performansına etkisi görülmektedir. Kompozit yapıda fiber uzunluğu arttıkça performansın arttığı görülmektedir. Sürekli fiberli yapılar ise en yüksek performans sağlanmaktadır [34-37].



Şekil 3.1 Fiber uzunluğunun kompozitin performansına etkisi

Yönlendirme: Tek eksenli boyunca yönlendirilmiş sürekli fiberli yapıda, fiber yönünde çok yüksek dayanım ve rijitlik elde edilmektedir. Keçe gibi birden fazla eksenli yönlendirilmiş fiberler yapıda tüm eksenlerde yüksek dayanım ve rijitlik oluşmaktadır. Ancak burada elde edilen dayanım ve rijitlik aynı fiber hacim oranındaki tek eksenli kompozitle ile kıyaslanamaz. Çünkü tek eksenli sürekli fiberli kompozit, keçe tarzı süresiz fiberli kompozite göre çok daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Çizelge 3.1’ de tek yönlü sürekli fiber, çeşitli tarzlarda dokuma kumaş ve kırılmış süresiz cam elyafı ile takviyelenmiş kompozit yapıların dayanım özellikleri yönünden karşılaştırılması görülmektedir [38].

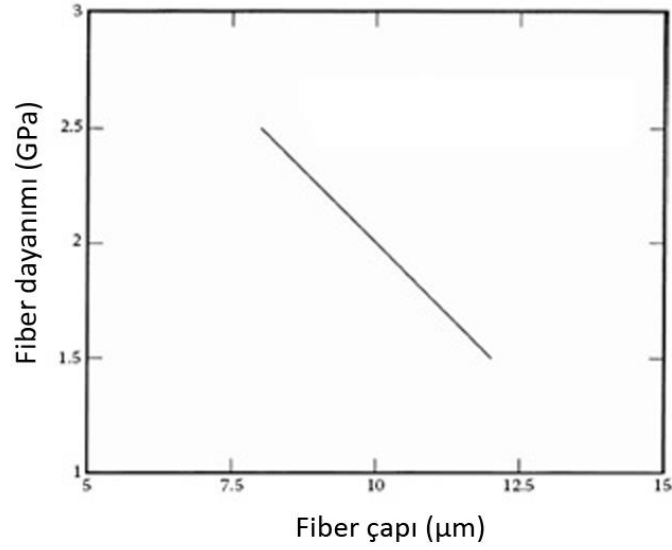
Çizelge 3.1 Cam elyafı/polyester kompozit malzemenin fiber türüne göre dayanım özellikleri

Özellik	Tek	Dokuma türü			Cam lifi	Poliester
	yönlü sürekli	Tek yönlü doku	Saten doku	Düz doku	kırpılmış	reçine saf
Cam elyafı miktarı, %	70	66	62	57	35-45	-
Çekme day. MPa	823	498	314	265	176	39
Basma day. MPa	490	314	235	206	176	147
Kesme day. MPa	-	127	108	98	78	-
Darbe day. J/cm	19	13,5	6,5	4,3-5,4	3,2-5,4	0,16

Şekil: Fiberlerin en genel şekli yuvarlaktır, çünkü bunların tutması ve üretimi kolaydır. Altıgen ve kare kesitli fiberler mümkündür, fakat dayanım, yüksek paketlenme faktörleri ve tutma ve üretim kolaylığı bakımından dairesel kesit en avantajlı olandır.

Malzeme: Fiberlerin malzemesi doğrudan kompozitin mekanik performansını etkilemektedir. Fiberlerin genellikle yüksek elasite modüle ve dayanıma sahip olması talep edilmektedir. Bu talep ve maliyet kompozitler için fiber piyasasına hakim olan karbon, aramid ve cam fiber malzemlerinin seçiminde kilit faktörlerdir [34-38].

Fiber çapı: Fiberler çok ince çaplara sahip yapılardır. Malzemelerin gerçek dayanımları teorik dayanımlarından düşüktür. Bu fark malzemenin içindeki kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bu kusurları ortadan kaldırmak malzemenin dayanımını arttırabilmektedir. Fiberlerde çap küçüldükçe kusurlar azalmaktadır. Örneğin; aynı çelik malzemedan üretilmiş bir plakanın dayanımı 689 MPa iken, çelik telin dayanımı 4100 MPa'dır. Şekil 3.2' de karbon bir fiberin çapı azaldıkça dayanımının nasıl etkilendiği görülmektedir [34-38]. En ince çapta en yüksek dayanım elde edilmişken, çapın artmasıyla ters orantılı olarak fiberin dayanımı düşmektedir.



Şekil 3.2 Karbon fiberler için fiber çapının bir fonksiyonu olarak fiber dayanımını

Yüksek süneklik, tokluk ve ayrıca yüklerin matristen fibere daha iyi transfer olması için kompozitlerin fiber-matris arayüzeyinde geniş yüzey alanına ihtiyaçları vardır. Aynı fiber hacim oranındaki bir kompozitte, fiber-matris arayüzey alanı fiberin çapı ile ters orantılıdır. Bu, belirli bir hacim oranında sabitlenmiş bir kompozitte fiber-matris oranının fiber çapı ile ters orantılı olduğu anlamına gelmektedir [34-38].

Kompozit malzemenin üretiminde özellikle dokuma kumaşlı kompozitler için fiberlerin kırılma olmaksızın eğilebilmesi istenmektedir. Eğilme kabiliyeti, azalan fiber çapıyla artmakta ve esneklik olarak ölçülmektedir. Esneklik, eğilme rijitliğinin tersi olarak tanımlanmakta ve fiberin elastik modülü ve çapıyla ters orantılıdır. Eğilme rijitliği eğme momentine dirençtir. Özel bir malzeme için dayanımından farklı olarak elastiklik modülü çapın bir fonksiyonu olarak hissedilir derecede değişmez. Bu nedenle özel bir malzemenin esnekliği çap ile ters orantılıdır [34-40].

3.1 Sürekli Fiber Ürünleri

Sürekli fiberler kompozit malzemeye en yüksek dayanım değerlerini veren fiber türüdür. Sürekli fiberler, yaklaşık 10 μm çapında yüzlerce ince fiberin bir arada bulunduğu demetler halindedir. Bunlar bükümlü ve bükümsüzlük iplik olarak piyasada bulunmaktadır. Fiberler birbirlerine paralel, bükümsüz şekilde bulunduğu bunlara “roving” adı verilmektedir. Roving demetleri bükülerek “bükümlü iplikler”i

oluşturmaktadır. Ayrıca roving demetleri çeşitli formlarda dokunarak, iki eksenle dayanım sağlayacak dokuma kumaşlar elde edilmektedir [38-41]

3.2 Fiber Demeti Birimleri

Boyutlarının değişkenlik göstermesi ve tam ölçülebilir olmaması nedeniyle fiber demetlerinin kalınlığının ya da numarasının belirlenebilmesinde ayrı bir ölçü birimi kullanılmaktadır. Bu birim fiber demetinin kütlesinin uzunluğa olan oranıdır [40-43].

Fiber demetinin birimini belirlemek için iki sistem kullanılmaktadır:

Direk Sistem: Bu sistemde numara belirli bir uzunluğa karşı gelen kütle olarak tanımlanmaktadır. Birimi “teks” olan “titer” olarak adlandırılan sistem Eşitlik 3.1’ de tanımlandığı üzere 1000 metre demetin gram cinsinden ağırlığıdır.

$$teks = \frac{g}{1000 m} \quad (3.1)$$

Daha ince demetleri tanımlamak için “desiteks (dteks)” birimi de kullanılmaktadır. Eşitlik 3.2’ de görülen bu birim 10000 metre uzunluğundaki demetin gram cinsinden ağırlığıdır.

$$dteks = \frac{g}{10000 m} \quad (3.2)$$

İnce demetler için ayrıca “denye” olarak adlandırılan bir birim de kullanılmaktadır. Eşitlik 3.3’ de görülen bu birim 9000 metre uzunluğundaki demetin gram cinsinden ağırlığıdır.

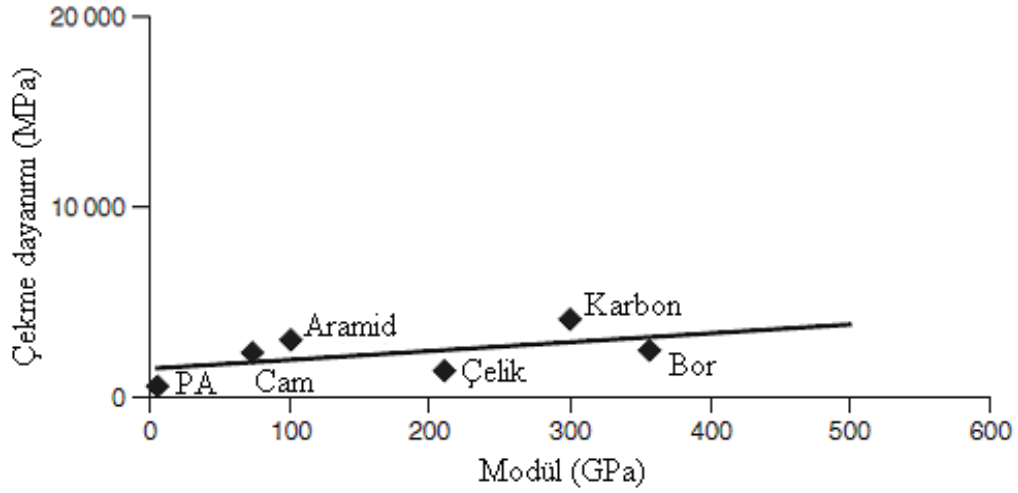
$$denye = \frac{g}{9000 m} \quad (3.3)$$

Endirek Sistem: Daha eski zamanlara dayanan bu sistemde belirli bir kütleye karşı gelen uzunluk tanımlanmaktadır. “Metrik Numara (Nm)” olarak adlandırılan bu sistemde 1 gram ipliğe karşı gelen metre cinsinden uzunluk Eşitlik 3.4’ te verilmiştir.

$$Nm = \frac{m}{1 g} \quad (3.4)$$

3.3 Mevcut Lifler

Sürekli fiber malzemeleri mineral veya sentetik polimerler şeklinde iki grupta sınıflandırılabilir. Cam, bazalt fiberler mineral esaslı inorganik malzemelerdir. Sentetik fiberler ise aramid (Kevlar), poliamid (PA), karbon gibi organik malzemelerdir [45-47]. Şekil 3.3' te bu malzemelerden üretilmiş fiberlerin çekme dayanımına karşı çizilmiş modül grafiği yer almaktadır.



Şekil 3.3 Çeşitli fiberlerin çekme dayanımını-modül grafiği

Malzeme seçim kriteri olarak mekanik performansların yanında maliyet, yoğunluk, kimyasal direnç gibi hususların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Son zamanlarda ileri teknolojik yapılarda yüksek dayanım değerlerine sahip olan aramid ve karbon kullanılmaktadır. Düşük dayanım ve modül değerlerine sahip PA fiberler ise kompozit sektöründe çok tercih edilmemektedir. Bor fiber yüksek çekme dayanımı ve modülü değerlerine sahip olsa bile maliyeti nedeniyle çok tercih edilmemektedir. Çelik ise yüksek yoğunluğu nedeniyle tercih edilmemektedir.

Günümüzde fiziksel, kimyasal ve mekanik performans ve maliyet açısından en tercih edilen takviye malzemeleri cam elyaf, aramid ve karbondur. Aşağıdaki bölümlerde bunların özellikler incelemiştir.

3.3.1 Cam Elyaf

Cam fiberler eritilmiş camın çekilmesiyle elde edilen tekstil lifleridir [45-47]. Plastik matriste en çok kullanılan fiberdir. Avantajları yüksek dayanımları, düşük maliyetleri, yüksek kimyasal dirençleri ve iyi yalıtım özellikleridir. Dezavantajları ise düşük elastik modül, polimerlere zayıf yapışma, yüksek yoğunluk, aşınmaya hassaslık ve düşük yorulma dayanımıdır.

Çizelge 3.2' te en çok kullanımı olan camlar ve kompozisyonları verilmiştir. Bunlardan E-camı (elektrik dirençli) çok az alkali içeren borosilikat camıdır ve çok üstün mekanik özellikleri vardır. Günümüzde en çok kullanılan cam türüdür. Korozyona dayanıklı cam fiber olarak bilinen C-camının kimyasal korozyon dayancı E-camından daha yüksektir, fakat daha pahalıdır ve daha düşük dayanım değerlerine sahiptir. Depolama tankları gibi kimyasal ortamların bulunduğu yerlerde kullanılmaktadır [45]. Yüksek dayanıma sahip cam olarak tanımlanan S-camı ise E-camından çok daha pahalıdır, ancak yüksek elastisite modülüne sahiptir, ayrıca yüksek sıcaklıklara da dirençlidir. Uçak sanayi gibi yüksek modülün gerektiği özel uygulamalarda kullanılmaktadır [46]

Çizelge 3.2 Çeşitli cam kompozisyonları

	E-cam (%)	C-cam (%)	S-cam (%)
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O, K ₂ O	0,8	9,6	0,3
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

Tüm cam fiberler üretildikten hemen sonra apreleme adı verilen bir silan bileşiği ile kaplanmak zorundadır. Silan, takviye ürünleri için kullanılmaktadır ve camı aşınmadan korumaktadır. Kalıplama sırasında prosese yardımcıdır, bu yüzden reçineyle uyumlu olmak zorundadır. Organik silikon bileşiği olan silan matris ile takviye cam arasında

yapışmayı sağlayan anahtar bir eleman, polivinil asetat benzeri bir film oluşturunca, bir amid asit lübrikan ve anti-statik özellikler veren diğer malzemeleri içermektedir. Cam fiberler yalnızca bu silan kaplama işleminden sonra çeşitli şekillerde proses edilerek (bükümleme, dokuma, örme gibi) plastik matrise uygun takviye malzemesi olarak kullanılabilir [45]. Bu konu 5. bölüm olan arayüzey oluşumu bölümünde detaylarıyla anlatılmaktadır.

3.3.1.1 E-camı Fiber

Sürekli filamentler halinde üretilen camlar büyük oranda E-camdır. Bu bir soda-alumina-borosilikat camıdır. Hem yüksek elektrik direncine hem de yüksek yüzey direncine sahiptir. Ayrıca iyi fiber oluşturma özellikleri vardır [38-41]. E-camın tek belirli bir kompozisyonu yoktur. Kompozisyon her üretici tarafından hammadde teminlerinde ve üretim proseslerinde ekonomiklik açısından uygun şekilde değiştirilmektedir. Çekme dayanımları 2000-3000 MPa arasında, elastisite modülleri 80 GPa civarında ve yoğunluğu 2,54 g/cm³ tür [38-41].

Düşük maliyet, yüksek dayanım, yüksek rijitlik, görece düşük yoğunluk, ısıya karşı dayanım, iyi kimyasal dayanım ve elektrik yalıtımı gibi avantajlara sahip iken; düşük modül, uygun işlem görmezse kendi kendini aşındırma ve bunun sonucu dayanımının azalması, görece düşük yorulma dayancı, karbon ve organik fiberlerle karşılaştırıldığında yüksek yoğunluğa sahip olması gibi dezavantajları da vardır [38-41].

Polimer matrisli kompozitlerde E-camın takviye olarak kullanımı çok yaygındır. En iyi dayanım özelliklerini; düz, sürekli fiberler tek bir doğrultuda paralel dizilince kazanmaktadırlar. Diğer yönlerde dayanımı arttırmak için sürekli fiberler diğer yönlerde sıralanarak laminat yapıları kurulabilmektedir. Bunlar depolama tankları ve benzer yapılarda kullanılmaktadır. E-camı sürekli fiber olarak kullanımının dışında farklı takviye şekillerinde de uygulaması bulunmaktadır. Rastgele yönlü E-camı keçe ve dokunmuş E-camı kumaşlar da kompozit panel üretiminde sıkça kullanılmaktadır.

3.3.1.2 S-camı Fiber

S-camı, yüksek dayanım ve elastik modüllüne sahip ticari olarak fiber çekilebilen bir camdır. Yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybetmeme özelliği vardır. %65 SiO₂, %25 Al₂O₃ ve %10 MgO kompozisyonuna sahiptir [38-41]. Yüksek silika ve cama dayanım veren alümina sayesinde en yüksek dayanıma sahip cam türüdür. Çekme dayanımı ortalama 4800 MPa, elastisite modülü 85.5 GPa ve yoğunluğu 2.48 ila 2.49 g/cm³'tür [38-41].

S-camı; E-camı, aramid ve karbon fiberlere göre daha yüksek dayanıma sahiptir. Ancak aramid ve karbon fiberlerin yoğunlukları daha az olduğundan S-camının modülü daha düşüktür. Bu nedenle aramid ve karbon fiber kadar yaygın kullanımı yoktur.

3.3.2 Basalt Fiber

Basalt fiberler volkanik kayalardan yapılan, metal olmayan inorganik bir çeşit yüksek performans lifidir. Son yıllarda performansı ve fiyat cazipliği bakımından diğer malzemeler arasında popüler hale gelmiştir [45-47].

Sürekli basalt fiberlerin çekme dayanımı 2600-4800 MPa arasında üreticiden üreticiye ve üründen ürüne değişmektedir. En yüksek değerde olanları karbon fiber, aramid fiber, PBI fiber, çelik fiber, bor fiber ve alumina fiberden daha fazladır ve neredeyse S-cam fibere eşittir [45-47]. İçindeki K₂O, MgO, TiO₂ içeriği korozyon ve suya karşı dayanım sağlamak için çok önemlidir. İyi bir elektrik yalıtkanıdır. E-camdan daha yüksek hacimsel elektrik direncine sahiptir. Pahalıdır, ancak karbon ve aramid fiberlerden daha ucuzdur. Amerikan Teksas basalt fiber endüstrisi birliği basalt fiberlerin çok geniş kullanım alanı olan karbon fiberlere düşük fiyatıyla alternatif olduğunu belirtmiştir. Daha da önemlisi, doğal cevherden hiçbir katkı ilavesi olmadan üretildiği için çevrecidir, çevre kirliliği yapmamaktadır.

Sürekli basalt fibeler ileri teknoloji fiberleri arasında karbon fiber, aramid fiber ve UHMWPE' den sonra dördüncü sıradadır. İleri teknoloji fiberleri özellikle savunma ve savaş sanayinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ateşe dayanıklı tekstil, uçak ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadır [45-47].

3.3.3 Aramid Fiber

Amid ve imidler üzerinden bağlanmış aromatik gruplardan oluşan doğrusal makromoleküllerden meydana gelmiş, iki aromatik halkaya direk olarak bağlanmış amid ve imid grupları en az %85 olan ve varsa imid bağlarının sayısı amit bağlarının sayısını geçmeyen lifler [45, 46]. Bir aramid fiber karbon, hidrojen, oksijen ve azottan yapılmış aromatik organik bir bileşiktir. Avantajları düşük yoğunluk, yüksek çekme dayanımı ve yüksek darbe direncidir. Dezavantajları ise düşük basma özellikleri ve güneş ışığında bozulmalarıdır [45].

Ticari olarak mevcut tüm fiberlerin içinde en yüksek çekme modülüne sahip olan sürekli fiber türüdür. Bununla birlikte en yüksek fiyatlı fiberdir [8]. Nomex ve Kevlar, Du Pont firmasının iyi bilinen ticari aramid fiberlerdir.

1,44 g/cm³ yoğunluğa sahip olan aramidin üreticisine bağlı olma üzere pek çok türü (Kevlar 29, Kevlar 49, Kevlar 129, Kevlar 149 gibi) vardır. Çekme dayanımları 2700-3500 MPa arasında iken; elastisite modülleri 62-186 GPa arasında değişmektedir.

Aramid fiberler cam gibi diğer yüksek performans fiberlerden daha esnektir, bu sebepten bir sonrası işlem kademesi olan dokuma, örme veya dikme prosesine daha uygundur. Fakat diğer tekstil ürünlerinden çok daha dayanıklı ve uzayabilir olduğundan kumaş yapımı zordur.

Aramid fiberlerin basma özellikleri zayıftır; basma dayanımları, çekme dayanımlarının sekizde biri kadardır. Bu onların anizotropik yapısından kaynaklanmaktadır. Bu sayede basmada kolay bölgesel eğilme, burulma, kıvrılma yapmasına izin vermektedir. Cam ya da karbon fiberler kadar kırılğan değildir ve geleneksel kumaş dokuma tezgahlarında dokunabilmektedirler.

3.3.4 Karbon Fiber

Karbon fiberler organik lif çıkış maddelerinin termal olarak karbonlanmasıyla elde edilmiş karbon yüzdesi kütlece en az % 90 olan lif türüdür [45-50]. Pahalıdır. Karbon fiberler üç farklı yöntem kullanılarak üretilmekte ve fiber üretim yöntemine göre adlandırılmaktadır. Her bir yöntemin fiyat ve özelliğidir. PAN karbon fiberlerin maliyetlerin daha düşüktür ve iyi özelliklere sahiptir. Yapısal karbon fiberler grubuna dahildir ve askeri havacılıkta, füzelerde ve uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Pitch karbon fiberleri, daha yüksek rijitlik ve ısı iletkenliğe sahiptirler ve nedenle uydu yapıları ve uzay radyotörleri ve elektronik muhafazaları gibi ısı- yönetim uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Rayon karbon fiberleri yapısal uygulamalarda kullanılmamaktadır, fakat düşük ısı iletkenlikleri onları roket nozulları, roket uçlarında ve ısı kalkanları gibi yalıtım ve yön verici uygulamalarda kullanışlı yapmaktadır.

Karbon fiberler, üretim prosesiyle (örneğin; ısı işlem sıcaklığı) yapıları kontrol edilerek özellikleri kolaylıkla değiştirilebilir olmasından dolayı çok çeşitli özelliklerde bulunabilmektedir. Fiber özellikleri harmandan harmana ve ayrıca üreticinin fiber teknolojisini geliştirmesine bağlı olarak değişmektedir.

En yüksek performansta olan ve yapısal uygulamalarda en çok tercih edilen Pitch yöntemiyle üretilmiş karbon fiberin çekme dayanımları 3500-4000 MPa arasındadır. Yoğunluğu 2,0-2,20 g/cm³'tür [45-50].

BÖLÜM 4

MATRİS MALZEMELERİ

Kompozitin mekanik performansı üzerinde matrisin de katkısı vardır. İplikler haricinde fiberlerin tek başına kullanımı sınırlıdır. Bu yüzden fiberler matrise takviye olarak kullanılmaktadır. Matrisin görevleri;

- fiberleri bir arada tutmak,
- fiberleri çevresel etkilerden korumak,
- fiberleri tutma sırasında oluşabilecek hasarlardan muhafaza etmek ve
- fiberlere yükü dağıtmaktır.

Fiberlerle karşılaştırıldıklarında matrisler genellikle düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da kompozitin pek çok mekanik özelliklerini matris etkilemektedir. Bu özellikler; enine modül ve dayanımı, kayma modülü ve dayanımı, basma dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı, ısı genleşme katsayısı ve yorulma dayanımını içermektedir [20-40].

Tüm diğer matris alternatifleri arasında ticari olarak en uygun ve en çok kullanılan plastik matrisler termoset esaslı olan polyester ve epoksi reçineleridir. Matris malzemeleri güçlü yapıştırma, çevre ve atmosfer şartlarına yüksek dayanım ve yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Bir matrisin öncelikle sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir malzeme sert olmalıdır, fakat gevrek bir malzemenin gösterdiği davranışlardan dolayı performansı düşmemelidir. Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki tür olarak bulunmaktadır [20-40]. Termoset polimerler

kürlenmeden sonra çözülmez ve kaynaşmazlar. Çünkü kuvvetli kovalent bağlarıyla sıkı sıkıya birleşmişlerdir. Termoplastikler ise yüksek sıcaklık ve basınçta şekillendirilebilir, çünkü bağları zayıf Van der Waals türüdür. Termosete tipik örnek olarak epoksi, polyester, fenolik ve poliamid verilirken; termoplastiklere polietilen, polipropilen, polistiren, polieter-eter-keton verilebilir. Termoset ve termoplastik arasındaki farklar Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Termoset ve termoplastik arasındaki genel farklılıklar

Termoplastikler	Termosetler
- Isı ve basınç altında yumuşama (bu sayede tamiri kolay) - Yüksek gerinme - Sınırsız raf ömrü - Tekrar proses edilebilir - Yapışkan değildir ve tutulması kolaydır - Kısa proses zamanı - Yüksek üretim sıcaklığı ve viskozitesi (üretim zorluğu) - Mükemmel çözücü direnci	- Isı ile bozulur - Düşük gerinmelerde kırılır - Sınırlı raf ömrü - Tekrar proses edilemez - Yapışkandır - Uzun proses (kürleme) zamanı - Düşük üretim sıcaklığı - Vasat çözücü direnci

4.1 Termoset Polimerler

Termosetler, kompozitlerde en çok kullanılan matris malzemesidir. Termoset plastikler sıvı halde bulunmaktadır. Kürleme denilen bir dizi reaksiyonu oluşturmak için ısıtılmakta ve çeşitli katkılarla kimyasal tepkimelere sokulmaktadır. Bu işlem sırasında sıvı haldeki reçine katkı malzemeleri oranlarına bağlı olarak belirli bir hızda jelleşerek sertleşmekte ve kürleme işlemini tamamlayarak sağlamlaşmaktadır. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamamaktadırlar. Polyester, epoksiler, vinil ester, bismaleimid (BMI), fenolikler, silikon başlıca örnekleridir [20-40].

4.2 Termoplastik Polimerler

Termosetlerin aksine termoplastiklerin çoğu kalıplama öncesi sınırsız raf ömrüne sahip olduğundan ve ısı-basınç uygulanarak tekrar kalıplanabildiklerinden, daha düşük üretim maliyetlerine sahiptirler. Bu yüzden kompozit üretiminde termoplastik matrisin kullanıma fikri her geçen gün daha cazip hale gelmektedir [49-50].

Yüksek performans polimerleri olarak anılan polieter eter keton (PEEK), polietherimit (PEI), polipfenilen sülfid (PPS) mühendislik plastiklerinin yanı sıra teknik plastikler olarak geçen poliamid (PA), polikarbonat (PC), polietilen tereftalat (PET), polybütilen tereftalate (PBT), polioksimetilen (POM) ve polimetil metakrilat (PMMA), ayrıca ticari plastikler olarak bilinen poliolefin grubu (PE, PP) termoplastikler de matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [49-50]. PE ve PP; ucuz, kimyasal direnci çok yüksek ve çok hafif olmasından ötürü pek çok sahada kullanılan malzemelerdir.

4.2.1 Poliolefin Termoplastikler

Poliolefinler genellikle ticari termoplastikler olarak adlandırılan termoplastiklerin en geniş grubudur. Bunlar; etilen, propilen, büten, izoprenler ve pentenler gibi basit olefinlerin polimerler ve bunların kopolimerleri ve modifikasyonlarıdır. Poliolefinler terimi "yağ-benzeri" anlamına gelmektedir ve bu gibi malzemelerin sahip olduğu yağlı veya balmumuna benzer histen dolayı bu isim verilmiştir. Poliolefinler, sadece karbon ve hidrojen atomlarından oluşmaktadır ve aromatik değildir. Poliolefinler genellikle ekstrüzyon, enjeksiyon, şişirmeli ve rotasyonel kalıplama yöntemlerle işlenmektedirler. Termoform, kalenderleme ve sıkıştırmalı kalıplama daha az ölçüde kullanılan işlem yöntemlerindendir. Tüm poliolefinlerin ortak özellikleri polar olması, gözeneksiz, düşük enerjili yüzeye sahip olmasıdır [49-53].

En önemli ve yaygın kullanılan iki poliolefin türü polietilen ve polipropilendir [51-53]. Düşük maliyetleri ve geniş uygulama alanları nedeniyle çok tercih edilmektedirler.

4.2.1.1 Polietilen

Polietilen çok ucuz, kimyasal olarak kararlı, kaynak yapılması nispeten kolay, gerilmeye karşı mukavemetli 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 [51].

Bariyer özellikleri, yoğunluğun artmasıyla birlikte artan kristal derecesi, dayanıklılık, sertlik ve ergime sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Buna karşın yoğunluğun artması; darbe dayanımını, ışık geçirgenliğini, düşük sıcaklıklara olan hassasiyeti ve gerilim çatlamları değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Polietilen birkaç farklı kategoriye ayrılmaktadır ve bunlar ayrımlar yoğunlukla yoğunluklarına dayanarak yapılmaktadır. Mekanik özellikleri dallanmasının genişliğine ve türüne, kristal yapısına ve moleküler ağırlığı gibi değişkenlere önemli ölçüde bağlıdır. Polietilenlerin ana formları; yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), yüksek moleküler ağırlıklı HDPE (HMW-HDPE), ultra yüksek moleküler ağırlıklı HDPE (UHMW-HDPE), orta yoğunluklu polietilen (MDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), linear düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), çok düşük yoğunluklu polietilendir (VLDPE). Bunlar yoğunluk ve dallanmalarına bağlı olarak ayrılmışlardır. Ticari olarak en önemli polietilen türleri ise HDPE, LDPE, LLDPE ve MDPE' dir [10, 51].

LDPE yüksek basınç polimerizasyonu ile üretilmekte ve genellikle uzun zincir dallanma yapısı ile karakterize edilmektedir. Bu sayede moleküllerin düşük kristallliği ile sonuçlanan kristalleşme sırasında birbirlerine yakın şekilde paketlenmeler önlenmektedir. Düşük kristallliğinden dolayı LDPE, HDPE' den çok daha esnektir ve HDPE' den daha düşük çekme ve basma dayanımına sahiptir. LDPE gıda paketlenme malzemesi ve plastik torba ve esnek sargı filmi gibi plastik film uygulamalarında kullanılmaktadır [10, 11]. MDPE, HDPE ile aynı düşük basınç prosesi ile üretilir, fakat az miktarlarda kısa zincir dallanmaları içermektedir. HDPE' den daha yumuşaktır ve LDPE kadar pürüzsüz ve ince olamamaktadır. MDPE tipik olarak gaz borularında ve bağlantı parçalarında, çuvallarda, paketlenme filmi, taşıyıcı torbalar ve vida contalarında kullanılmaktadır [10, 11]. HDPE ana dallanmaların olmadığı uzun zincirlerden oluşmaktadır. Ana zincirde 200 karbon atomu başına en az 1 yan zincir içermesi sonucu

uzun zincirler ile birlikte yüksek kristallenme ve rijitlik oluşmaktadır. HDPE süt kutuları, deterjan şişeleri, margarin kapları, çöp kutuları ve su boruları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır [10, 11].

4.2.1.2 Polipropilen

Polipropilenin su buharı bariyer özelliği iyi (LDPE ve HDPE arasında) ancak gaz ve aromayı geçirmeme özelliği vasattır. 165°C gibi polietilene oranla daha yüksek olan ergime sıcaklığı nedeni ile yaklaşık 100°C' a kadar kullanılabilir. Kristalleşmenin ani soğutma ile engellenebilmesi durumunda, ışık geçirgenliği de polietileninkinden oldukça büyüktür [51-53].

PP ucuz, düşük yoğunluklu, çok yönlü bir plastiktir ve pek çok derecede ve kopolimer (etilen/propilen) olarak bulunabilmektedir. Tüm termoplastikler içinde en düşük yoğunluğa (0.9 g/cm³) sahip olanıdır ve iyi dayanım, rijitlik, kimyasal dayanım ve yorulma dayanımı sağlamaktadır. Ayrıca çeşitli takviyelerle pultruze edilebilmektedir [3, 51-53]. PP makine parçaları, otomobil bileşenleri, ev aletleri, petro-kimya ve boru ürünlerinde kullanılmaktadır [3, 8].

Polipropilen rasgele kopolimerler (PPRC), polimer zincirinin temel yapısı farklı bir monomer molekülü dahil edilerek değiştirilmiş olan bir polipropilen türüdür. Etilen en yaygın olarak kullanılan komonomerdir. Bu, polipropilenin fiziksel özelliklerinde değişikliklere neden olur. PP homopolimer ile karşılaştırıldığında, rasgele kopolimerler geliştirilmiş optik özellikleri (netlik artmış ve bulanıklık azalmıştır), geliştirilmiş darbe mukavemeti, esneklik ve azalmış erime noktası sergilemektedir. Aynı zamanda, PP homopolimer ile aynı kimyasal direnç, - + sıcaklık direnci, su buharı bariyer özelliği ve duyuşsal özellikler (tat ve koku katkısı) göstermektedir [51-53].

BÖLÜM 5

ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ

Fiber-matris yapışması kompozit malzemelerden en iyi özelliklerin ve performansın sağlanması için optimize edilmesi gereken bir değişkendir. Yapışmaya güncel bakış arafaz modeline dayanmaktadır. Arafazda sadece fiber ve matris arasındaki gerçek kimyasal ve fiziksel etkileşim düşünülmemelidir, aynı zamanda arayüzeye yakın bölgedeki fiber ve matrisin yapı ve özellikleri de dikkate alınmalıdır. Arafaz, kelime anlamı olarak “faz” (özellikleri her yerinde aynı olan hacim) değildir, sınırlı boyuttaki bir bölgeyi tanımlamak için kullanılan, bölgesel özellikleri kendi fazlarından değişen bir terimdir. Ancak arafaz anlayışımız henüz tamamlanmış değildir, tamamlanmış çalışmalarda belirli fiber ve matris bileşenleri sınıflarının yüzey işlemleri ve yüzey kaliteleri seçimi konusunda veriler sağlanmıştır. Yapısal bir düşünceden yola çıkarak fiber ve matris özelliklerinden optimum tasarım metodu kullanılmaktadır. Bileşenler seçildikten sonra faydalı bir fiber-matris arafazı oluşturma kriteri üzerine yoğunlaşılmalıdır. Fiber ve matris etkileşiminin olduğu bu arafaz bölgesi hem proses hem de performans düşünülerek tasarlanmalıdır. Fakat arafaz optimizasyonu için kantitatif bir model mevcut değildir, arafazın kantitatif bir şekilde tasarımının yanı sıra artan deneysel verilerle bağdaşmış çeşitli termodinamik ve malzeme bilimi ilkeleri arafazı anlamamıza olanak tanımaktadır. Yüzey yapısı ve kimyasal modifikasyon için yüzey işlemleri seçimini içeren analiz ve tasarım araçları mevcuttur. Bunlar; tam ıslatma sağlamak ve fiberleri korumak için yüzey tesviyesi ve/veya silan kullanımı; istenen rijitlik, tokluk ve hata biçimleri ile arafaz oluşumu; ve yapısal çevre ve bileşen

malzemeleri ile uyumlu fiber-matris yapışma seviyeleri ölçümü için kalitatif ve kantitatif karakterizasyon testleridir [54].

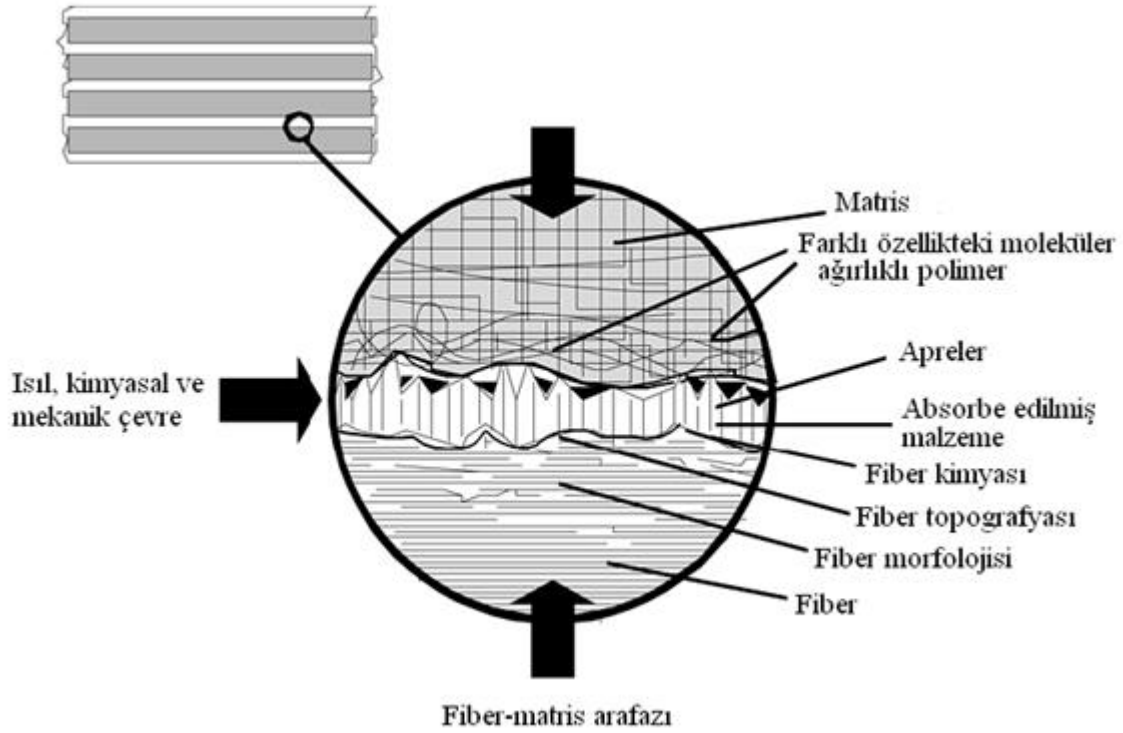
5.1 Arayüzey

Başlangıçlarından beri kompozit malzeme davranışları, fiber ve matris bileşenleri hesaplanarak yapı-özellik ilişkisi üzerinden tahminler yapılmaktadır. Bileşen kompozisyonu, fiziksel morfoloji ve geometrik düzen gibi faktörler, kompozitin mekanik davranışını tahmin edebilecek modellerde birleşmiştir. 1980'lerden bu yana takviye ve matris arası "kabul edilebilir" arayüzey özellikleri kavramı, takviyenin matris ile kaplanması ve örneğin karışımlar kuralı gibi yapı-özellik modellerinde hemfikir olma davranışı önemlidir. Optimize edilmiş bir arayüzey, kompozitin maksimum statik ve dinamik mekanik özelliklerinin ve çevresel direncin yakalanması için gereklidir. Günümüzde satılan çoğu ticari kompozitler için optimizasyon, ampirik metotlara dayalı, fiber ve matris arası arayüzey yapışması ile yapılmaktadır. Optimize edilmiş ticari kompozitlerde arayüzey fonksiyonları, fiber ve matris arası kuvvetlerin etkili bir ileticisi gibidir. Arayüzey sağlam olduğu sürece kompozit malzemelerin davranışları fiber ve matris arası mükemmel yapışmanın olduğu farz eden ve arayüzeyin iki boyutlu bir sınır olduğu düşünen modeller tarafından yeterli derecede tanımlanabilir [54].

5.2 Arafaz

Fiber-matris yapışması kabul edilebilir kompozit özellikleri eldesi için gerekli bir ölçüt olarak görülmektedir. Kompozitin kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip olması için fiber-matris yapışmasının artmasını sağlayıcı çok sayıda kimyasal formüller, prosesler ve prosedürler içeren oldukça fazla patent mevcuttur. Fakat fiber-matris arayüzeyi ve yapışma mekanizmaları kantitatif anlayışımız henüz tam olarak gelişmemiştir, fiber-matris arafazını tıpkı kompozit tasarım yönteminin optimize edilmesi gibi optimize etmek mümkündür. Bu çalışmanın başarılı olabilmesinin yolu bir fiber-matris arafazı düşüncesini yöntemi oluşturan bir sistem gibi kullanmaktır. "Arafaz" düşüncesinin şekillenmesinde yorumlar polimer matrisli kompozitlere yönelik ve örnekler bunlardan seçilmiş olacaktır [54, 55].

1990'dan beri yapılan araştırmalar fiber-matris arayüzey kavramını geliştirmektedir. Fiber-matris arayüzey iki boyutlu sınır olarak, üç boyutlu bir fiber-matris arafazı içinde yer almaktadır [56]. Bu arafazın karmaşıklığı en iyi şematik model kullanılarak bu bölgenin pek çok özelliğinin sayıldığı şekil 5.1 ile açıklanabilir.



Şekil 5.1 Fiber-matris arafazı şematik diagramı ve oluşumuna katkı sağlayan faktörler

Arafaz, bölgesel özelliklerinin fiber özelliklerinden değışmeye başladığı fiber noktasında oluşuma başlamakta, fiber-matris arayüzeyi boyunca devam etmekte ve yığın özellikleriyle eşit hale gelen matris bölgesinde son bulmaktadır. Bu bölgenin içinde farklı bileşenlerin arafaza çeşitli etkileri vardır. Örneğın, fiber, fiber yüzeyi yakınında tüm fiber hacminde görülmeyen morfolojik değışimler geğirmiş olabilir. Yüzeydeki gözenekler, çukurlar ve çatlaklar yüzünden fiberin yüzey alanı geometrik değerinden çok daha büyük olabilir. Fiber yüzeyinin atomik ve moleküler yapısı tüm fiberin hacminden oldukça farklı olabilir. Yüzey işlemleri orijinal yüzeyi kaldırabilir veya yüzeye kimyasal gruplar eklenebilir, böylece yapısal ve kimyasal olarak farklı bir bölge oluşturulmaktadır [54].

Kompozit üretiminden bileşenlerin önce havaya maruz bırakılması belli faydalı yüzey duyarlılığını değıştirebilen veya yok edebilen çeşitli kimyasalların emilmesiyle

sonuçlanabilir. Emilen bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda, kompozit üretimi sırasında geri bırakılmakta ve eğer bu uzaklaştırılmazsa boşlukların kaynağı olmaktadır. Boşlukların kaynağı olan bu geri salınan malzeme arayüzeyi bozmaktadır. Fiberlerin termodinamik yüzey enerjisi bu faktörlerin bir sonucudur. Takviye ile matris arasındaki kabul edilebilir ara yüzey etkileşimi için gerekli koşullar fiberin ve matrisin yüzey serbest enerjisi tarafından belirlenmektedir. Genellikle bu takviyenin yüzey serbest enerjisinin matrisinkinden büyük olması zorunda olduğu anlamına gelmektedir [54-56].

Fiber ve matris temas ettikleri anda arayüzeyde kimyasal ve fiziksel olarak bağlanmaktadır. Fiber yüzeyinin kimyasal grubu matristeki kimyasal grupla reaksiyona girerek kimyasal bağları oluşturmaktadır. Van der Waals çekim kuvvetleri, hidrojen bağları ve elektrostatik bağlar da sisteme bağlı olarak oluşabilmektedir. Her birinin sayısı ve tipi fiber ve matris arası etkileşimi (yapışmayı) fazlasıyla etkilemektedir. Ayrıca arafazdaki matrisin yapısı ve özellikleri fiber yüzeyinin matris bileşimine olan yakınlığına da bağlıdır. Takviyenin kimyasal ve fiziksel doğası arafaz bölgesindeki matrisin bölgesel morfolojisini değiştirebilmektedir. Reaksiyona girmemiş matris bileşeni ve empüriteler arafaz bölgesine difüze olup, bölgesel yapıyı değiştirebilir ve fiber ve matris arasındaki yakın temas ile karışmakta ve düşük mekanik özelliklere sahip bir malzeme üretimine sebep olmaktadır [54-56].

Bu olgular, arafaz bölgesinde eş zamanlı oluşmakla birlikte, sistemin büyüklüğü ile değişim gösterebilir. Malzeme sistemlerine bağlı olarak arafazın kendisi bu bileşenlerin hepsinden oluşabilir veya hiçbirinden oluşamayabilir. Kalınlıkları da bir kaç nanometreden birkaç bin nanometreye genişleyebilmektedir. Her arafaz kompozit üretimi sırasında oluşturulmak zorundadır ve bu proses kısıtlamaların dolayı hepsi denge konumunda olmayabilir. Bu bölgenin yapısı, mekanik dayanım ve kimyasal ve ısıl dayanıklılıkla ilgili olan kompozitin performansı üzerinde çok büyük etkileri vardır. Arafaz davranışına ait kesin tahmini modellerin geliştirilecek ve bir kompozit performans modeline dahil edilecek ise bu bölgenin tam kompozisyonu ve özellikleri anlaşılmalıdır. Yeterli arafaz bilgisi ve bunun fiber-matris yapışmasına ve kompozitin mekanik performansına etkileri bilinmektedir. Dolayısıyla fiber-matris arafazı fiber yüzey işlemleri, kaplama elemanları ve silan ve/veya uyumlaştırıcılar kompozit

performansı optimize edecek şekilde oranlanmasıyla düzenlenmektedir. Henüz ilk ilkeden arafaz oluşumu ölçmek veya tahmin etmek mümkün olmasa da kompozit bileşenleri arasındaki etkileşimlerinin çalışıldığı bir taslak olarak kullanılabilir ve arafaz optimum bir seviyede tasarlanabilmektedir [54-56].

5.3 Yapışma Teorisi

İnorganik ve organik katıların arayüzeyde polimerlerle yapışması plastik matrisli kompozitlerin özelliklerini belirleyen ana faktörlerden birisidir. Yapışmanın prensipleri kimyasal, fiziksel ve mekanik yönü olan karmaşık bir konudur. Bu konuda üretilmiş pek çok teori bulunmaktadır. Ancak hiçbirisi gerçek yapışma dayanımının hesaplanmasını mümkün kılmamaktadır, yalnızca nitel tahminler yapılmasına müsaade etmektedirler. Aynı zamanda “bir nesneyi bir nesneye yapıştıran madde” olarak tanımlanmaktadırlar. Fakat bu tanım gerçek yapışma olayını anlaşılması için çok dar bir tanımdır. Hâlbuki yapışma arayüzey ve yüzey olaylarıyla bağlantılı çok karmaşık bir olgudur [57, 58].

Bu bölümde anlatılanlar altlık-yapıştırıcı (polimer-bağlayıcı) arayüzeyinde gerçekleşen arayüzey ve yüzey olgularıyla doğrudan alakalı yapışma olayını anlatmaktadır.

Yapışma iki gövdenin değişmeyen veya sabit bir bağlantısıdır. Termodinamik olarak adhezyon işi tarafından karakterize edilmektedir; örneğin, denge koşullarında birbirleriyle temas halinde olan iki gövdeyi ayırmaya yarayan iş tarafından. Arayüzeydeki moleküler kuvvetlerin hareketi altlık ve yapıştırıcı arasındaki yapışma kuvvetleri için temel sebepler oluşturmaktadır. Yapışmanın termodinamik tanımları için ilk terimler, temas halinde olan iki gövde arası arayüzeydeki yüzey gerilmesi ve arayüzey gerilmesi olan iki yüzey karakteristikleridir. En basit durum olan γ_{11} ve γ_{12} yüzey gerilimine sahip iki sıvıda, arayüzeydeki yüzey gerilimi (arayüzey gerilimi), buhar ile ıslatılmış arayüzeydeki en yüksek yüzey gerilimden her zaman düşüktür [57, 58]:

$$\gamma_{112} = \gamma_{11} - \gamma_{12} \quad (5.1)$$

Bu ampirik Eşitlik 4.1 Antonov kuralı olarak bilinmektedir. İki yüzeyin birbirinden ayrılması (arayüzeye dik yönde birbirlerinden kopmaları) birim yüzey alanı başına işi, W_a , gerektirmektedir [57, 58]:

$$W_a = \gamma_{l1} + \gamma_{l2} - \gamma_{l1l2} \quad (5.2)$$

Eşitlik 4.2, bir bileşenin katı olduğu her durumda kullanılabilmektedir. Buna göre kohezyon işi bir gövdeyi yok etme işi veya bu gövdedeki bir birim yüzey alanı oluşturmak için gereken iştir. Eğer buradaki tek izotermal proses gövdenin 2 cm^3 yeni yüzey alanı oluşumuysa, γ yüzey gerilimine sahip termodinamik kohezyon işi şu şekilde ifade edilebilmektedir [57, 58]:

$$W_c = 2\gamma \quad (5.3)$$

İslatmada bir damla sıvı, katı üzerinde belirli bir temas açısı oluşturmaktadır. Yüzey üzerinde damlanın mekanik durumu şu şekilde belirlenmektedir [57, 58]:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_l \cos \Theta \quad (5.4)$$

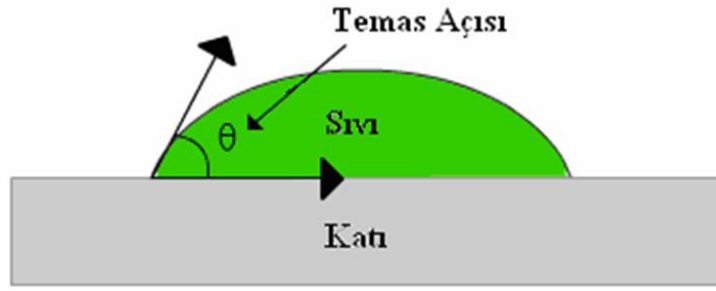
Burada indeksler arayüzeyde katının (s) yüzey geriliminin, sıvı (s) ve arayüzeyin (sl) arayüzey gerilmesinden oluştuğunu belirtmektedir. Eşitlik 5.2 ve 5.4'in birleşmesi sıvı ve katı arasındaki termodinamik adhezyon işini vermektedir [57, 58]:

$$W_a = \gamma_l (1 + \cos \Theta) \quad (5.5)$$

Bu eşitlik Dupre-Young eşitliği olarak geçmektedir. $\Theta = 0$ olduğunda damlanın davranışı şu durum tarafından belirlenmektedir:

$$W_a = 2\gamma_l \quad (2.6)$$

Eğer $\gamma_s > \gamma_{ls} + \gamma_l$ ise W_a , $2\gamma_{sl}'$ den büyüktür ve bu durumda damla yüzeye yayılmaktadır. Yayılma koşulları $W_a > 2\gamma_l$ olduğunda gerçekleşmektedir. Örneğin, adhezyon kohezyondan büyük olduğunda sıvı, katı yüzey üzerinde yayılmaya başlamaktadır [57, 58].



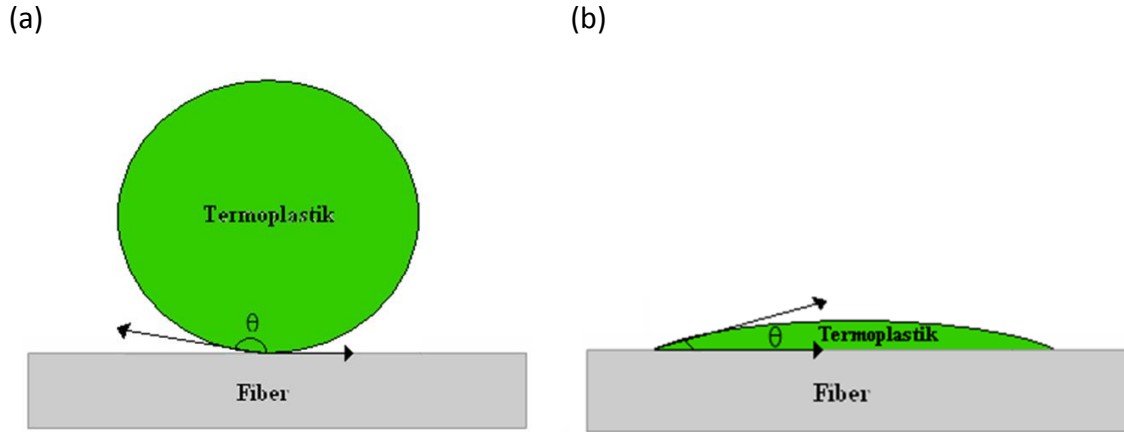
Şekil 5.2 Katı fiber üzerindeki sıvı polietilen damlanın oluşturduğu temas açısı

Yüzey gerilimi ve yüzey enerjisi bir sıvının bir yüzey üzerindeki davranışını belirleyen kuvvetlerdir. Bu kuvvetler sayesinde malzemeye yüzeyi sıvı tarafından ıslatılmakta ya da ıslatılamamaktadır. Yüzeyde ıslanmanın olup olmayacağını belirleyen, kohezyon ve adhezyon kuvvetleri arasındaki etkileşimdir. Kısa ve genel bir tanım ile adhezyon, iki farklı maddenin molekülleri arasındaki çekim kuvvetine verilen isimdir. Kohezyon ise, maddenin kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetidir [57, 58]. Sıvı-katı yüzey ara yüzeyinde, sıvının moleküllerinin birbirlerini çekimi sıvı moleküllerinin katı yüzeyin moleküllerini çekiminden büyükse (adhesif kuvvetler kohesif kuvvetlerden güçlüdür), yüzeyin ıslanması gerçekleşmektedir. Eğer sıvı moleküller birbirlerini katı yüzeyin moleküllerinden daha kuvvetli çekerse (kohesif kuvvetler adhesif kuvvetlerden daha kuvvetlidir), sıvı yuvarlaklaşmakta ve yüzeyi ıslatmamaktadır.

Bir sıvının yüzey ıslatma karakteristiklerini tanımlamanın bir yolu katı bir nesnenin yüzeyine Şekil 5.2' deki gibi yerleştirilen sıvı damlasının temas açısını ölçmektir. Temas açısı katı/sıvı ve sıvı/gaz ara yüzeyi tarafından oluşturulup sıvı bölgesinden ölçülen açıdır. Sıvı yüzeyi temas açısı 90°'den küçük olduğunda ıslatma gerçekleşmektedir.

Bir sıvının ıslatma kabiliyeti katı-gaz, sıvı-gaz ve katı-sıvı ara yüzeylerinin yüzey enerjilerinin bir fonksiyonudur. Bir ara yüzey boyunca yüzey enerjisi veya ara yüzeydeki yüzey gerilimi, ara yüzeyde bir birim alan yeni yüzey oluşturmak için gerekli enerji ölçüsüdür. Bir sıvının molekülleri arasında moleküller arası bağ veya kohesif kuvvetler yüzey gerilimine sebep olmaktadır. Sıvı başka bir madde ile karşılaştığında, genellikle iki malzeme arasında bir çekim oluşmaktadır. Sıvı ve ikinci madde arasındaki adhesif kuvvetler sıvının kohesif kuvvetlerine karşı yarışmaktadır. Zayıf kohesif bağlı ve diğer malzemeye kuvvetli çekimiyle sıvılar (veya adhesif bağlar yaratma isteğinde), malzeme

üzerinde yayılma eğilimindedir. Kuvvetli kohesif bağlı ve zayıf adhesif kuvvetli sıvılar başka bir malzeme ile temas halinde olunca yuvarlaklaşma veya bir damla oluşturma eğilimine girmektedir.



Şekil 5.3 a) Kötü ıslanma, b) İyi ıslanma

Fiber-matris arayüzeyinde Şekil 5.3a' da şematik olarak gösterildiği gibi, θ temas açısının 90° 'den büyük olması durumunda matris fiberi ıslatmayacaktır. Bu durumda kompozitlerde istenmez. Bunu yerine $\theta < 90^\circ$ ve hatta sıfıra olabildiğince yakın olması (Şekil 5.3.b) ve yüzeyde yayılması istenmektedir. Bu sayede katı fiberin yüzeyi sıvı polimer tarafından büyük ölçüde ıslatılacak ve bunun sonucunda iyi bir arayüzey oluşacaktır. Termodinamik olarak bakıldığında ise adhezyon kuvvetinin yüksek olması iyi ıslatma sağlayacağı, bu değerin yüksek olması istenmektedir.

5.4 Arayüzey Silan ve Uyumlaştırıcıları

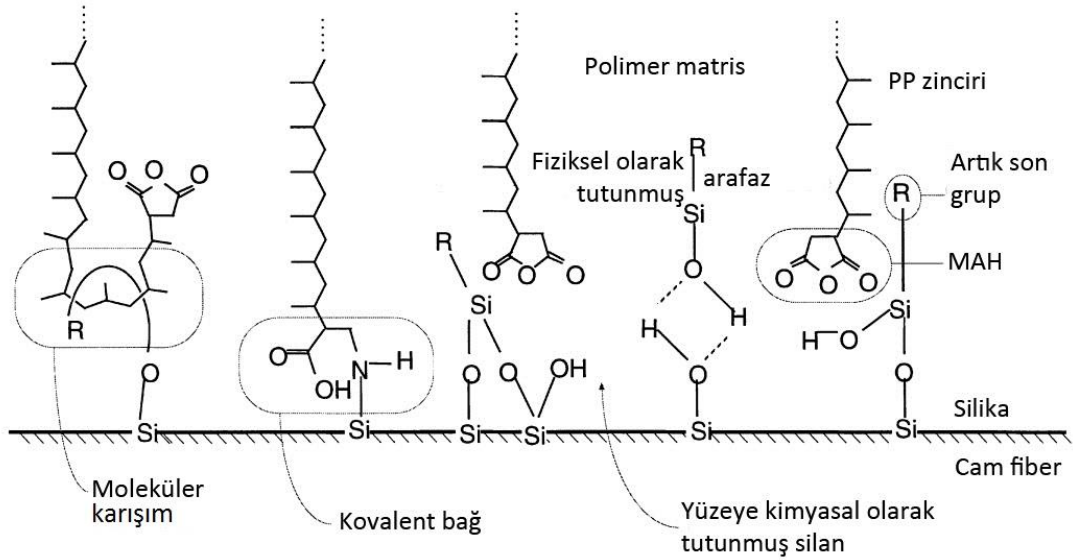
Fiberlerin yüzeylerindeki hidroksil grupları nedeniyle sahip oldukları hidrofilik doğaları, hidrofobik termoplastik matrise bağlanmayı engellemektedir. Diğer bir deyişle polar yapıdaki fiber ile apolar yapıda olan termoplastik malzeme arasında bağ kurulamamaktadır. Sonuçta fiber-matris yapışması zayıf olmaktadır. Yapışmayı artırmak için matris ve takviye arayüzeyine köprü olabilecek fonksiyonel grupları içeren bir bağlama elemanı ile fiberlerin işlenmesi gerekmektedir [59-65]. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri; polimer matrisin gerilmeleri fiber takviyeye aktarma ve fiberleri hasarlardan koruma yeteneğine bağlıdır. Bu özelliklerini arttırmak

için üretim sırasında fiberler silan ve kaplama elemanları karışimlarıyla işlenmektedirler [59-65].

Kaplama elemanları, organofonksiyonel silanlar, hidroksil ve R grupları (metakrilat, kationik stiril, vb.) içermektedir. Bunlar önceden minerale bağlı olan, sonrasında reçineyle kovalent bağlar oluşturabilen veya PE gibi reaktif olmayan reçinede yapışmayı arayüzey bölgesinde sahte birbirine geçmiş polimer açı oluşumu ile sağlayabilmektedirler. R grupları (silandan) PE'e uyumu sağlarken hidroksil grupları mineral esaslı fibere bağlanmaktadır. Böylece silan bileşikleri ile kaplanan ve bu sayade yüzeyi hidrofobik özellik kazanan fiberler, polimerik matriste daha kolay ıslanmakta ve sonuçta arayüzey yapışması artmaktadır [59-66].

Tipik silan türleri amino, metakril, epoksi, kloro, propil ve vinil esaslıdır. polipropilen matris ile yapılan çalışmalarda, bu matris türüne en iyi yapışmayı sağlayan amino silanlar olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle piyasadaki PP uyumlu fiberlerin üzerindeki silan bileşikleri çoğunlukla amino esaslıdır. Amino silanlardan sonra PP matriste iyi yapışmayı sağlayan diğer silanlar arasında vinil ve kloro bazlılar gelmektedir [52].

Polietilen ve polipropilen tarzı termoplasitik polimerler apolardır ve fiberin üzerinde bulunan silan bileşikleri ile sınırlı benzerlikleri vardır. Polimer, maleik anhidrit (MAH) ve benzeri uyumlaştırmacılar ile aşılandığında polarite ve fiber silanı ile daha etkili etkileşim kazanmaktadır. Bu bağ kimyasal reaksiyonla [67] oluşabildiği gibi polimerin silana difüzyonu sonucu fiziksel tutunma ve bölgesel dipol-dipol bağlanmasıyla [68] da oluşabilmektedir. MAK' ın son grubundaki oksijene hidrojen bağlanması da olası bir bağ türüdür. Bu bağlar Gamstedt ve arkadaşları tarafından [69] Şekil 5.4' te şematik olarak görüldüğü gibi özetlenmiştir.



Şekil 5.4 MAH modifikasyonu sonrası olası arayüzey bağlanmaları

MAH' ın PP'in aşılama reaksiyon mekanizmaları Lin [70] ve De Roover ve arkadaşları tarafından [71] açıklanmıştır. Arayüzey bağlanması başka şekillerde de iyileştirilebilmektedir. Thomas ve Schoonenberg [72] farklı yüzey kaplamalarının arayüzey kayma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmaların çoğu arayüzeyde polariteyi arttırmaya dayanmaktadır.

5.4.1 Polietilen Matriste Kullanılan Uyumlaştırıcılar

Polietilen matrisli kompozitlerde yapılan çalışmalarda çoğunlukla ahşap talaşı [73-75] pirinç kabuğu [76, 77] ve benzeri [78-80] gibi doğal malzemeler takviye olarak kullanılmıştır. Cam elyaf, basalt elyaf gibi yapay fiberli takviyeler ise süreksiz şekilde kullanılarak çalışılmış, sürekli elyafı PE kompozitlerle ilgili çalışmaya ise literatürde rastlanmamıştır.

Bikiaris ve ark. cam elyaf/LDPE kompozitlerde yapışmayı sağlayan silan ve kopolimerlerin kullanımı konulu makalede yapılan çalışmada; maleik anhidrit (MAH) aşıllı polietilen kopolimerinin, etilen/vinil alkol, etilen/akrilik asit gibi diğer kopolimerlerle karşılaştırıldığında daha başarılı bağlanma sağladığını görmüşlerdir [62].

Zhang ve arkadaşları [81] ise oluşturdukları cam elyaf/HDPE kompozitlerde MAH kullanarak daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Chen ve arkadaşlarının [82] çalışmasında basalt fiber ve ahşap katkı HDPE kompozitlerde ise en iyi çekme ve eğme dayanım değerlerinin %5-8 PE-g-MAH ilavesiyle olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kord [83] ise oluşturduğu pirinç kabuğu ve cam elyaf takviyeli HDPE kompozit gruplarında uyumlaştırıcı olarak %2 oranın MAH kullanarak çalışmasını yürütmüştür.

5.4.2 Polipropilen Matriste Kullanılan Uyumlaştırıcılar

Karain [52] tarafından yapılan çalışmada akrilik asit ve maleik anhidritin polipropilen matrislerde etkin olarak kullanılan uyumlaştırıcılar olduğunu belirterek maleik anhidrit aşılı PP'in, akrilik asit aşılı PP' e oranla çok daha az miktarlarda kullanılması sonucu benzer çekme dayanımı değerlerini verdiği görülmüştür.

Hamada ve ark. maleik anhidrit aşılı PP amino silan kaplı cam fiberli PP kompozitin uyumlaştırılması üzerine yaptıkları çalışmada; amit gruplarının, PP matris içindeki maleik grubu ve silan kaplama elemanı içindeki amino grup arasındaki reaksiyon sebebiyle oluştuğu ve bu sayede bağlanmanın sağlandığı belirtilmiştir [84].

Nygård ve ark. [85], PP matrise %5 MAH ilave ederek oluşturdukları sürekli E-camı fiberli kompozitlerde, MAH ilavesinin arayüzey ve ıslanma üzerinde etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Yine Nygard ve arkadaşlarının [86], biri PP ile %5' lik harman, diğeri ise PP-g-MAH önce fiberlerin üzerlerine kaplama ardından ergiyik PP ile işleme şeklinde yaptıkları çalışmada önceden kaplanan grubundan daha yüksek arayüzey kayma dayanımları elde etmişlerdir.

Benzer şekilde Karslı ve ark. [87], PP matrise %0, %2,5, %5 MAH harmanlama ile ilave ederek oluşturdukları süreksiz karbon fiberli kompozitlerde çekme dayancı ve sertlik değerlerinde yükseliş olduğunu gözlemlemişlerdir.

SÜREKLİ ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ

Termoplastik matris kullanımında temel problem takviye fiberinin yüksek viskoziteli reçine ile kaplanmasındaki zorluktur. Bu yüzden termoplastik kompozit üretiminde önemli olan mikroyapının üniform bir şekilde ıslatması ve bunun kuvvetli bir reçine/fiber arayüzeyi oluşturmasıdır [88].

Sözü edilen üniform ıslatmanın sağlanabilmesi için proseste ilk adım olarak prepreg olarak adlandırılan fiberlerin reçine tarafından ön-emdirilmesi yapılmış ince filmlerin üretilmesi olmalıdır. Aksi takdirde nihai ürün üretimi sırasında beklenen ölçüde fiber-matris birleşmesi gerçekleşemeyecektir.

Prepregler, sürekli fiberli, ince ve düz yapısı ile pultrüzyon ürünlerine çok benzemektedirler. Pultrüzyon üretimi yıllardır termosetler üzerinde uygulandığından ötürü bilinen bir prosestir. Bu nedenle prepreg üretimine yönelik çalışmalarda pultrüzyon prosesini incelemek faydalı olacaktır.

Bu bölümde öncelikle geleneksel pultrüzyon üretimi, sonrasında ise son 10 yıldır üzerinde çalışılan bir konu olan termoplastik matrisli pultrüzyon üretim yöntemi detayları ile incelenip prepreg üretiminde yararlanılabilecek kısımları ortaya konmuştur.

Pultrüzyon, matris emdirilmiş takviye fiberlerinin bir kalıptan çekilerek sürekli kesitli kompozit üretim prosesidir. Hem termoset hem de termoplastik matris ile kompozitler çekilebilir, fakat gerekli üretim tesisi ve ham maddeler oldukça farklıdır. Termoset pultrüzyonunda kuru fiberler düşük viskoziteli sıvı polimere daldırılarak ve ısıtılmış

kalıptan çekilirken matris çapraz bağlanarak (kürlenerek) kompoziti oluşturulmaktadır. Termoset pultrüzyonu iyi bilinen ve ticari olarak yerleşmiş bir üretim yöntemi olmasına rağmen termoplastik kompozitlerin pultrüzyonuna dair az bilgi vardır. Termosetlerin tersine termoplastik matrisler genellikle başlangıçtan tamamen polimerleşmiş haldedir. Ayrıca kimyasal reaksiyon gerektirmezler. Bu nedenle prosesten önce matrisi eritme, ardından basınç altında kompoziti şekillendirme ve son olarak kazandığı yeni şeklini koruması için soğutma şeklinde basit bir metottur. Ancak prosesin zor olan kısmı termoplastik reçinelerin çok yüksek eriyik viskozitesine sahip olmasıdır. Bu takviyenin eriyik reçineyi emmesini zorlaştırmaktadır [89].

Bu durumda enjeksiyon pultrüzyonu yöntemi hem kaliteli hem hızlı hem de düşük maliyetli üretim imkanı sunmaktadır. Takviye ve matris alternatiflerine göre proses parametrelerinde yapılacak optimizasyon çalışmaları sonucunda fiber ve matris arasında mükemmel ıslatma ve dolayısıyla yapışma sağlayabilecek bir yöntemdir. Söz konusu proses parametreleri reçine viskozitesi, fiberlerin ön ısıtma sıcaklığı, enjeksiyon ve kalıp sistemi sıcaklığı, soğutma kalıbı sıcaklığı, kalıbın konikliği, baskı oranı, çekme hızı, fiber oranı, fiber çapı gibi ayarlanması gerekli bir çok parametre vardır [89].

6.1 Termoplastik Prepregler

Termoplastik prepregler oda sıcaklığında sınırsız raf ömrüne sahiptir ve genellikle reçinenin ergime sıcaklığında proses edilmektedir. Termoplastikler için proses çevrim süresi termoset kompozitlere göre çok daha kısadır. Bu yeni bir teknolojidir ve termoset prepreglere göre pek çok proses ve tasarım avantajları sağlamaktadır. Termoplastik prepreglerin yararları şunlardır: geri dönüşüm, solvent ve kimyasallara karşı iyi direnç, kısa proses çevrim süresi, yüksek tokluk ve darbe direnci, soğutmasız raf ömrü, tekrar şekillenebilme ve şekillenme esnekliği, füzyon bağlanması ve in situ birleşmesi ile birleştirmede ve montajda büyük esneklik, tamir edilebilme potansiyelinin iyi olmasıdır [90].

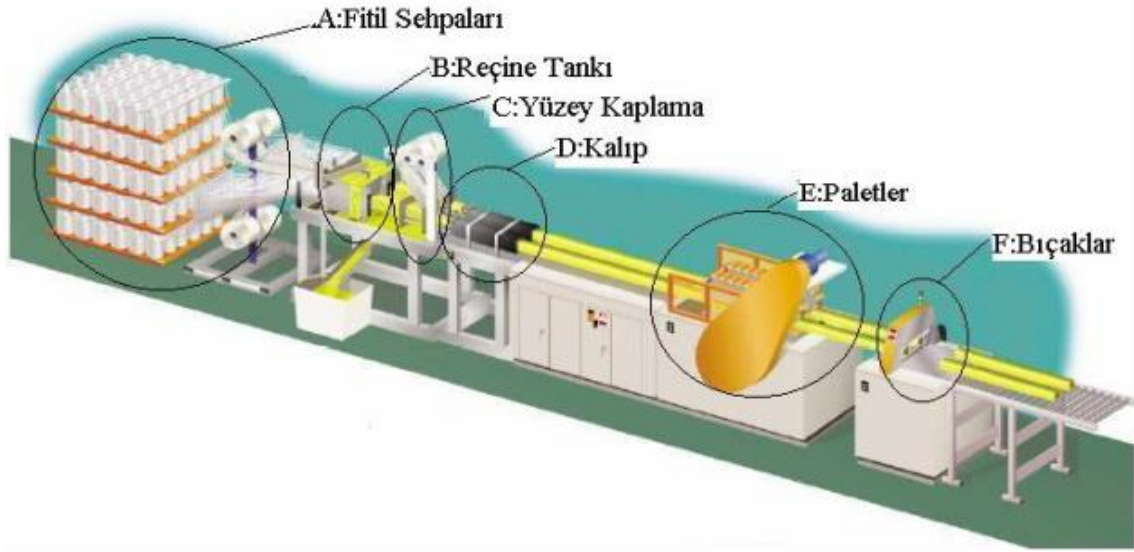
Termoplastik prepreglerin dezavantajları proses için yüksek sıcaklık ve basınçlar gerektirmesidir. Zayıf yapışma kabiliyetlerinden ötürü bazı proses zorlukları ile karşılaşilmektedir. Termoplastik prepregler, termoset prepreg üretimine benzer şekilde

solvent emdirme ve sıcak eriyik kaplama teknikleri ile üretilmektedir. Solvent emdirme tekniğini, termoplastikler yüksek kimyasal direnç gösterdiğinden uygulanması zordur. Sıcak eriyik kaplama tekniği, fiber ve reçine eş zamanlı levha şeklinde ekstrüze edildiği için ekstrüzyon prosesine benzer bir prosesdir. Film presleme ve kuru toz biriktirme gibi başka üretim metotları da mevcuttur. Film presleme prosesinde termoplastik reçine film takviyeler ile preslenmekte ve fiberler tamamen emdirilene kadar ısı ve basınç uygulanarak birleştirilmektedirler. Bu proses temiz ve solventsizdir, fakat boşluksuz prepreg üretimi için dikkat gerektiren bir yöntemdir. Kuru toz biriktirme tekniğinde başlangıç malzemesi olan reçine toz şeklinde olmalıdır. Toz püskürtülerek reçine bulutu oluşturulmaktadır. Fiberler bu bulutun içinden geçirilmekte ve şarj edilen reçine ile kaplanmaktadır. Daha sonra kaplanan fiberler reçineyi tamamen eritmek için bir ısı kaynağından geçirilmekte ve malzemenin sürekli levhası oluşturulmaktadır [88-91].

Bunların içinde en ekonomik ve en kalite ürün elde etme yöntemi sıcak eriyik kaplama tekniğidir. Enjeksiyon pultrüzyonu tekniğinin prepreg üretimine uyarlaması ile oluşan bir yöntemdir. Enjeksiyon pultrüzyonundan tek farkı kullanılan kalıbın prepreg kalınlığına, yaklaşık 3 mm' e indirilmiş olmasıdır. Haricinde enjeksiyon pultrüzyonu için geçerli olan tüm parametrelerin kullanılan yüksek viskoziteli reçineye uyarlanması gerekmektedir.

6.2 Geleneksel Pultrüzyon (Profil Çekme) Metodu

1940'ların sonundan itibaren rijit çubuk, lama, boru ve kiriş gibi endüstriyel profil ürünleri elde etmek üzere kullanılmaktadır. Pultrüzyon makinesinin taslağı Şekil 6.1' de gösterilmiştir. Pultrüzyon yöntemi, malzemenin kalıp boyunca çekilerek üretilmesi dışında, alüminyum ve termoplastikler için kullanılmakta olan ekstrüzyon prosesine benzemektedir. Ayrıca üretim sisteminin tamamı sırasıyla aşağıda açıklanmıştır. [34-45]



Şekil 6.1 Pultrüzyon makinesinin genel gösterimi

Pultrüzyon yönteminde, cam elyaf takviyesi olarak kullanılan devamlı elyaflara ek olarak dokunmuş fitil, keçe ya da bunların kombinasyonlarının bir veya birkaçı birlikte kullanılmaktadır. Fitol sehpalari elyaf, fitil ve keçelerin sarılı olduğu bobinlerin bulunduğu yerdir. Burası makine üzerinde olmayıp makineden ayrı bir bölümdür. Buradaki elyaf bobinlerinin sayısı, önceden mekanik özelliklerini belirlenen ve üretmek istenen malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Elyaf/hacim oranları %40 ile %80 arasında değişiklik gösterebilmektedir.

Makine üzerindeki ilk bölüm, reçine tankıdır. Burası, matris (bağlayıcı madde) malzemesi olarak kullanılan reçinenin konulduğu yerdir. Cam elyafları ile birlikte kullanılan takviye malzemeleri (keçe v.b.) önce termoset reçine tankının bulunduğu bu bölümden geçerek reçineye bulanmaktadır.

Reçine emdirilmiş cam elyaf lifleri ön kalıba girmektedir. Bu kısım reçine tankından hemen sonra yer almaktadır. Reçine emdirilmiş elyaf lifleri bu bölümden geçerken içlerindeki hava ve fazla reçinenin süzülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, reçinenin cam takviye malzemesine en yüksek düzeyde penetrasyonu sağlanmış olur.

Ön kalıptan çıkan malzeme, esas kalıba girmeden önce, kullanım yerinde atmosfer ve diğer dış etmenlerden korunması için yüzeyi karışık yönlü elyaf lifleri ile kaplanmaktadır. Bu işleme yüzey kaplama denir.

Pultrüzyon yöntemi, diğer yöntemlerden farklı olarak makineler ile yapıldığı için üretim düşük işgücü ile yapılabilir. Üretim esnasında kontrol edilmesi gereken parametreler, kalıbın sıcaklığı, profilin çekilme hızı, çekme biçimi (sürekli ya da kesikli), kesilme uzunlukları gibi tüm makine fonksiyonları görüldüğü gibi bir kontrol ünitesi yardımı ile yapılmaktadır.

Pultrüzyon metodunda, çelikten yapılmış kalıplar kullanılmaktadır. Kalıp malzemesi olarak kullanılan çeliğin cinsi, kalıp giriş bölgesinde uygulanacak sertleştirme işleminin derecesi, kalıpta kullanılacak ısıtma yöntemi v.b. etmenler kalıbın tasarım kriterlerini oluşturmaktadır. Pultrüzyon metodunda kullanılan kalıplar, yüksek karbonlu çelikten üretilmeli ve yaklaşık 25 mikron kalınlığında krom ile kaplanmalıdır. Kalıbın giriş radyusu (köşe açısı), malzeme cinsine ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Bu açı, 6-6,5 mm ile 20 mm'ye kadar değişiklik gösterebilmektedir [34-45].

Ayrıca, kalıbın boyu birçok faktöre bağlı olmakla beraber, en önemli faktör kesit alanındaki cidar kalınlığıdır. Kalıp uzunluğu genellikle 90-110 cm arasında değişmektedir. Fakat kalıp boyu, küçük çaplı çubuk gibi basit profiller için 60 cm; hassas boyutlu karmaşık şekiller için 150 cm ye kadar uzatılabilir [34-45].

Bu üretim sistemine ismini veren paletler veya çeneler, makine üzerindeki son kısımlardan biridir ve kalıptan çıkan profillerin, bu bölümdeki aparatlar ile çekilmesiyle sistem sürekliliği sağlanmaktadır. Paletlerin çekim hızı genel olarak 0,6-1,2 m/dak olup, çekilen parçanın uygun yapıya sahip olması halinde 3 m/dak hıza kadar artabilmektedir [34-45].

Bıçaklar makinenin en sonunda yer alan elemanlardır. İstenen uzunluğa gelen profil, bıçaklar vasıtası ile kesilerek proses tamamlanmaktadır.

Pultrüzyon yönteminin avantajları:

1. Üretim, düşük iş gücü ile yapılabilir,
2. Karmaşık geometriye sahip şekiller bile, kolaylıkla üretilebilir,

3. Üretim kolaylığından dolayı, gün geçtikçe düşen maliyetleriyle, metaller ile sıkı bir yarış halindedirler,
4. Farklı mekanik özellikler elde etmek için, farklı elyaf katmanları ve kombinasyonları ile CTP üretilebilir,
5. Hacimsel bazda, polimer üretimi için metallerden daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar,
6. Üretim hızı genel olarak 0.6m–1.2m/dak. olup, üretilen parça eğer uygun bir yapıya sahip ise 3m/dak. gibi yüksek bir hıza çıkabilir,
7. Ekonomik olması ve birçok pazar tarafından kullanılması sayesinde, en hızlı ilerleme gösteren kompozit üretim yöntemidir,
8. Pultrüzyon, yönlendirilmiş elyaf kullanılan bir prosestir. Elyafın büyük bir kısmı optimum çekme dayanımı elde edecek şekilde boyuna yerleştirilirken bir kısım elyaf ise istenen ürün özelliklerini sağlayacak şekilde farklı yönde düzenlenebilmesi,
9. Düşük işçilik gerektiren büyük ölçüde otomatikleştirilmiş gibi proses olması,
10. İşçilik maliyeti satış fiyatının %5-10'u arasında kalabilmesi,
11. Pultrüzyon yönteminde, ekipman yatırım masraflarının diğer yüksek hacimde üretim yapılan yöntemlerle kıyaslandığında düşük olması,
12. Ayrıca, tüm bu unsurlar orta-yüksek hacimli uygulamalar için pultrüzyon yöntemini ekonomik kılmaktadır.

Pultrüzyon yönteminin dezavantajları:

1. Elyafın büyük bölümü çekme dayanımı sağlayacak yönde yerleştirildiğinden, genellikle çapraz yönlerdeki mukavemetin düşüklüğü,
2. Genel olarak çapraz yönlerde elde edilen özellikler, gerçek çekme dayanımının %10–25 olması,
3. Pultrüzyon ürünleri genellikle rekabet halinde oldukları malzemelerle aynı rijitlik değerlerine sahip olmaması,
4. Bu durum rakip malzemelerin rijitlik değerlerine ulaşmak için kesitte ya da cidar kalınlığında tasarım değişikliklerinin yapılmasını zorunlu kılmakta,

5. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal özelliklerde olmaması, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesme dayanımı bulunmakta,
6. Malzemenin kalitesi, üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır. Fakat bu yöntemde standartlaşmış bir kalitenin olmaması,
7. Termoset kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme oldukları için, kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler yaratabilmektedir. (Termoplastik kompozitlerde böyle bir sorun yok!)

6.3 Termoplastik Pultrüzyon

Kompozit malzeme endüstrisi sürekli bir büyüme içersindedir ve pazar payı giderek genişlemektedir. Günümüzde termoplastik kompozitlere doğru bir geçiş öngörülmektedir. Termoplastikler bu geçişi termosetlere göre daha avantajlı olmasına borçludur. Çevresel kirliliğin kontrolü, yüksek performans özellikleri ve geri dönüşüm olanakları termoplastik kompozitleri çok çekici kılmaktadır. [92]

Kompozit sektöründe en kuvvetli büyüme pultrüzyon alanında gerçekleşmiştir. Pultrüze edilmiş kompozitler geleneksel olarak termoset reçine sistemleri kullanılarak üretilmektedir. Son birkaç yılda solventsiz termoplastik kompozitlerin pultrüzyonu, pultrüzyon endüstrisinde büyük bir kuvvet olma beceri göstermiştir. [92-95]

Termoplastik kompozitlerin prosesi sırasında fiberlerin reçine emdirilmesi ve boşluk oranının azaltılması için malzemeye ısı ve basınç bir arada uygulanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, viskozitesi düşen polimer ve uygulanan basınç ergimiş faza yeterli akışı sağlamak ve reçine ile fiberler kaplanmış olmaktadır. Müteakip soğutma basamağı ile kristalleşmeler meydana gelmekte ve fiber ile reçinesi bir araya getirilmiş kompozit şekillendirilmektedir. Erimiş malzemenin akışı Darcy Kanunu doğrultusunda gerçekleşmektedir. Bunun bir sonucu olarak polimer matrisin düşük viskozitesi ve düşük taşınma mesafeleri fiber-matris birleşmesini düşük basınçlar uygulansa dahi arttırmaktadır. [92-95]

Akış mesafesi genellikle polimer iplikler ile karıştırılmış takviyeli iplikler kullanılarak azaltılabilir. Bu şekilde çok daha düşük basınçlar altında proses gerçekleştirilebilir. [92-95]

6.3.1 Termoplasik Pultrüzyon Hattı

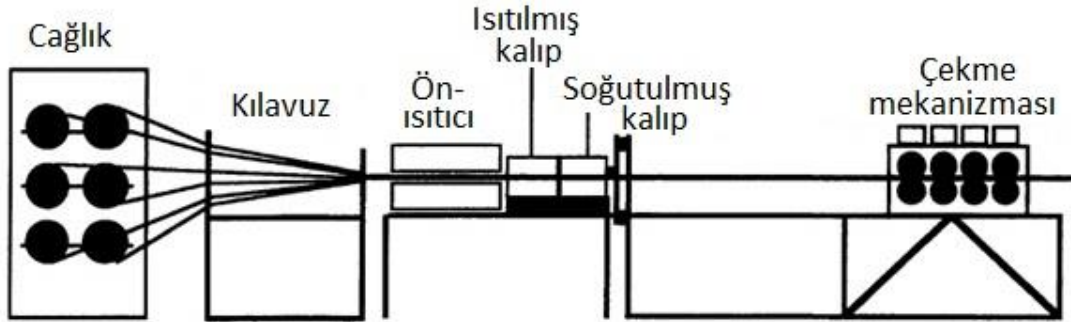
Bu hat çözgü sehpa (cağlık*), takviye kılavuzları (tarak), ısıtma sistemi, kalıp, soğutma sistemi, çekme cihazı ve kesme testeresinden oluşmaktadır.

(*Cağlık: Çözgüleme makinelerinde çözgü çekimi yapabilmek için bobinlerin düzgün ve sabit bir şekilde dizilmeleri gerekmektedir. Bobinlerin üzerindeki ipliklerin rahatça sağlabilecek şekilde sabit ve düzgün olarak dizildikleri iğlerin bulunduğu raflar ile ipliklerin düzgün sıralar halinde çözgüleme bölümüne sevk edilirken geçtikleri kısımların tümüne birden çağlık denir.)

Hattın işleyişinde önemli noktalar şunlardır:

- Malzemenin beslenmesi (kılavuzluk cihazları ile)
- Önısıtma reçinenin fiber demetleri içine emdirilmesinin sağlanması için önemlidir; termoplastik reçinenin eriyik viskozitesi mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Gerekli önısıtma süresi ve sıcaklığı reçineye, takviye malzemesi miktarına ve çekme hızına bağlıdır. Takviye fiberlerin kurutulması da önısıtma sırasında gerçekleştirilir.
- Kalıbın biçimi de pultrüzyon prosesi için önemli bir faktördür. Pultrüzyon kalıbının görevi; reçine/fiber kütlesini, reçinenin içinde fiberlerin üniform bir biçimde dağılmasını sağlayacak bir duruma getirmektir. Bunu yapmak için ısıtılmış kalıp yeterli basıncı yaratacak şekilde tasarlanmalıdır ki reçine/fiber kütlesi kalıp boyunca ilerleyebilsin. Ayrıca kalıbın gerekli reçine akışını sağlayabilmesi için yeterli uzunlukta olmalıdır.
- Soğutma cihazı bir başka önem arz eden bölümdür. Termoset reçineler için pultrüzyona tezat olarak soğutma cihazı termoplastik pultrüzyonunda kaçınılmazdır. Son ürünün boyutsal kararlılığını sağlamaktadır.

Termoplastik pultrüzyon prosesinin ana hatları Şekil 15’de verilmiştir. Çağlığa gönderilen tekstil yapıları kalıba girmeden ön ısıtılabilir. Bunun amacı termoplastik matrisin takviye malzemesine emdirilmesini sağlamaktır. Bu esnada giren malzemenin kurutulması gerçekleştirilir. Kalıpta, malzemenin şekillendirilmesi ve birleştirilmesi meydana gelir. Kalıp farklı ısıtma bölgelerine ve en sonda bir tane soğuma bölgesine sahiptir. Çekilen malzemeler uygun uzunlukta kesilmektedir. [88-95]



Şekil 6.2 Termoplastik pultrüzyon makinasının şematik gösterimi

Pultrüzyon makinasında görüldüğü üzere fiberler önce bir ön ısıtıcıdan geçerek ısıtmaktadır. Ardında kalıplara çekilmektedirler. Konik bir girişe sahip ilk kalıp ısıtmalı bir kalıp olup, koniklik açısı reçine emdirilmesinde büyük öneme sahiptir. Kalıp sıcaklığı, kalıba bağlı bir termokupl ile sürekli ölçülerek, sıcaklığın stabil kalması sağlanmaktadır. Ardından reçinenin katılaşp ürünün son boyutlarını almasını sağlayan soğutma kalıbına çekilmektedir. Bu kalıpta soğutma, kalıp içinde yer alan su kanallarında soğuk suyun devamlı olarak dolaştırılması ile sağlanmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın deneysel kısmında kompozit malzeme üretiminde kullanılan termoplastik matris malzemelerinin fiziksel karakterizasyonları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Termoplastik matrisli kompozit malzeme üretimde çeşitli uyumlaştırıcılar ile harmanlanmış polietilen (PE) ve polipropilen (PP) matrisler kullanılmıştır. Saf ve uyumlaştırılmış haldeki polimerlerin fiziksel özelliklerinin tayin edilmiştir. Saf haldeki polimerlerin uyumlaştırıcı ile harmanlandığı takdirde matris malzemesi üzerindeki etkisi erime akış hızı (MFR) ve diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ölçümleri ile incelenmiştir.

7.1 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada kullanılan matris ve uyumlaştırıcı malzemelerin özellikleri Çizelge 7.1' de verilmektedir. Matris malzemesi olarak iki ticari çeşit poliolefin kullanılmıştır. Bunlardan biri yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), diğeri ise random kopolimer polipropilen (PPRC)'dir. Bu matrislerin fiberler ile arayüzey bağlantısını artırmak için dört farklı çeşit uyumlaştırıcı kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 1' de verilen bu uyumlaştırıcılardan U1 ve U2 kodlu olanları HDPE matrisin uyumlaştırılmasında kullanılırken, U3 ve U4 PPRC için kullanılmıştır.

Çizelge 7.1 Çalışmada kullanılan matris ve uyumlaştırıcıların içerik ve akışkanlık özellikleri

Kodu	Üretici	Malzeme içeriği	MFR (g/10 dk)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
PE	Carmel Ipethene	HDPE	0,07*	0,948	24,5	600
U1	Admer	PE-g-MAH	4,3*	0,923	26	>500
U2	Arkema	EMA-GMA	6,0*	0,95	4	1100
PP	Carmel QB79P	PPRC	0,28**	0,900	23	13 (akmada)
U3	Admer	PP-g-MAH	13,0**	0,890	25	>500
U4	Orevac	PP-g-MAH	150-200**	0,909	22	12

* 190 °C, 2,16 kg ** 230 °C, 2,16 kg

Takviye olarak sürekli 16-22,5 µm çaplı E-camı fiber (Cam Elyaf AŞ, PP3 1200 teks) kullanılmıştır. Diğer takviye malzemesi olan bazalt fiber (GBF 787), 13 µm fiber çapına sahip 1300 teks' lik sürekli bazalt roving demetidir. Üzerinde PP uyumlu silan bulunmaktadır. Roving demetinin çekme dayancı 0.6 N/teks, elastik modülü 91 GPa ve kopma uzaması ise %3.1'dir. Kullanılan diğer bir takviye malzemesi ise aramid fiberdir. Teijin-Twaron marka 2500 teks sürekli roving demetleri 390 N çekme dayanımı ve %3,7 kopma uzaması değerine sahiptir.

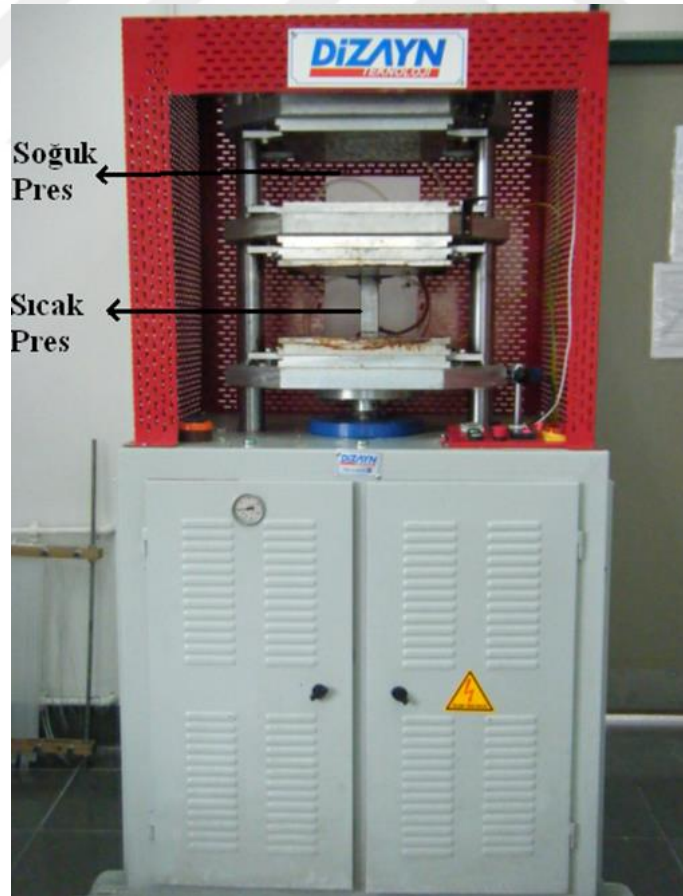
7.2 Numune Hazırlama ve Kodlama İşlemi

Yaklaşık 100 gr'lık partiler halinde bir tür termokinetik mikser olan jelimatta (Şekil 7.1) ergitilmiştir. Ergitilen termoplastik malzemeler sıcak preste basılarak, plakalar üretilmiştir. Sürekli fiberler, bir yönlendirme sistemine tek yönlü şekilde dizildikten sonra, presin yüksek basıncında plastik tarafından yönlenmesinin bozulmaması için gerdirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan iki matris plakası arasına gerdirme aparatına yerleştirilmiş takviye malzemesi konularak, matrisin çalışma sıcaklığında önce 3 dakika izotermal sonra 3 dakika izostatik olarak (Şekil 7.2) preslenmiştir. Bu şekilde yalnızca

matris ve fiberlerden oluşan (A grubu) kompozitler üretilmiştir. Çalışma sıcaklığı PE için 200°C, PP için 220°C olarak seçilmiştir.

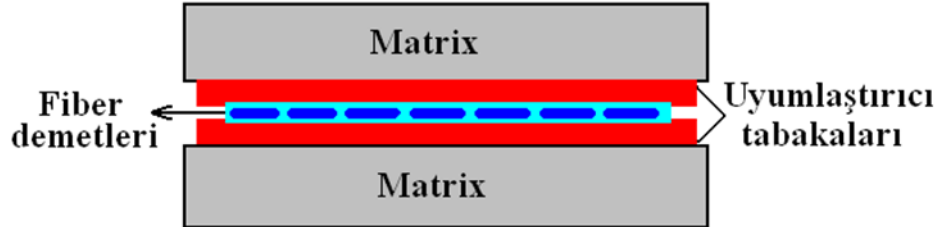


şekil 7.1 Jelimat



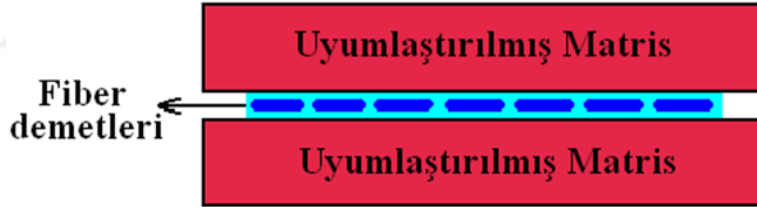
şekil 7.2 Sıcak ve soğuk kademeli pres

Fiber-matris arayüzey bağlantısını arttırmak amacıyla numunelere iki farklı yöntemle uyumlaştırıcı ilavesi yapılmıştır ve bu numuneler Grup B ve Grup C olarak adlandırılmıştır. Grup B numuneleri uyumlaştırıcı, matris plakaları tarzında preste hazırlanmış ve matris plakası ile fiber demetleri arasına ilave bir tabaka olarak yerleştirilerek üretilmiştir. Şekil 7.3' te bu grubun şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 7.3 Grup B numunelerin şematik görünümü

Grup C 'de ise uyumlaştırıcı ile matris malzemesi önce jelimatta belirli oranlarda harmanlanarak uyumlaştırılmış matris plakaları hazırlanmıştır. Bu uyumlaştırılmış plakaların doğrudan fiberlerin üzerine uygulanması ile kompozit üretilmiştir. Şekil 7.4' de bu gruba ait şematik görünüm verilmiştir.



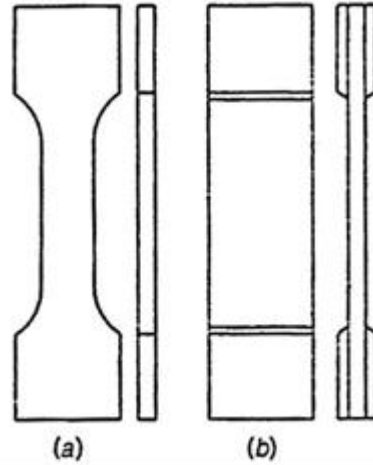
Şekil 7.4 Grup C numunelerin şematik görünümü

7.3 Mekanik Testler

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin saptanması için çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen numunelerin kalınlıkları 2 mm altında ve sünek karakterli bir matrise sahip olduğundan bu numunelere eğme ve darbe testi gibi mekanik testler uygulanamamıştır. Çekme testi haricinde T-soyulma ve bindirmeli-kayma testleri de gerçekleştirilmiştir.

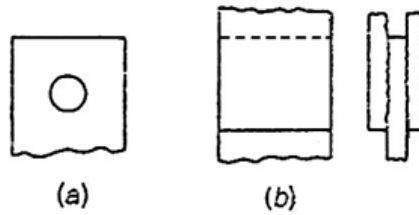
7.3.1 Çekme Testi

Statik tek eksenli çekme testi en basit ve en çok kullanılan mekanik testtir. Bu test malzemenin elastik modülü, çekme dayanımını ve Poisson oranını belirlemek için yapılmaktadır. Kompozit malzemelerde çekme testi genellikle düz (yassı) numunelere uygulanmaktadır. En çok kullanılan numune geometrileri Şekil 7.5’ de görüldüğü gibi kemik ve klape uçlu düz kenarlı numunelerdir. Tek eksenli bir yük Şekil 7.6’ da gibi pim tipi veya testere çenesi tipi bağlantı ucu sayesinde uygulanmaktadır [96-102].



Şekil 7.5 (a) Kemik ve (b) düz kenarlı çekme test numuneleri

Kemik numuneleri boyun yarıçapında, özellikle tek eksenli numuneleri test ederken, numunenin gerilim konsantrasyonları ve zayıf aksenal kayma özellikleri yüzünden hata verebilmektedirler. Pim tipi uç bağlantıları da düşük yüklerde kesme yüzünden başarısız olma eğilimindedir. Bazen araştırma amaçlı çok delikli uç bağlantıları özellikle eşit yük dağılımı sağlamak için tek bir pim tipi uç bağlantısı yerine kullanılmaktadır. Fakat bu normalde deneysel karakterizasyonda kullanılmaz. Klape uçlu düz kenarlı numune (Şekil 7.6.b), testere çenesi tipi bağlantı uçları ile kaydırma yapmaksızın kullanılabilir [28-30].

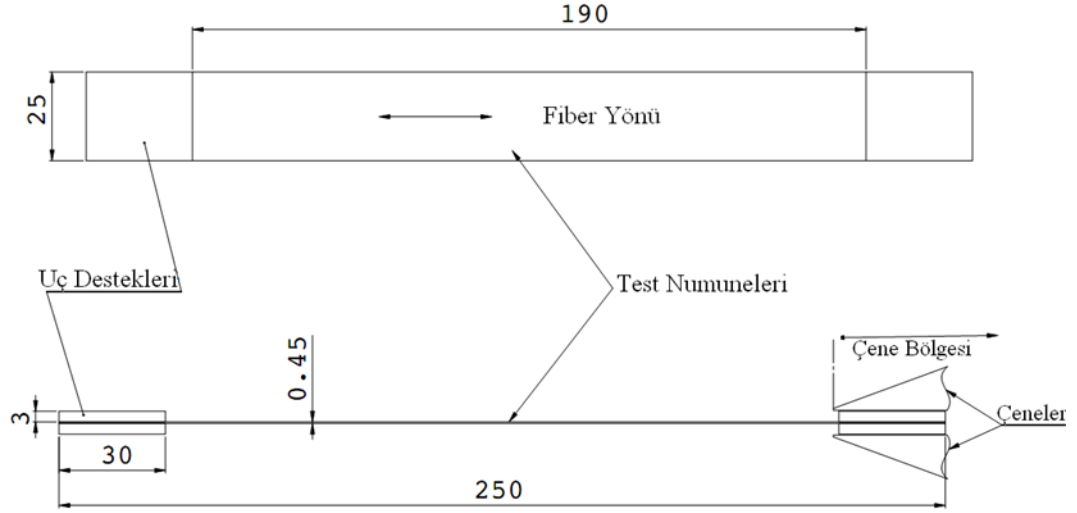


Şekil 7.6 Çekme testi numuneleri klape bağlantıları: (a) pim tipi, (b) testere çene tipi

Çekme testinde veri kaydı, uygulanan yükü ve yüke paralel ve dik yöndeki gerinmeyi ölçmekten ibarettir. Uygulanan yük genellikle test aleti ile birlikte bulunan yük hücresinden okunan değerlerin ortalaması alınarak ölçülmektedir. Gerinmeler bir ekstensometre veya elektrikli bir gerinim ölçerin (strain gauge) ortalaması alınarak ölçülebilir. Bu veriler kopma gerçekleşene kadar alınmaya devam etmekte, malzeme için bir gerilim-gerinim eğrisi oluşturulup, gerekli malzeme özellikleri belirlenmektedir. Eğer uygulanan kuvvet boylamasına yönde ise gerilim-gerinim eğrisinin başlangıçtaki eğimi boylamsal modülü vermektedir (E_L). Benzer şekilde enlemesine modül (E_T) yükü enine yönde uygulayarak belirlenmektedir. Maksimum uzunlamasına ve enlemesine çekme dayanımları (σ_L ve σ_T) iki testteki kırılmadaki yükleme bilgilerinden elde edilmektedir [28-30].

Boylamasına yöndeki tek eksenli bir kompoziti test ederken yük yönünün fiber yönü ile uyuşması sağlanmalıdır. Birkaç derecelik hizasızlık son derece düşük elastik modülü ve maksimum çekme dayanımı değerleri vermesine sebep olabilir. Bu problem enine yöndeki testler için kritik değildir.

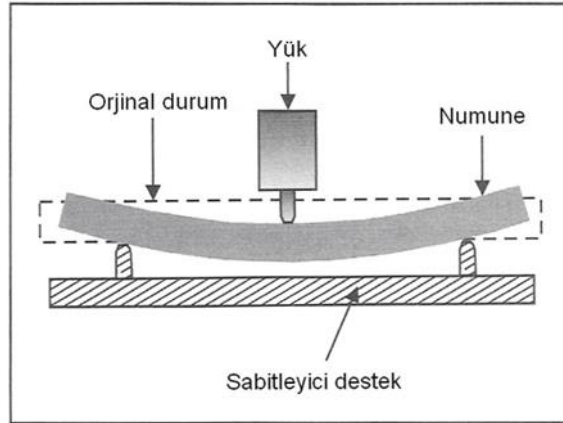
Plastik matrisli kompozitlerin çekme özellikleri TS EN ISO 527-5 [103] ve ASTM D 3039 [104] ile tayin edilmektedir. Üretilen kompozitlerden fiber yönüne paralel olarak çekme standardı olan TS EN ISO 527' e göre numuneleri çıkartılmıştır. Şekil 6.7' de görüldüğü 250mm uzunluğunda ve 25 mm genişliğinde dikdörtgen şeklindeki numunelerde test edilmiştir. Çekme testi universal çekme makinasında, 5 mm/dakikalık hızda gerçekleştirilmiştir. Numuneler ince olduğundan ötürü, çenelerde kaymayı önlemek için numunelerin uçlarına 6 mm kalınlığında, 25 mm genişliğinde, 30 mm uzunluğunda uç destekleri kalıplanarak takılmıştır.



Şekil 7.7 Çekme numunelerinin boyutları (Boyutlandırmalar mm cinsindendir)

7.3.2 Eğme ve Kayma Testi

Eğme kuvvetleri iki mesnet üzerine yerleştirilen dikdörtgen biçimli numunenin üzerine bastırılmasıyla belirlenmektedir. Çoğunlukla basma Şekil 7.8’ de görüldüğü gibi tek noktadan yapılmaktadır. Bu, standart eğme testi veya üç noktalı eğme testi olarak adlandırılmaktadır. Ender olarak kompozitlerde iki noktadan basınç uygulanmaktadır. Bu durumda dört noktalı eğme testi olmaktadır [96-102].



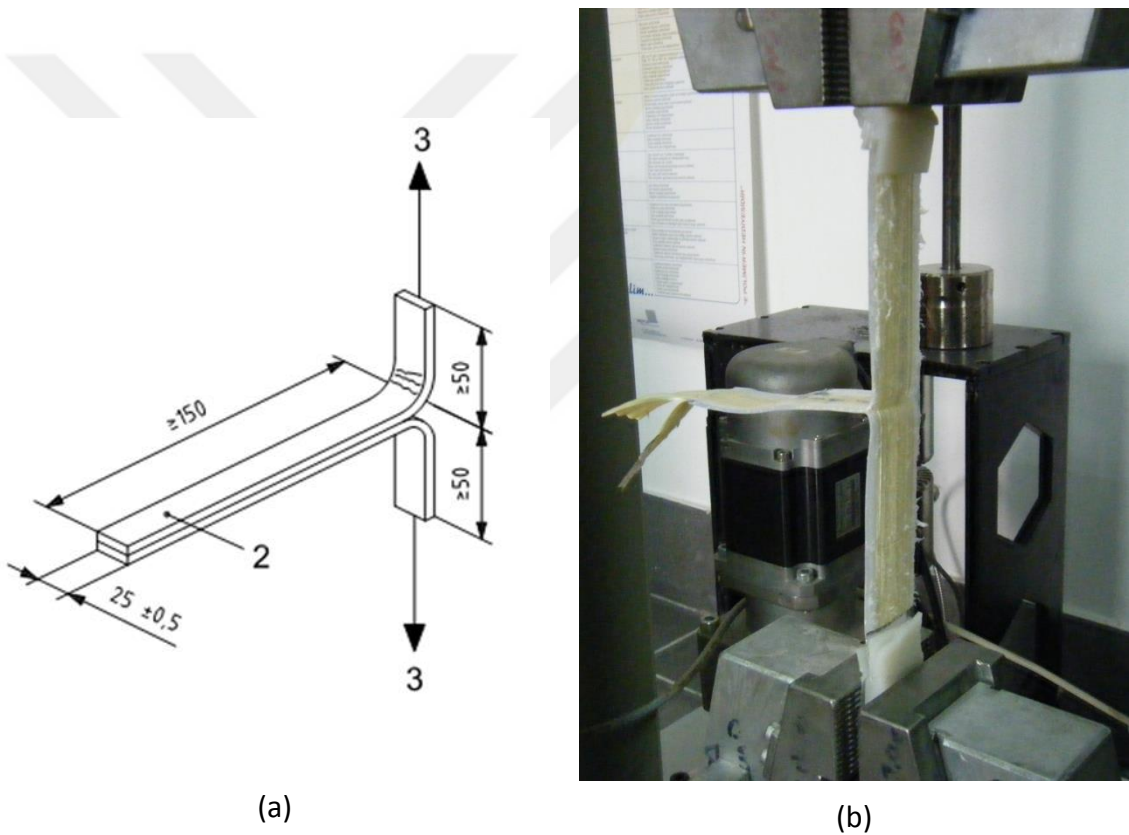
Şekil 7.8 Eğme testi

Test sırasında numunenin üst kısmı basma kuvveti altında kalırken, alt kısmı çekme kuvveti altında kalmaktadır. Parçanın orta kısmında bir tür geçiş kuvveti oluşmaktadır. Bu geçiş düzleminde saf kayma gerçekleşmektedir. Kayma testleri, fiber-matris arası bağ dayanımlarını belirlemek için önemli testlerdir.

TS EN ISO 178 [105] standardına göre eğme testi, TS EN ISO 14130 [106] standardına göre katmanlar arası kayma testi uygulanmıştır.

7.3.3 T-Soyulma (T-Peel) Testi

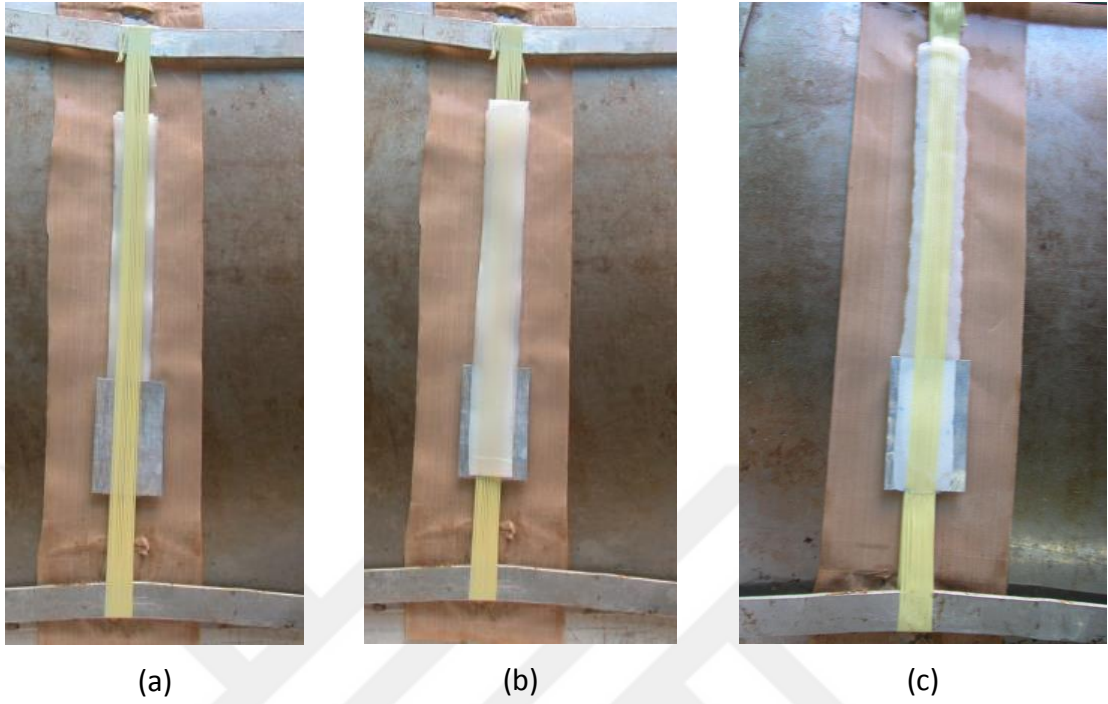
Uygulanan diğer bir test T-soyulma testidir. T-soyulma testi esnek ve bükülebilir malzemeler uygulanan bir testtir. Test, EN ISO 11339 [106] standardında tanımlanmıştır. Esasen metal malzemelerde kullanılan yapıştırıcıların performanslarının test etmek üzere tasarlanmış olsa da esnek diğer malzemeler için de kullanılabilir. Buna test numunesi temsili şekli ve ebatları Şekil 7.9’ da verilmiştir.



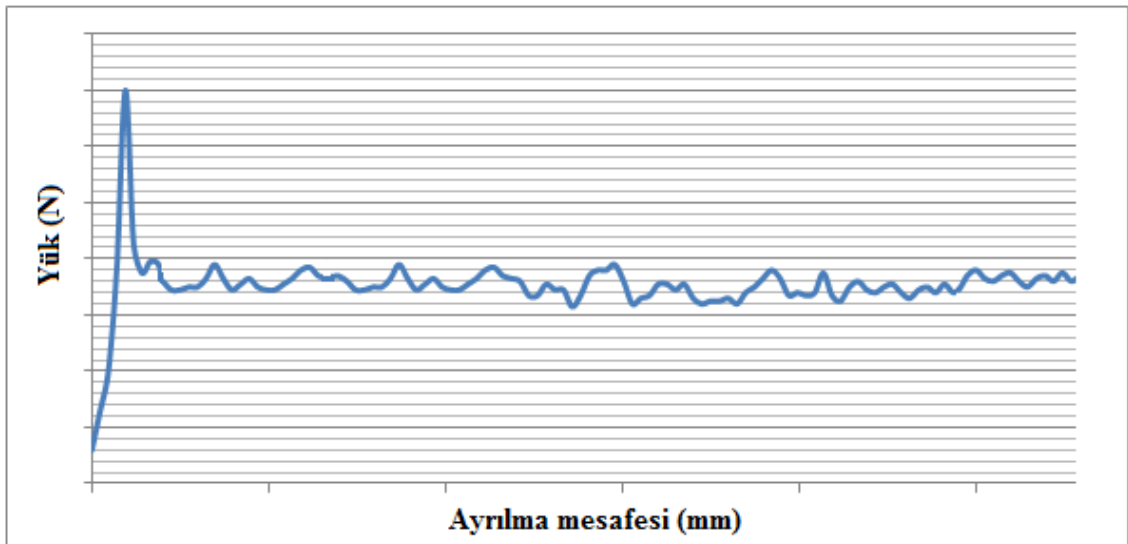
Şekil 7.9 T-soyulma deney numunesi: a) şematik gösterim, b) test görüntüsü

Bu test numunesinin elde edilebilmesi için Şekil 7.10’ da görüldüğü üzere numune üretimi esnasında fiber kasmağının bir ucuna 50 mm uzunluğunda üst üste ikişer ince alüminyum katmanı yerleştirilmiştir. Üretim sonunda bu iki alüminyum katmanı birbirine yapışmadığından numunelerin 50 mm’ lik söz konusu bölgeleri ayrık halde

kalmıştır. Daha sonra bu bölgeler çekme çeneleri arasına yerleştirilerek 100 mm/dakika hızda çekilerek numuneler bu bölgelerden soyulması sağlanmıştır.



Şekil 7.10 a) Fiber kasağına alüminyum folyo yerleştirilmesi, b) fiberlerin üzerine matris yerleştirilmesi, c) preslenmiş T-soyulma test numunesi



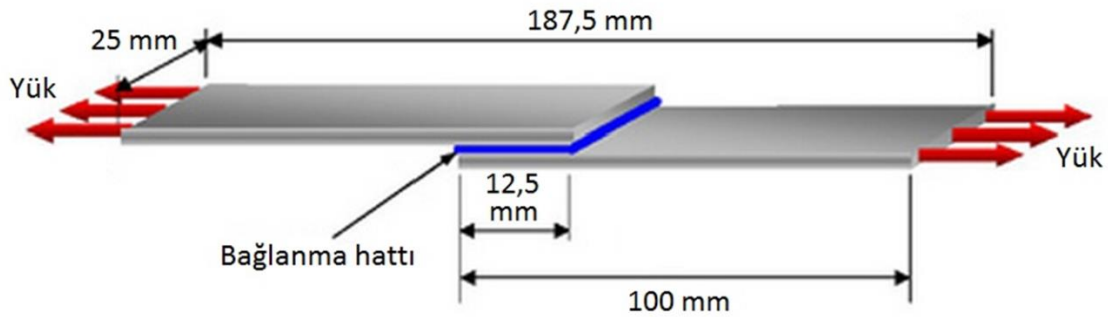
Şekil 7.11 T-soyulma testi eğrisi

Test sonunda Şekil 7.11’ da görülen tarzda yük-ayrılma mesafesi grafikleri elde edilmiştir. Standart bu eğrideki ilk 25 mm ve son 25 mm’lik kısımlar çıkartıldıktan sonra maksimum ve minimum yüklerin belirlenmesini ve bunların ortalamasının alınarak

numune kesit alanına bölünmesi ile soyulma dayanımının elde edilmesini öngörmektedir.

7.3.4 Bindirmeli-Kayma (Lap-Shear) Testi

Bindirmeli-kayma testi, tek taraftan bindirmeli bağlantı parçalı numunelerde yapıştırıcıların kayma dayanımını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu test yapışma dayanımı, yüzey hazırlama parametrelerini ve yapışma ortamının dayanıklılığını belirlemek için uygulanmaktadır. Şekil 7.12’ de bu teste ait bir numunenin şematik görünümü ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 7.12 Bindirmeli-kayma testi numunesi şematik görünümü

Bindirmeli kesme testi için sürekli fiberli numune hazırlamada 87,5 mm uzunluğunda iki tane alüminyum folyo Şekil 7.9’ dakine benzer şekilde iki fiber tabakası arasına çapraz olarak yerleştirilmiştir. Folyoya komşu fiber tabakası kesilip atılmıştır, böylece numunenin her iki ucunda tek fiber tabakası ve orta kısımda iki 12,5 mm uzunluğunda bindirilmiş iki fiber tabakası elde edilmiştir. Fibersiz numune hazırlamada ise 2 mm kalınlığında hazırlanan iki katman yine 12,5 mm mesafe ile üst üste yerleştirilerek 4 mm kalınlığında bir kalıbın içine preslenmektedir. Şekil 7.13’ de bu şekilde hazırlanan numunelerin presleme öncesi ve test sonrası görüntüleri yer almaktadır. Çekme çeneleri arasında numunenin kaymasını önlemek için uç destekleri her numunenin her iki uca kalıplanarak eklenmiştir ve test TS EN 1465 [106]’e göre yapılmıştır. Verilen tüm değerler beş ölçümün ortalamasıdır.



Şekil 7.13 Bindirmeli-kayma test numunesi: a) hazırlama, b) test sonrası görüntüleri

7.4 Fiziksel Testler

Bu grupta numunelere kalsinasyon, yoğunluk testi yapılmıştır. Ayrıca matris malzemelerine MFR ve DSC testleri uygulanmıştır.

7.4.1 Kalsinasyon Testi

Yanmayan fiberli kompozit malzemelerde kütlece fiber oranını belirlemek amacıyla TS 1177 EN ISO 1172 [107]'ye göre yapılmaktadır. Test, numunelerin tartılması ve hemen ardından tanımlanan sıcaklıkta kalsine edilmesiyle gerçekleşmektedir. Numuneler sonra tekrar tartılmakta ve kalsinasyon işleminden önce ve sonraki numunelerin kütle farkından belirlenen yanmayan madde muhtevası belirlenmektedir. Her numune için fiber muhtevası M_f , başlangıç kütlelerinin yüzdesi olarak aşağıdaki Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$M_f = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (7.1)$$

Burada; m_1 kuru krozenin başlangıç kütlesi, m_2 kuru krozenin ve kurutulmuş numunenin başlangıç kütlesi, m_3 kroze ve kalsinasyon işleminden sonraki kalıntının son kütlesidir.

Kompozitlerin fiber içerikleri 650 °C' de numuneleri yakarak bulunmuştur. Matris ve fiber malzemelerin yoğunluklarından yola çıkılarak basit karışımlar kuralı vasıtasıyla kompozitlerin ağırlık ve hacim oranlarına ulaşılmıştır.

7.4.2 Yoğunluk Testi

Kompozit numunelerin yoğunluklarını belirlemek amacıyla TS EN ISO 1183-1 [108] göre yoğunluk tespiti daldırma metodu ile yapılmaktadır. Yoğunluk tayini için numune, azami çapı 0,5 mm olan bir telle havada asılı şekilde tartılmakta ve kütlesi kaydedilmektedir. Numune, bir destek üzerinde bulunan daldırma kabı içerisindeki daldırma sıvısına, tel üzerinde asılı bir şekilde daldırılmaktadır. Numune yüzeyine tutunan hava kabarcıkları bir tel yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Daldırılmış numune 0,1 mg doğrulukla tartılmaktadır. Numunenin 23 °C' deki yoğunluğu, ρ_s , g/cm³ olarak aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$\rho_s = \frac{m_{s,A} \times \rho_{IL}}{m_W - m_{s,IL}} \quad (7.2)$$

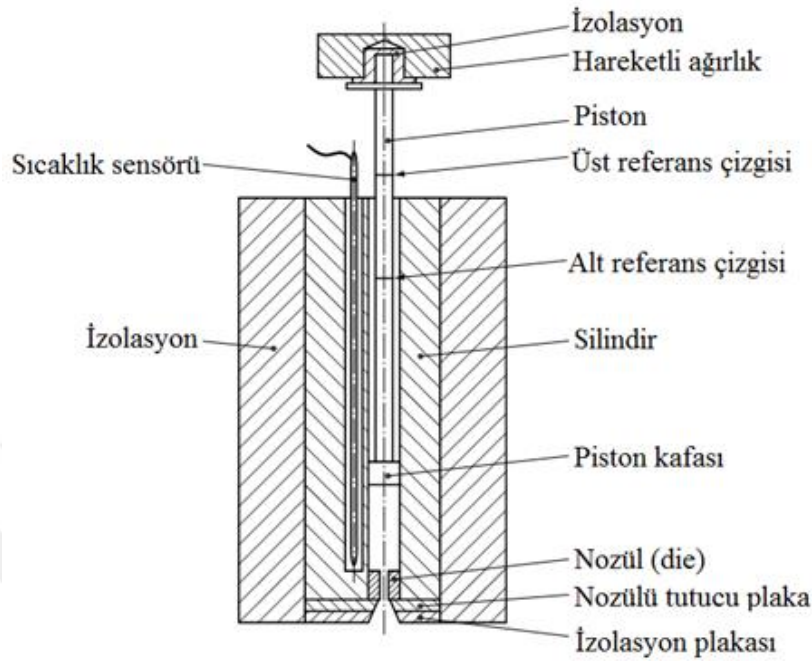
Burada; $m_{s,A}$ numunenin havada görünür kütlesi, $m_{s,IL}$ numunenin daldırma sıvısında görünür kütlesi, ρ_{IL} tedarikçi tarafından beyan edilmiş, daldırma sıvısının yoğunluğudur.

Matris malzemelerinin yoğunlukları 1 g/cm³' ün altında olmasından dolayı bu deneyde sıklıkla kullanılan saf su yerine yoğunluğu daha düşük olan saf etanol (0.789 g/cm³) kullanılmıştır.

7.4.3 Eriyik Akış Hızı (MFR)

Eriyik akış hızı testi ile termoplastik numunelerin ekstrüzyon prosesindeki davranışları karakterize edilmeye çalışılmaktadır. ASTM D1238 [109] standardı; erimiş reçinenin sıcaklık, yük ve tambur içindeki piston konumu gibi öngörülen koşullar altında, standart bir kalıp (2,095 x 8 mm) vasıtasıyla ekstrüzyon oranının belirlenmiş zamanlarda ölçümünü kapsamaktadır. Standart, TS EN ISO 1133-1 [110] ile ortak olan A ve B prosedürleri ile birlikte dört farklı test prosedürünü içermektedir. Prosedür C, yüksek akış debisine sahip poliolefinler ile ilgili olup, akış hızını düşüren yarı boyutlarda

(uzunluk ve çap) bir kalıp kullanımı erilmektedir. MFR cihazının Şematik görünümü Şekil 7.14' de verilmiŐ.



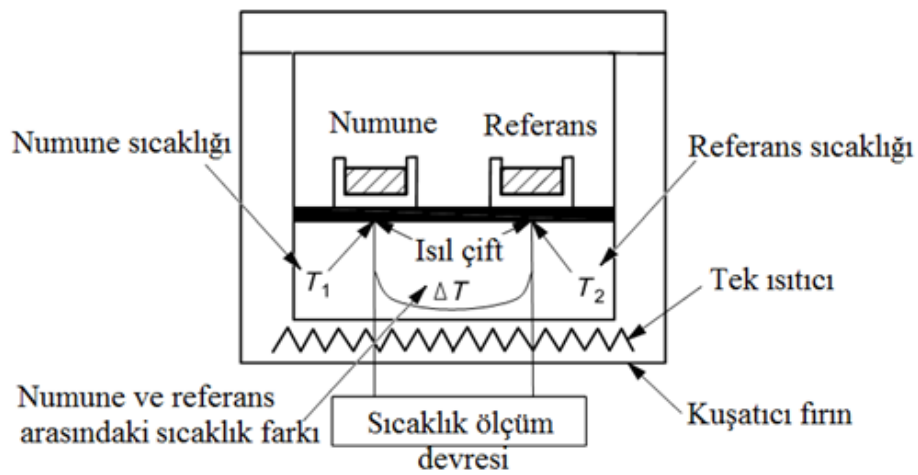
Şekil 7.14 Tipik bir MFR cihazı Şematik görünümü

lm öncesinde cihaz ölçümü gerçekleŐtirilecek polimerin ekstrsyon sıcaklığına ısıtılmaktadır. Bu sıcaklık polietilen için 190°C iken polipropilen için 230°C'dir. Cihaz belirlenen sıcaklığa geldikten sonra silindirin aldığı kadar numune silindirden içeri boŐaltılmaktadır. Ardından piston yerleŐtirilir ve üzerine 2,16 veya 5 kiloluk yükler takılmaktadır. Bu sayede silindire beslenen numune nozle doğru ittirilmektedir. Yük seçilirken numunenin akışkanlığı göz önünde bulundurulmaktadır. Çok akışkan malzemeler için hafif yükler tercih edilmektedir. Sıcaklık ve yüklemenin etkisiyle beslenen numune nozülden akmaya başlamaktadır. Numunenin Őartlandırılması ve numunede oluşan gaz boŐluklarının giderilmesi için ilk başta akan kısım atılmaktadır. lm alma, piston üzerinde bulunan referans çizgileri arasında iken gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle alt referans noktasına gelene kadar akan numune kesilerek atılmaktadır. Piston alt referans noktasına geldikten sonraki 10 dakika boyunca akan numune kesilerek alınmakta ve soğuduktan sonra tartılmaktadır. Tartım sonuca ölçülen gr/10dk cinsinden değer MFR sonucu olarak kaydedilmektedir. Ancak eğer 10 dakika geçmeden piston st referans noktasına gelirse numune bu noktada

kesilmekte, soğutularak tartılmakta ve tartım bu noktaya gelene kadarki süre 10 dakikaya göre orantılanarak hesaplanmaktadır.

7.4.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (Differential Scanning Calorimetry) tekniği malzemelerin ısı analizi için kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Kısaca, polimerler ısıtıldığında ne gibi fiziksel değişimlere uğrayacağını gösteren bir yöntemdir. Şekil 7.15' de şematik olarak gösterildiği gibi DSC, biri referans diğeri ise numunenin bulunduğu iki ısıtıcıdan, bu sistemi ısı kaybı olmadan tutan bir hücreden ve ısı akışını kontrol eden bilgisayardan oluşmaktadır.

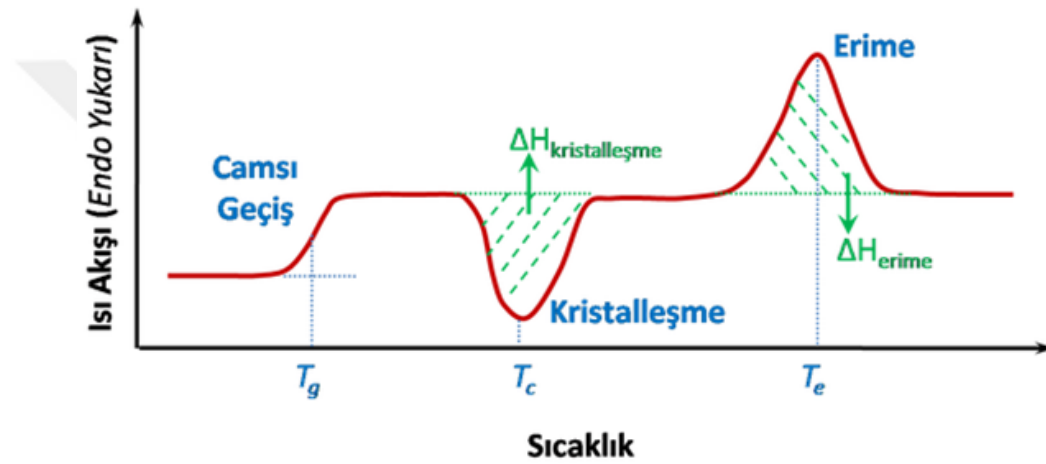


Şekil 7.15 DSC cihazı şematik görünümü

DSC yönteminde test edilen numunenin ve referansın sıcaklığını arttırmak için gerekli olan ısı miktarı, sıcaklığın zamana bağlı fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Numune ve referans test boyunca aynı sıcaklıkta tutularak aynı hızda ısıtılmakta, numunenin ve referansın üzerindeki ısı akışının hızı ölçülmekte ve karşılaştırılmaktadır. Aradaki fark, malzeme bileşimi, kristallik ve oksidasyon gibi özelliklerin tayininde kullanılmaktadır. DSC ölçümü sonunda Şekil 7.16' da görülen tarzda ısı akışı-sıcaklık grafiği elde edilmektedir.

DSC; ısıtılırken, soğutulurken ya da sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğutulan ya da salıverilen enerji miktarını ölçmektedir. DSC'nin çalışma prensibi; numunenin ve referansın üzerindeki ısı akışı farkıdır. DSC testine tabi tutulan numune faz değiştirme

gibi fiziksel bir dönüşüme gidiyorsa referansla aynı sıcaklıkta tutabilmek için numuneden daha az veya daha çok ısı akışı olacaktır. Daha az veya daha çok ısı akışı işlemin endotermik (numunenin ısı alması) veya ekzotermik (numunenin ısı vermesi) olmasına göre değişmektedir. Örneğin katı bir numune eriyip sıvı hale geçiyorsa referansla aynı oranda sıcaklık artışına sahip olması için numune ısıtılmalı ve numuneden daha fazla ısı akışı gerçekleştirilmelidir. Bunun sebebi katı halden sıvı hale geçerken numune tarafından gerçekleştirilen ısı emilimidir. Numune ve referans arasındaki ısı akış değişimi kontrol edilerek DSC yöntemi ile hal değişimi sırasında yayılan veya emilen ısı miktarı ölçülebilir.



Şekil 7.16 DSC çıktısı olan ısı akışı-sıcaklık grafiği örneği

DSC deneylerinden ısı akışının zamana veya sıcaklığa göre çizilen eğrisi elde edilmektedir. İki farklı gösterim vardır: Numunedeki egzotermik reaksiyonlar deney yapmak için kullanılan ölçüm cihazlarında kullanılan farklı teknolojilere bağlı olarak negatif veya pozitif tepe noktası olarak gösterilmektedir. Bu eğri hal değişimlerinin entalpilerini hesaplamak için kullanılabilir. Test yöntemi TS EN ISO 11357-3' de [111] tariflenmiştir.

7.5 Mikroskopik Görüntüme

Mikroskopik gözlemler stereo mikroskop ve SEM ile kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede numunelerden alınan dilim kesitler ve kırık kesitler üzerinde incelemeler yapılmıştır.

7.5.1 Stereo Mikroskopik Görüntüler

Unitron-Z10 Serisi stereo optik mikroskop ve buna bağlı Infinity2 kamera ile numuneler görüntülenmiştir. Stereo mikroskop ile üç boyutlu numune incelemeleri yapılmıştır.

7.5.2 Taramalı Elektron Mikroskopik (SEM) Görüntüler

Mikroskopik gözlemler SEM ile yapılmıştır. Test sonuçlarını desteklemek için numunelerden çıkartılan dilimlerin kesitlerine ve fiber-matris ara yüzeylerin kırık kesit görüntüleri incelenmiştir. Jeol marka JSM-5410 LV model cihazda düşük vakumda görüntüler alınmıştır. Numuneler yalıtkan olduğundan elektron geçişine izin vermek için altın kaplanmış ve bu şekilde incelemeler gerçekleştirilmiştir.



BÖLÜM 8

DENEYSEL BULGULAR

Çalışmanın bu bölümde sürekli fiber takviyeli polietilen ve polipropilen matrisli kompozitler laboratuvar ölçekli olarak üretilmiştir. Farklı fiber hacim ve uyumlaştırıcı oranlarında üretilen kompozitler üç ayrı yöntemle oluşturulmuştur. Uygulanan fiziksel ve mekanik testler sonucu farklı kondisyonlarda üretilen kompozitler değerlendirilmiştir.

8.1 Matris Karakterizasyonu

MFR ve DSC testlerinin çıktıları bu bölümde incelenmiştir.

8.1.1 MFR Sonuçları

Çizelge 8.1' de saf haldeki PE, PP, bunların uyumlaştırıcıları ve uyumlaştırıcılar ile harmanlanmış durumlarına uygulanan MFR test sonuçları yer almaktadır. Çizelgede aynı zamanda ilgili polimerlerin yapısı ve üretici kataloglarında yer alan MFR değerleri de karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. HDPE ve PPRC üzerinde yapılan ölçüm sonuçları ile üretici verileri kıyaslandığında arada fark olduğu görülmektedir. Bu açıdan her hammaddenin ayrıca test edilmesi gerekliliği olduğu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 8.1 MFR test sonuçları

Malzemeler	Polimer Yapısı	MFR (g/10 min) Üretici Verisi	MFR (g/10 min) Ölçülen
PE	HDPE	0,07*	0,0352***
U1	PE-g-MAH	4,3*	
PE-U1-15	-	-	0,0525***
PE-U1-30	-	-	0,0894***
U2	EMA-GMA	6,0*	
PE-U2-15	-	-	0,1137***
PE-U2-30	-	-	0,1581***
PP	PPRC	0,28**	0,3050**/1,1370****
U3	PP-g- MAH	13,0**	
PP-U3-15	-	-	1,5934****
PP-U3-30	-	-	2,3300****
U4	PP-g-MAH	150-200**	
PP-U4-15	-	-	11,6085**
PP-U4-30	-	-	12,0972**
*190°C, 2,16kg ***190°C, 5kg ** 230°C, 2,16 kg **** 230°C, 5 kg			

Bu sonuçlara göre uyumlaştırıcıların HDPE ve PPRC' in akışkanlıklarını arttırdığı görülmüştür. Aynı zamanda uyumlaştırıcı oranının artmasıyla da akışkanlıklar artmıştır. HDPE' de yapılan ölçümler sonucu U2, U1' den daha fazla akışkanlık sağlamıştır. Benzer şekilde PPRC' de U4, U1' e göre çok daha yüksek akışkanlık değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

Akışkanlık, yani düşük viskozite kompoziti oluşturan matris malzemelerinde büyük öneme sahiptir. Takviye malzemesi olan fiberler 10 ila 20 mikrometre çapında yüzlerce fiberden oluşan demetler halinde bulunan yapılardır. Başarılı bir kompozit yapının oluşturulabilmesi için bu demetlerdeki her fiberin matris tarafından ıslanabilmesi gerekmektedir. Bu sayede fiber-matris arayüzey bağlantıları sağlanabilir. Tabiki arayüzey bağlantısını gerçekleşmesi için sadece matris malzemesinin akıcı olması yeterli değildir. Çünkü plastik matris malzemesi ile seramik esaslı fiber malzemesinin

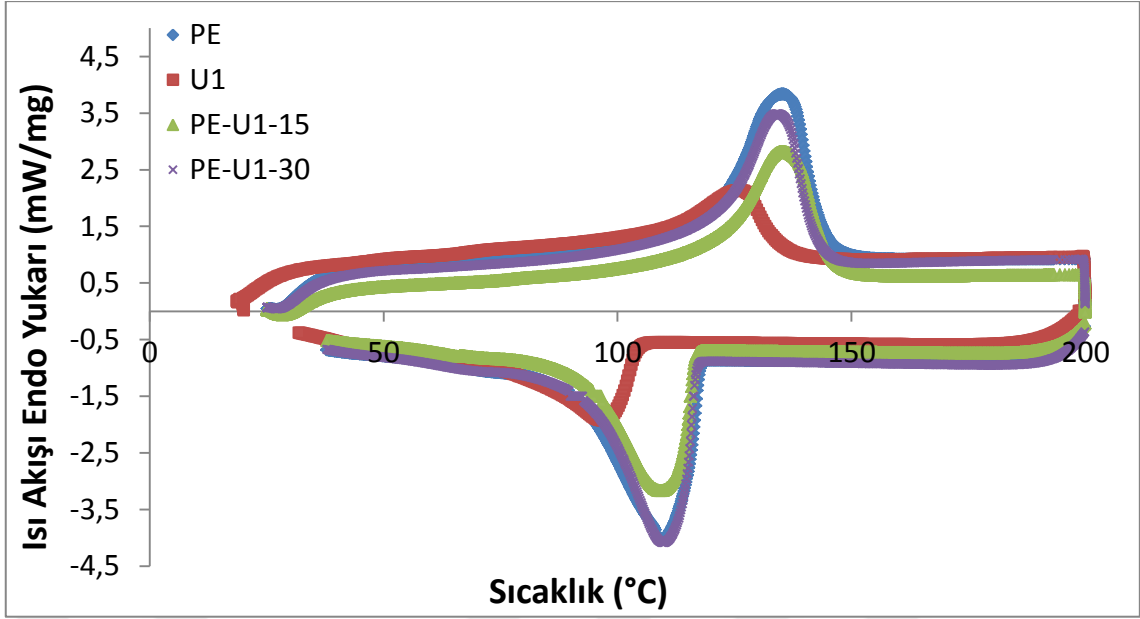
yüzeyleri birbirlerine uyumsuzdur. Uyumun sağlanması için fiber üreticisi firmalar ürünleri silan bileşimi ile kaplayarak satmaktadır. Bu sayede arayüzeyde kimyasal uyum sağlanmaktadır.

Kompozit üretimi sırasında fiber üzerindeki silan hazır geldiğinden dolayı bileşimi ticari sır olan bu bileşim ile ilgili bir proses gerçekleştirilememektedir. Bu açıdan üretici firmanın matris malzemesine en uygun kimyasalı kullandığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla proseste kimyası değiştirilerek kullanılabilecek bileşen matris malzemesi olmaktadır. Bu çalışmada da en yüksek akışkanlığı sahip matris malzemesinin fiberleri en iyi şekilde ıslatarak en etkili arayüzey oluşumunu sağlayacağı düşünülmektedir.

8.1.2 DSC Sonuçları

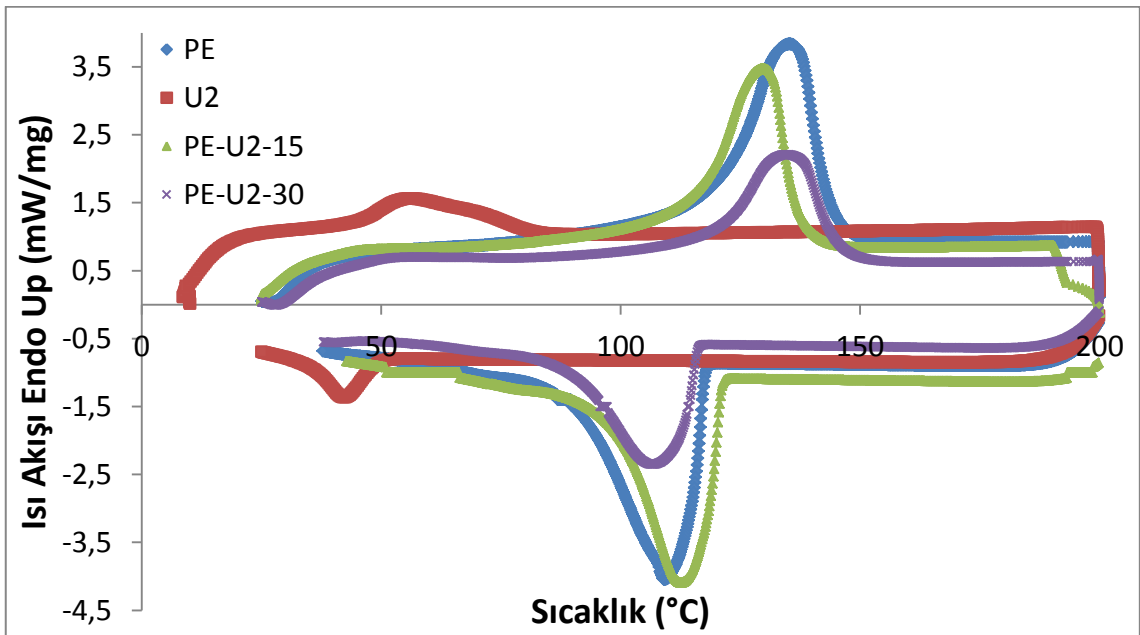
DSC testlerinde; 30°C' den 200°C' a kadar ısıtma, ardından 1 dakika 200°C' da bekletme ve 200°C' den 30°C' a soğutma uygulanmıştır. Böylece çekilen DSC grafiklerinde erime ve kristalleşme pikleri elde edilmiştir. Bu pik noktalarındaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Şekil 8.1 ve 8.2' de HDPE ve bunların %15 ve %30 oranlarında uyumlaştırıcılar ile harmanlanması sonucu elde edilen grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 8.3 ve 8.4' te PPRC için benzer grafikler oluşturulmuştur. Çizelge 8.2' de ise DSC eğrilerinden saptanan ergime sıcaklıkları (T_{er}) ve ergime entalpileri (ΔH_{er}) verilmiştir.

HDPE' in DSC sonuçları incelendiğinde; saf HDPE ile farklı uyumlaştırıcılar ile farklı oranlarda harmanlanmış HDPE' den elde edilen grafiklerin benzer olduğu görülmüştür. Bu HDPE' li bu numunelerde ergime noktası 135°C civarında, kristalleşme noktası ise 109°C civarında olduğu saptanmıştır. Halbuki bu numunelerin MFR değerleri uyumlaştırıcı türüne ve oranına bağlı olarak değişim gösterdiği gözlenmiştir. Buna göre uyumlaştırıcıların erime ve kristalleşme noktalarına etki etmeksizin akışkanlığı arttırdığı söylenebilir.



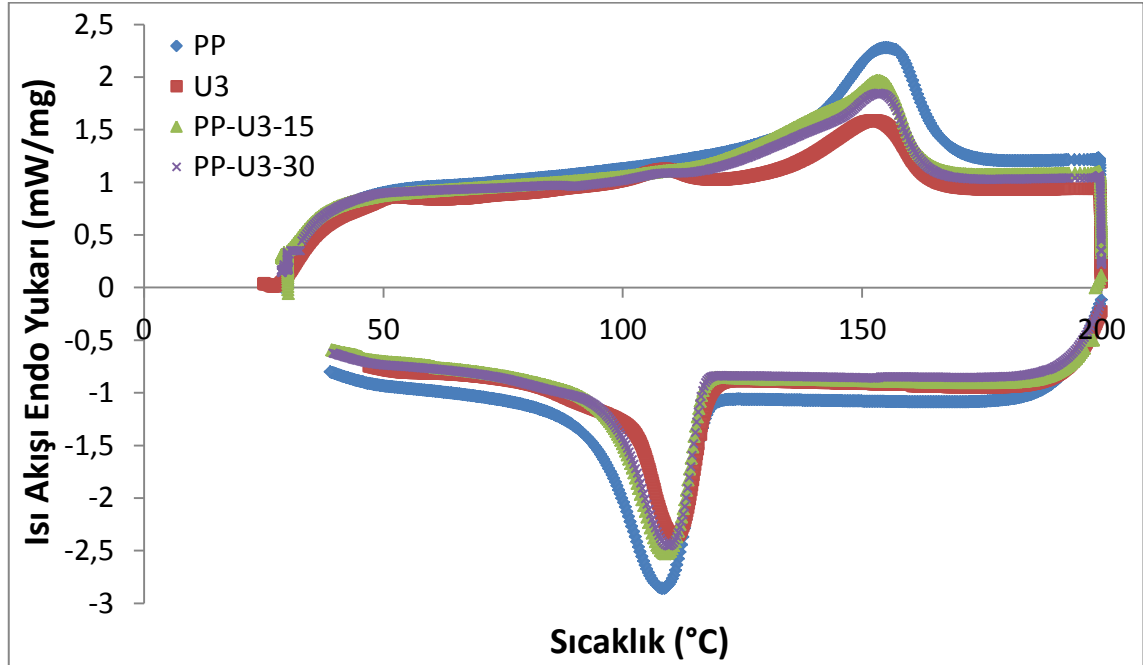
Şekil 8.1 HDPE, U1 ve %15 ve %30 U1 ile harmanlanmış HDPE DSC eğrileri

U1' in pik alanı ve ergime sıcaklığı PE' den düşük bulunmuştur. PE-U1-15' in pik alanı ve dolayısıyla ΔH değeri PE' den düşüktür. Ergime sıcaklığında ise herhangi bir değişim yoktur. PE-U1-30' un pik alanı, içeriğindeki U1 oranının artmasıyla birlikte düşmesi beklenmiş, fakat aksine yükselmiştir. Bu PE içindeki MAH oranının belirli bir eşik değerinden sonra etkili olmadığını göstermektedir. Buna rağmen ergime sıcaklığında çok azda olsa bir düşme yaşanmıştır. Ancak bu ihmal edilebilir seviyede bir değişimdir.



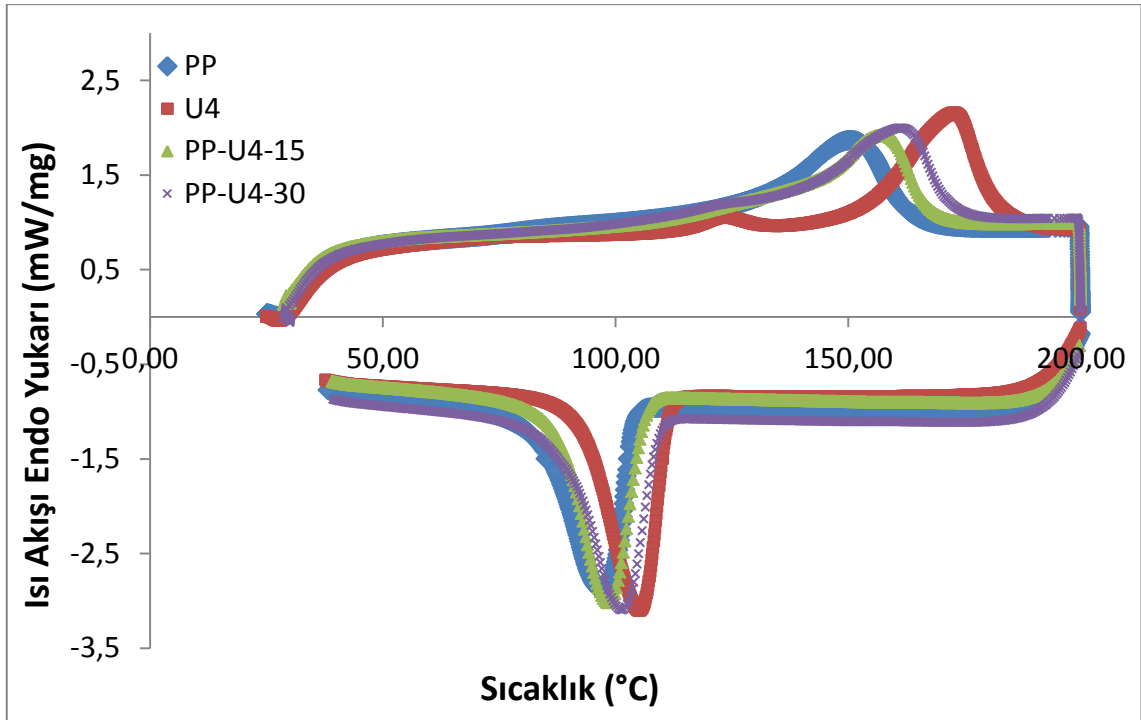
Şekil 8.2 HDPE, U2 ve %15 ve %30 U2 ile harmanlanmış HDPE DSC eğrileri

U2' nin de pik alanı ve ergime sıcaklığı PE' den düşüktür. Özellikle ergime sıcaklığı çok düşüktür. PE-U2-15 ve PE-U2-30 harmanlarında U2 içeriğine bağlı bir düşme gerçekleşmiştir. Ergime sıcaklıklarında U1' e benzer şekilde ihmal edilebilir oranlarda değişimler yaşanmış ve ergime sıcaklığının U2 katkısıyla değişmediği söylenebilir.



Şekil 8.3 PPRC, U3 ve %15 ve %30 U3 ile harmanlanmış PPRC DSC eğrileri

PPRC numunelerin DSC sonuçları incelendiğinde ise saf PPRC ile farklı oranlarda harmanlanmış PPRC numuneler arasında fark olduğu görülmüştür. Saf PPRC' nin erime noktası 150°C ve kristalleşme noktası 97°C bulunmuştur. %15 oranında U3 ile harmanlanmış PP'de erime noktası 146°C ve kristalleşme noktası 96°C iken %30 oranında U3 ile harmanlanmış PPRC' de erime noktası 144°C ve kristalleşme 96°C olarak bulunmuştur. Burada uyumlaştırıcının kristalleşmeye sıcaklığına etki etmediği ancak erime sıcaklığını 4-6°C gibi az miktarda düşürdüğü görülmektedir. U3 ile uyumlaştırılmış numunelerin MFR değerlerinde de benzer şekilde az miktarda bir artış olmuştur.



Şekil 8.4 PPRC, U4 ve %15 ve %30 U4 ile harmanlanmış PPRC DSC eğrileri

U4 ile uyumlaştırılmış PPRC numuneler incelendiğinde ise %15 oranında uyumlaştırılmış numunenin erime noktası 154°C ve kristalleşme noktası 105°C iken %30 oranında uyumlaştırılmış numunenin erime noktası 158°C ve kristalleşme noktası 105°C olarak saptanmıştır. Burada U3 ile benzer şekilde kristalleşme sıcaklığında bir değişiklik görülmemiştir. Ancak erimede U3' ün tersine erime sıcaklığı yükselmiştir.

Uyumlaştırılmış PP numunelerinin erime eğrisinde diğer grafiklerde oluşmayan ergime pikinden önce görülen bir omuz bölgesi gözlenmiştir. Bu omuz bölgeleri kendini %30 oranındaki harmanlarda daha da belirgin olarak göstermiştir. Özellikle en yüksek akıcılığa sahip U4'li numunede çok net görülür halde bir omuz bölgesi kendini gözlenmektedir. Bu omuz bölgeleri uyumlaştırıcı malzemesinin erime pik noktası olarak yorumlanabilir. Dolayısıyla PPRC ile uyumlaştırıcının tam olarak uyum sağlamadığı ve PPRC ile uyumlaştırıcı malzemenin ayrı ayrı pikler verdiği söylenebilir.

Çizelge 8.2 Matris polimerlerin DSC verileri

Malzemeler	ΔH_{erg} (J/g)	T_{erg} (°C)
PE	182,5209	135
U1	73,2669	123,28
PE-U1-15	129,7993	135
PE-U1-30	151,7998	134,11
U2	77,8182	56,33
PE-U2-15	150,9659	134,22
PE-U2-30	100,3371	134,60
PP	76,5585	154,81
U3	61,3630	152,54
PP-U3-15	75,5653	153,60
PP-U3-30	69,3995	153,28
U4	82,8598	172,75
PP-U4-15	77,2403	154,36
PP-U4-30	81,0927	159,82

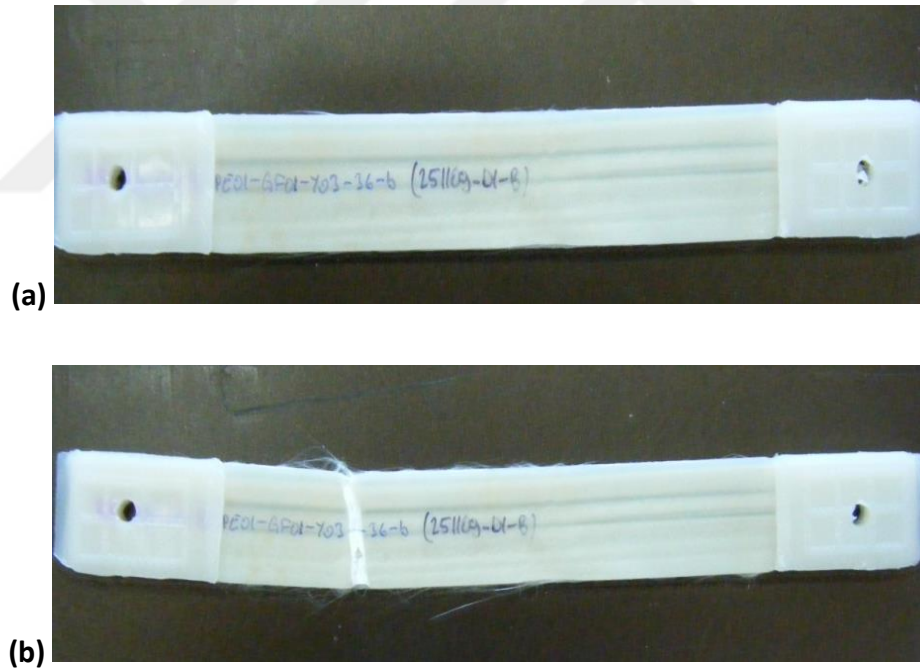
U3' ün pik alanı ve ergime sıcaklığı PP' den düşük çıkmıştır. U3 içeriğine uyumlu olarak PP-U3-15 ve PP-U3-30 harmanlarında oran arttıkça ΔH ve ergime sıcaklığında düşme görülmüştür. Ancak bu düşüşler çok küçük miktarlarda olmuştur. Özellikle ergime sıcaklıkları neredeyse değişmemiştir. PP ve U3' ün verileri arasındaki farkın az olmasında dolayı büyük farklar oluşmamıştır.

U4' ün pik alanı diğer uyumlaştırıcı alternatiflerinin aksine matristen daha büyük bulunmuştur. Hem ΔH hem de ergime sıcaklığı daha yüksektir. Bunun doğal bir sonucu olarak da %15 ve %30' luk harmanlar PP' ye göre artış göstermiştir.

8.2 E-camı Fiber Takviyeli Kompozitler

İlgili standarda uygun olarak hazırlanan numunelerden biri ile aynı numunenin çekme testi sonrasındaki görüntüsü Şekil 8.5' te verilmiştir. Çalışmada, tek yönlü sürekli takviye söz konusu olduğundan, 25 mm eninde dikdörtgen şeklinde numuneler kullanılmıştır. Şekil 8.5.b' de görüldüğü üzere, kopan ilk elyaf demetinin ardından

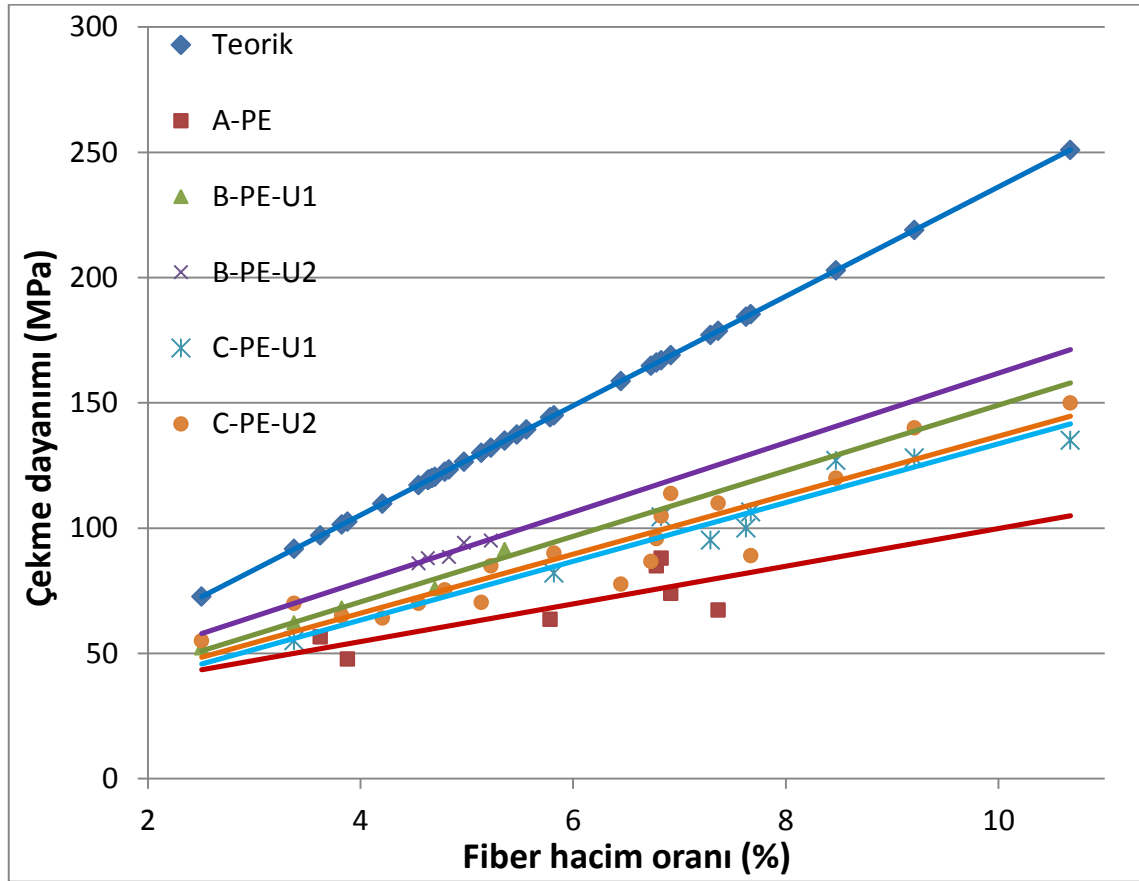
sırayla ani kopma gösteren diğer demetleri ilerleyen bir çatlak görüntüsü vermiştir. Numunelerdeki kopma yüklemeye dik, yaklaşık 90° açıda meydana gelmiştir. Söz konusu ani kopmalar gevrek karakterli olup, çekme gerilme-gerinim grafiklerinde elastik bölgede gerçekleşmiştir. Termoplastik matris her ne kadar sünek özellik gösterse de, takviye cam elyafların aşırı gevrek yapıda olması kompozitin gevrek kopma sergilemesine neden olmuştur. Özellikle bu gevrek davranış yüksek fiber hacim oranlı numunelerde daha dik bir gerilme-gerinim eğrilerinin oluşmasını sağlamıştır. Düşük fiber oranlı numunelerde ise daha yatay bir eğri oluştuktan sonra fiberler ani şekilde kırılmış ve kompozit numunede hasar oluşmuştur. Ancak yüksek orandaki termoplastik matris düşük gerilme değerlerinde doğası gereği visko-elastik davranış gösterip, yüksek gerilme değerlerinde kopmuştur. Ancak kompozit malzeme bu aşamaya gelinceye kadar çok ciddi hasara maruz kaldığından gerilme değeri olarak kompozit numune içinde fiberlerin hasara uğradığı gerilme-gerinim değerleri değerlendirilmiştir.



Şekil 8.5 a) Çekme testi öncesi numune, b) çekme testi sonrası numune şekli

Numunelerde hasar her zaman fiber ve/veya matris kopması ile gerçekleşmediği gözlemlenmiştir. Termoplastik matrisli kompozitlerin en büyük sorunu olan matris ile takviye arasındaki bağlanma eksikliğinden dolayı, beklendiği üzere öncelikle fiberlerde kopma özellikle uyumlaştırıcısız numunelerde gerçekleşmemiştir. Bu numunelerde

önce fiber-matris ara yüzeyinde kopma ve bu noktalarda matrisin içinden fiberlerin büyük oranda hasara uğramadan sıyrılması şeklinde bir hasar türü gözlenmiştir. Bu numunelerde kopma, matrisin yüksek oranda sünmesi sonunda matrisin kopması ve bu kopan matrisin içinden sıyrılan hasarsız fiberlerin ortaya çıkması şeklinde sonlanmıştır.



Şekil 8.6 E-cam/HDPE türü kompozitlerin çekme dayanımları

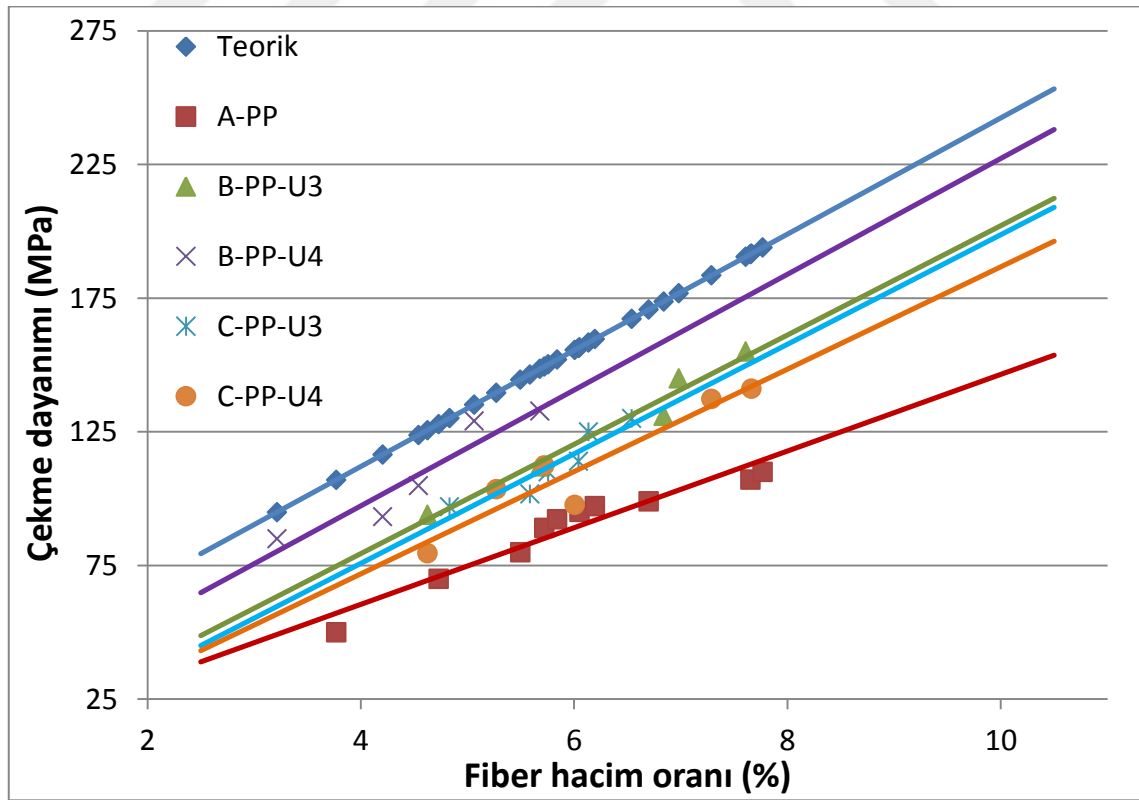
Çalışmada, kompozit malzemelerin mekanik performanslarının karşılaştırılması amacıyla en yüksek çekme dayanımları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Numune hazırlama yönteminin getirdiği kısıtlardan dolayı incelenen takviye içeriği aralığı hacimce %2,50 - %10,50 arasında kalmıştır. HDPE matrisli ve PPRC matrisli numunelerin en yüksek çekme dayanımları hacimce takviye oranına bağlı olarak Şekil 8.6 ve Şekil 8.7' te verilmektedir.

Grafiklerde A grubu uyumlaştırıcı içermeyen, sadece fiber ve matristen oluşan numuneleri temsil ederken, B ve C grubu uyumlaştırıcı ihtiva eden numuneleri ifade etmektedir. B grubunda uyumlaştırıcı fiber-matris arasında ince bir katman olarak, C

grubunda ise matris ile farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmıştır. B ve C grubu numunelerde uyumlaştırıcı miktarı değişen oranlarda (B grubunda %25 - %50 arası, C grubunda %5 - %40 arası) uygulanmıştır.

HDPE' li numunelerde beklendiği üzere en düşük değerler uyumlaştırmaz A grubu numunelerden elde edilmiştir. A grubunun belirli bir miktar iyileşmesini C grubu harmanlı numuneler sağlamıştır. Bunlar içinde ise U2 uyumlaştırıcısı ile daha iyi sonuçların alındığı görülmüştür. En iyi sonuçlara ise B grubu katmanlı numunelerde ulaşılmıştır. Bunun nedeni olarak uyumlaştırıcının bu grupta doğrudan fiber-matris arayüzüne temas etmesi gösterilebilir. B grubu içerisinde ise U2' li numunelerin daha yüksek değerler vermiştir. Bunun nedeni U2 uyumlaştırıcısının U1 uyumlaştırıcısından daha yüksek MFR değerine sahip olmasıdır.

HDPE' li numunelerin sonuçlarında dikkat çeken bir nokta da fiber hacim oranının artmasıyla dayanım değerlerinin tüm gruplarda artmasına rağmen teorik değerden uzaklaşmasıdır. Bunun en büyük sebebi fiber oranının artmasıyla fiber yüzey alanlarının artması ve fiber-matris ıslanma ve yapışmasının zorlaşmasından ötürüdür.



Şekil 8.7 E-cam/PPRC türü kompozitlerin çekme dayanımları

PPRC' li numunelerde de en düşük değerler uyumlaştırıcı A grubu numunelerde ortaya çıkmıştır. HDPE de olduğu gibi C grubu harmanlı numunelerde A grubundan daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bunlar içinde ise U3 uyumlaştırıcı ile daha iyi sonuçların alındığı görülmüştür. C grubunda U4' un çok yüksek MFR değerine sahip olmasına karşılık daha iyi sonuçlar alanamamıştır. Bunun nedeni DCS sonuçlarında ortaya konulduğu üzere U4' n PPRC' den daha yüksek ergime sıcaklığı ve ΔH sahip olması olabilir. Harman içerinde önce PPRC ergiyip fiberin üzerinde yoğunlaşmış olabilir. Bu durumda uyumlaştırıcının etkisi fiber-matris arayüzeyinde görülememiştir.

En yüksek sonuçlar yine B grubu katmanlı numunelerde oluşmuştur. Böylece uyumlaştırıcının bu grupta doğrudan fiber-matris arayüzeyine temas ettiği ve bu katman uygulamasının sürekli elyaflı kompozit üretiminde harmanlamadan daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmüştür. B grubu içerisinde ise U4' l numunelerin daha yüksek değerler vermiştir. Bunun nedeni de yine benzer olarak U4 uyumlaştırıcısının U3 uyumlaştırıcısından çok daha yüksek MFR değerine sahip olmasıdır. U4 fiber ile matris arasında ayrı bir tabaka şeklinde kullanılması durumunda matrsten daha yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasının bir önemi kalmamıştır. Her ne kadar PPRC matris düşük ergime sıcaklığından ötürü önce ergise de uyumlaştırıcı katmanının aşıp fiberler üzerinde toplanmamıştır. Bu sayede yüksek akıcılıktaki uyumlaştırıcının fiber demetlerini daha iyi ıslatması sağlanmıştır.

HDPE' li numunelerin aksine PPRC' li numunelerde daha iyi ıslanma ve yapışmanın sağlandığı söylenebilir. Bu hem HDPE' li numunelerden daha yüksek dayanım sonuçları vermesinden, hem de özellikle B ve C grubu uyumlaştırıcı numunelerin teorik değere paralel sonuçlar vermesinden anlaşılmaktadır.

Sonuçlar incelenirken uyumlaştırıcı katkı oranının mekanik performansa etkisi de incelenmiştir. Çizelge 8.3' te farklı uyumlaştırıcıların çeşitli oranlarda kullanılmasıyla B ve C proses grubu kompozitlerin çekme dayanımları görülmektedir. Bu değerler %5 fiber hacim oranı sabit tutulduğu numunelerden alınmıştır. Her iki grupta da uyumlaştırıcı oranının artmasıyla dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. Uyumlaştırıcı gruplarından elde edilen sonuçlar genel itibarı ile şekil 8.6 ve 8.7 ile uyumludur. Ancak B-PP-U4' n sonuçları, B-PP-U3' ten yüksek gözükmektedir. Bunun

sebebi ise U4' lü numunelerin uyumlaştırıcı oranlarının U3' lü numunelerden fazla olmasında kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde C-PE-U1' de, C-PE-U2' den daha yüksek sonuçlar alınmıştır, fakat bu değerlerin uyumlaştırıcı oranları fazladır. Sonuçlar bu şekilde değerlendirildiğinde Şekil 8.6 ve 8.7' e benzer sonuçlar alındığı görülmektedir.

Çizelge 8.3 Uyumlaştırıcı oranına göre ortalama çekme dayanımları ($V_f=5\%$)

Tür	Oran (%)	Dayanım (MPa)	Tür	Oran (%)	Dayanım (MPa)
B-PE-U1	30	74,22	C-PE-U1	20	60,46
	36	80,08		25	56,92
	53	82,94		30	67,37
	56	92,75		35	74,95
				40	77,92
B-PE-U2	28	82,60	C-PE-U2	5	58,93
	48	89,25		15	61,00
	60	94,62		30	64,18
				40	79,26
B-PP-U3	31	98,06	C-PP-U3	10	81,09
	40	100,35		15	83,47
	60	109,53		20	85,22
				30	89,08
				40	96,72
B-PP-U4	32	101,24	C-PP-U4	5	79,56
	33	102,89		20	82,53
	42	111,72		30	89,23
	66	114,77		40	92,10

Çizelge 8.4' te ise fiber hacim oranı 5 civarında olan numunelere ait elastisite modülü (E-mod) ve % uzama değerleri verilmiştir. Şekil 8.6' daki grafiği benzer şekilde uyumlaştırıcısız HDPE kompozitin E-mod'u ve uzaması en düşük olduğu görülmektedir. B grubu proses ile üretildiğinde ise bu değerleri yükselmiştir. Özellikle B-PE-U2, HDPE grupları içerisinde en yüksek değerlere sahiptir. C prosesiyle üretilmiş kompozitlerde ise dayanım değerlerine benzer olarak E-mod ve uzama bir miktar düşme göstermiştir.

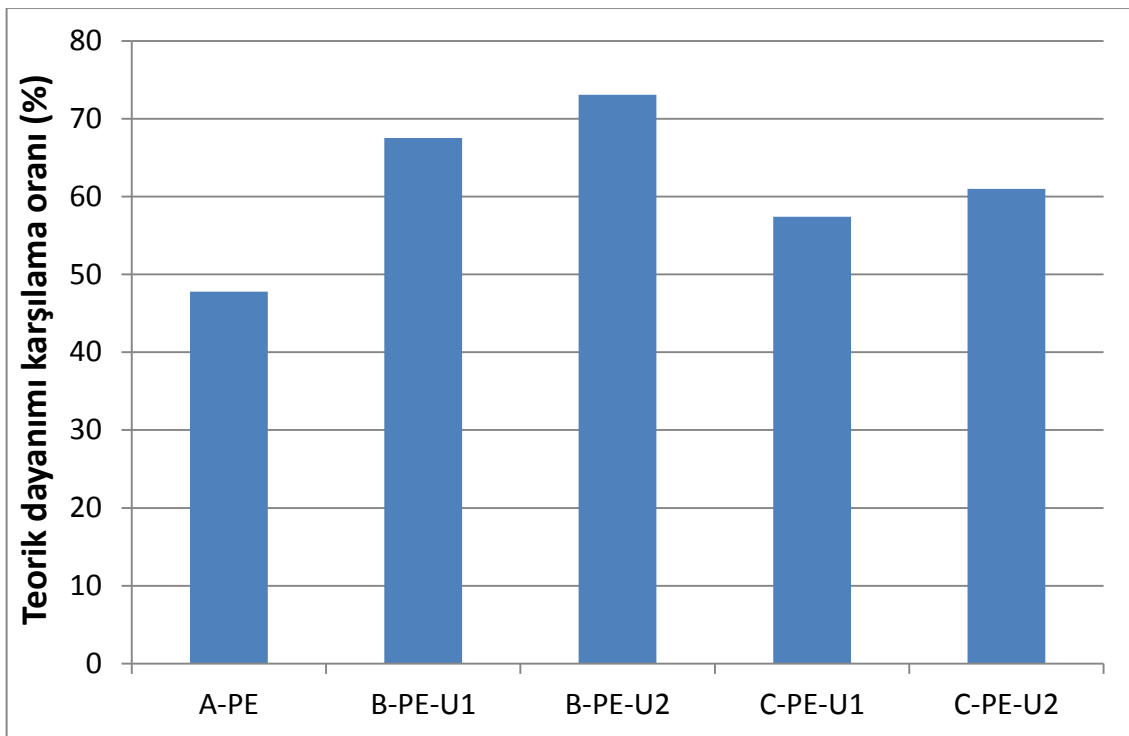
PPRC değerleri Şekil 8.7 ile uyumlu sonuçlar göstermiştir. A grubu yine en düşük sonuçlara sahipken, B grupları en yüksek sonuçlara ulaşmıştır. B grubunda E- mod' u U4' lü kompozitlerin daha yüksekken, uzama değeri U3' lü kompozitlerin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Bu fark Çizelge 7.1' deki hammadde verilerine bakıldığında; U3'

ün yüksek, U_4' ün düşük uzama değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. C grubunda da ir miktar düşüş yaşanmış olsada benzer etkiler görülmüştür.

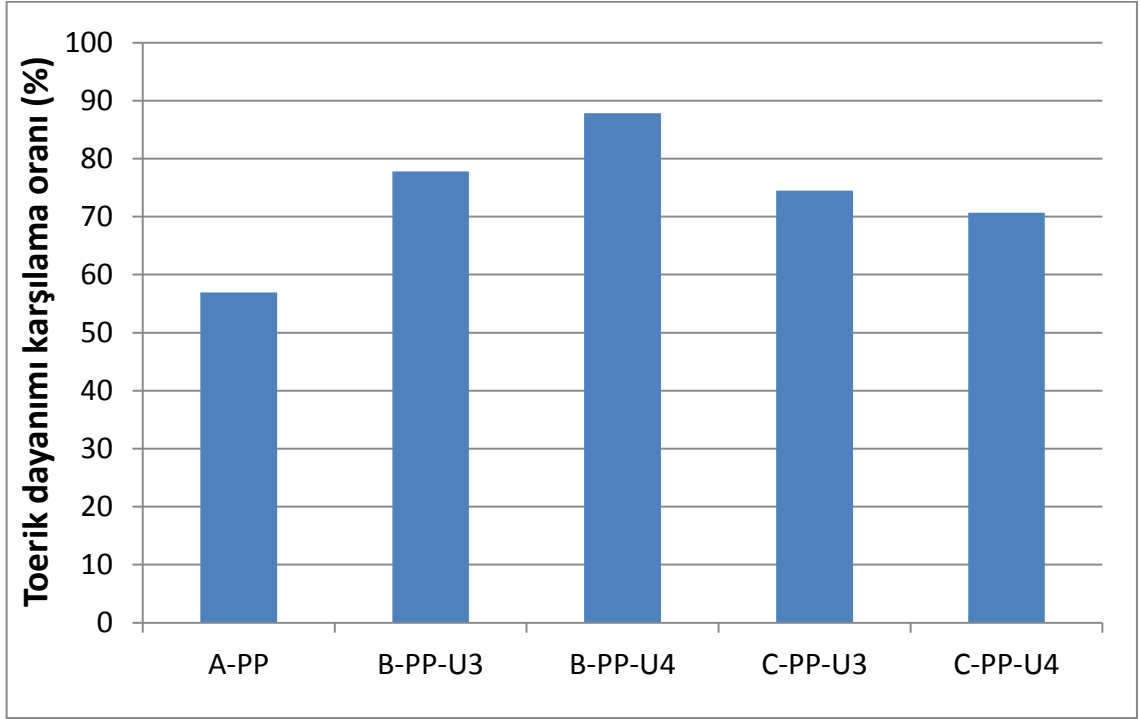
Çizelge 8.4 E-camı fiberli numunlerin elastiste modülü ve uzama değerleri ($V_f=5\%$)

PE	E-mod (GPa)	Uzama (%)	PP	E-mod (GPa)	Uzama (%)
A-PE	2,44	3,21	A-PP	3,49	3,01
B-PE-U1	3,78	5,56	B-PP-U3	4,18	7,14
B-PE-U2	4,54	7,57	B-PP-U4	4,77	5,23
C-PE-U1	3,28	4,94	C-PP-U3-15	3,67	4,89
C-PE-U2	3,98	7,02	C-PP-U4-15	4,08	4,03

Numune gruplarının mekanik performanslarının karşılaştırılabilirliğini sağlamak için, numunenin çekme dayanımının teorik çekme dayanımına yüzde olarak oranı, teorik dayanım değerini karşılama oranı adlı boyutsuz bir parametre olarak elde edilmiştir. Her numune grubu için bu oranların ortalaması elde edilmiş ve elde edilen bu değerler HDPE matrisli ve PPRC matrisli numuneler için Şekil 8.8 ve Şekil 8.9' de verilmiştir.



Şekil 8.8 HDPE matrisli kompozitlerin, ortalama teorik değer karşılama oranları



Şekil 8.9 PPRC matrisli kompozitlerin, ortalama teorik değer karşılama oranları

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde, farklı uyumlaştırıcı oranlarında HDPE ve PPRC matrisli B grubu numunelerde teorik değer karşılama oranlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bunun olası sebebi, bu numunelerin hazırlanmasında yapıştırıcının ince ya da kalın bile olsa ayrı bir katman olarak uygulanmasıdır. Bu ayrı katmanın, matristen bağımsız olarak takviyeyle temas kurup gerekli yapışmayı sağladığı düşünülmektedir. Ancak bu yöntemde gerekli ıslanmanın sağlanması için belirli bir uyumlaştırıcı katman kalınlığı gerektiğinden, %20'nin altındaki yapıştırıcı-matris oranları uygulanabilir görülmemektedir. Denemelerde hazırlanan en düşük oran %24 olarak uygulanabilmiştir.

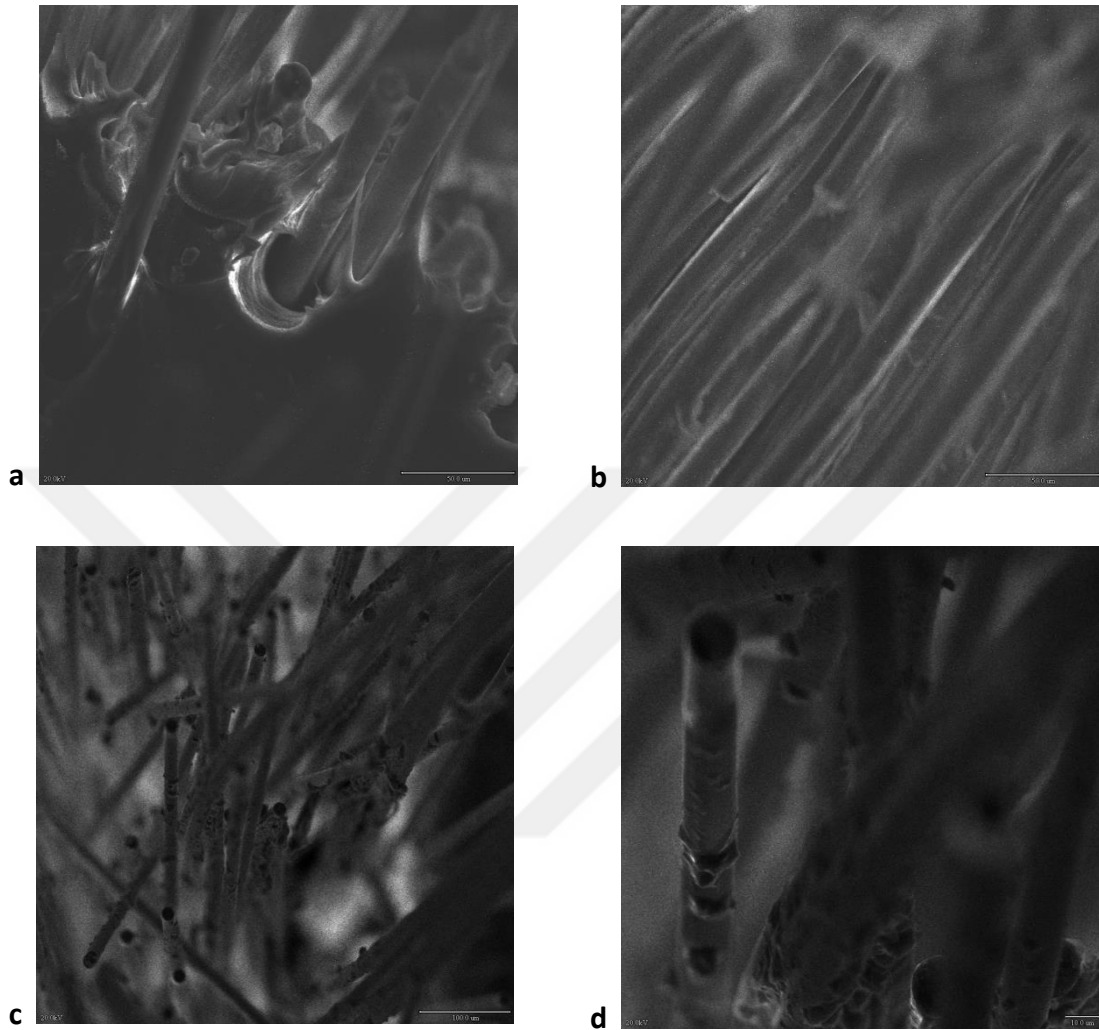
Uyumlaştırıcısız takviyeli numuneler karşılaştırıldığında, HDPE esaslı numunelerde is bu değer %48, PPRC esaslı numunelerde karşılama oranının %57 civarında olduğu görülmektedir. Bu fark, takviyenin yüzeyindeki PP' ye uygun silan kaplamadan, görece yüksek vizkoziteli HDPE'in takviyeyi yeterince ıslatamamasından kaynaklanmaktadır. Bu değerler uyumlaştırıcı uygulamasıyla yüksek oranlara çıkabilmektedir.

HDPE matrisli numunelerin mekanik performansında, B grubunda yaklaşık %30'lik, C grubunda yaklaşık %21 oranında bir artış görülmektedir. B grubu numunelerin, C grubundan çok daha üstün mekanik özellikleri gözlense de, uyumlaştırıcı harmanlamasının (C prosesi) HDPE matris için bir miktar iyileştirme sağladığı görülmektedir. HDPE matrisli kompozitler için prosesler içerisinde (B ve C prosesi) denenen uyumlaştırıcılar arasında belirgin bir performans farkı görülmeyp, birbirine yakın sonuçlar alınmıştır.

PPRC matrisli numunelerin mekanik performansında, B grubunda yaklaşık %35'ye varan, C grubunda ise yaklaşık %20'lik bir artış görülmektedir. U3 kodlu uyumlaştırıcı kullanımında B ve C grupları arasındaki performans farkı görülmemekle birlikte, U4 kodlu uyumlaştırıcı kullanımında B grubu numunelerin çok daha üstün performansa sahip olduğu gözlemlenebilmektedir. U4 tipi uyumlaştırıcının B grubunda gösterdiği bu performansın olası sebebi olarak, bu uyumlaştırıcının görece düşük vizkozitesi (yüksek MFR değeri) ve oluşan yüksek takviye ıslanma miktarı gösterilebilir. Aynı uyumlaştırıcı ile hazırlanan C grubu (harman) numunede ise, PPRC-uyumlaştırıcı harmanı oluşumundan dolayı matrisin vizkozitesi daha yüksek olacağından, ıslatma çok daha az miktarda olacaktır. Vizkozitesi daha düşük olan U3'de, U4 kullanımındakine benzer bir B grubu-C grubu performans farkına rastlanmamaktadır. Islatma sorunu proses şartları düzenlenmesiyle çözüldüğünde, C-grubu prosten daha yüksek sonuçlar alınabilir.

Islanma etkisi, sonuçlar üzerinde genel olarak kendini hissettirmektedir. Düşük takviye oranlarında dahi, elyaf demetlerinin yoğun olduğu bölgelerde demetin iç bölgelerindeki elyafların yeterince ıslanmamasından dolayı çekme dayanımı değerlerinde önemli düşüşler yaşanabilmektedir. Yeterli ıslanmanın görüldüğü numunelerde ise çekme dayanımı değerleri yükselmektedir. Bazı numunelerdeki elyafların kopma bölgesi taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 8.10' da görülebilir. Şekil 8.10.a' daki yeterli ıslanmanın olduğu bir numuneyle, Şekil 8.10.b' de hiç ıslanmanın görülmediği bir numune arasındaki fark rahatlıkla görülebilmektedir. Islanmanın olduğu numunede, takviye kopma sırasında matrisi de sündürürken, ıslanma görülmeyen numunede hiç yapışmanın olmadığı bir sıyrılmayı gösterecek şekilde takviye üzerinde hiçbir matris parçası görülmemektedir. Şekil 8.10.c ve 8.10.d'

de ise, bu iki durum arasında ıslanma ve yapışma performansına sahip olduğu düşünölen HDPE matrisli numunelerin kopma yüzeyi görüntöleri mevcuttur.

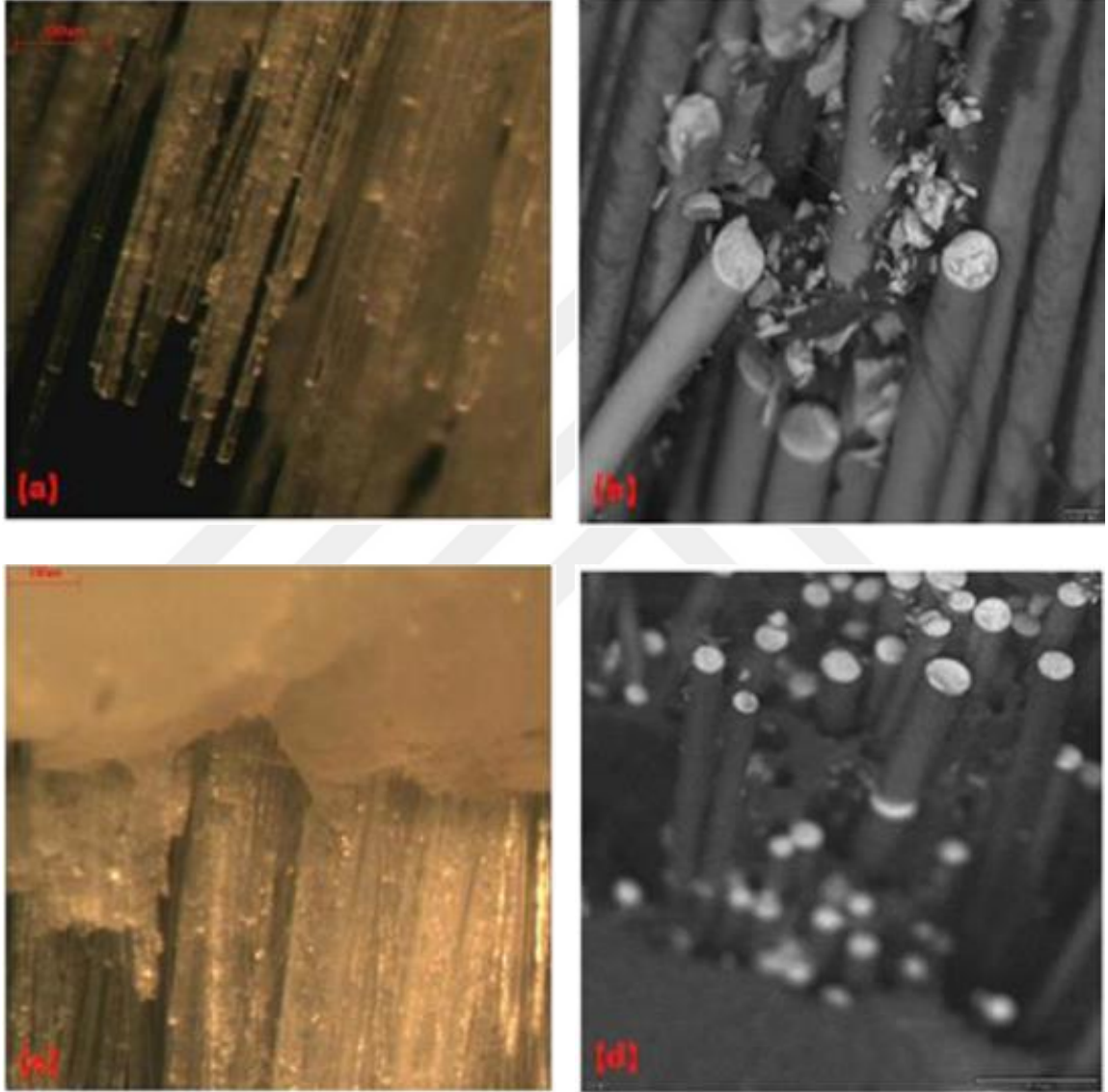


Şekil 8.10 Farklı kopma bölgelerindeki kırık yüzey SEM görüntöleri: a) PP-uyumlaştııcı (%10) kullanımında cam elyaf – 500x, b) PE – cam elyaf (uyumlaştııcı %0) – 500x, c) PE-uyumlaştııcı (%35) kullanımında cam elyaf – 200x, d) PE-uyumlaştııcı (%35) kullanımında cam elyaf – 750x

HDPE ve PPRC matrisli C grubu numunelerin matrisleri üzerinde yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemesinde herhangi bir polimer-uyumlaştııcı ayrışması gözlenmemiştir.

Şekil 8.11’ de ise %10 fiber hacim oranına sahip ve %40 uyumlaştııcı içeren U3 ve U4 kodlu kompozitlerin mikroskop görüntöleri verilmiştir. İki farklı uyumlaştııcı ile harmanlanmış kompozitlerin hem stereo mikroskop hem de SEM görüntölerinde; fiber-

matris arayüzey yapışmasının daha iyi olduğu fiberler etrafındaki matris parçalarına bakılarak anlaşılabilmektedir. Yapışmasını daha iyi olduğu U4'te, fiberler matrisin koptuğu noktada kopmuştur. Fiber-matris arayüzeyinden koparak fiber sıyrılmamış ve uzun fiberler açığa çıkmamıştır. Aksine daha kısa fiberler açıkta görülmektedir. . Elde edilen bu görüntüler testlerin sonuçlarını doğrular niteliktedir.

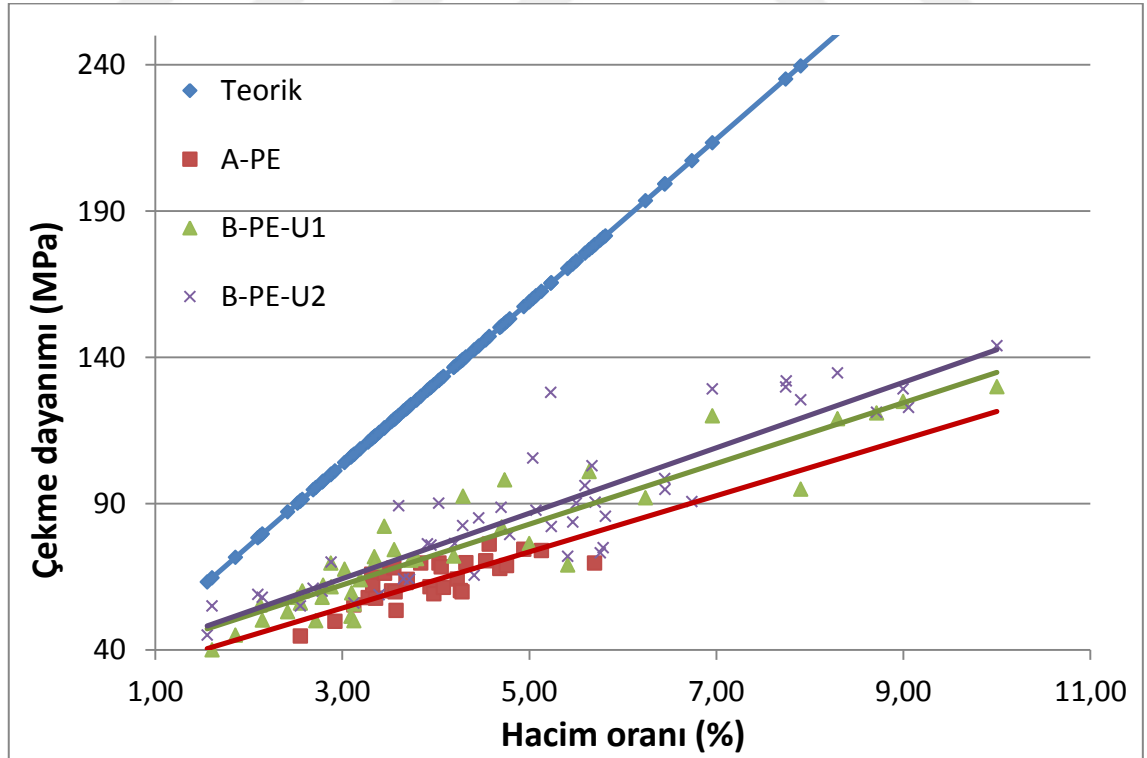


Şekil 8.11 Yapıştırıcı oranı %40 olan kompozit numunelerin mikroskop görüntüleri (Vf:%10): a) U3 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, b) U3 kodlu kompozit-SEM, c) U4 kodlu kompozit – stereo ışık mikroskobu, d) U4 kodlu kompozit - SEM

Deneyde kullanılan HDPE matrisin ortalama $0,94 \text{ gr/cm}^3$, PPRC matrislerin ise yoğunluğu ortalama $0,90 \text{ gr/cm}^3$, E-camının yoğunluğu ise $2,54 \text{ gr/cm}^3$ olarak alınmıştır. Karışımlar kuralı kullanılarak, HDPE kompozitin yoğunluğun $1,02 \text{ gr/cm}^3$ olarak, PPRC kompozitin ise $0,98 \text{ gr/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Kullanılan uyumlaştırıcının kompozitin yoğunluğunu çok etkilemediği, asıl etkenin yüksek yoğunluğundan ötürü E-camı fiber olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar teorik değerle arasındaki fark bazında değerlendirildiğinde tüm kompozit gruplarında yaklaşık %8,20 oranında fark olduğu görülmüştür. Bu fark yapıdaki gözenek miktarını oluşturmaktadır. Gruplar arasında fark olmadığından bu gözenek miktarının üretim yöntemi olan preslemeden ileri geldiği düşünülmektedir.

8.3 Basalt Fiber Takviyeli Kompozitler

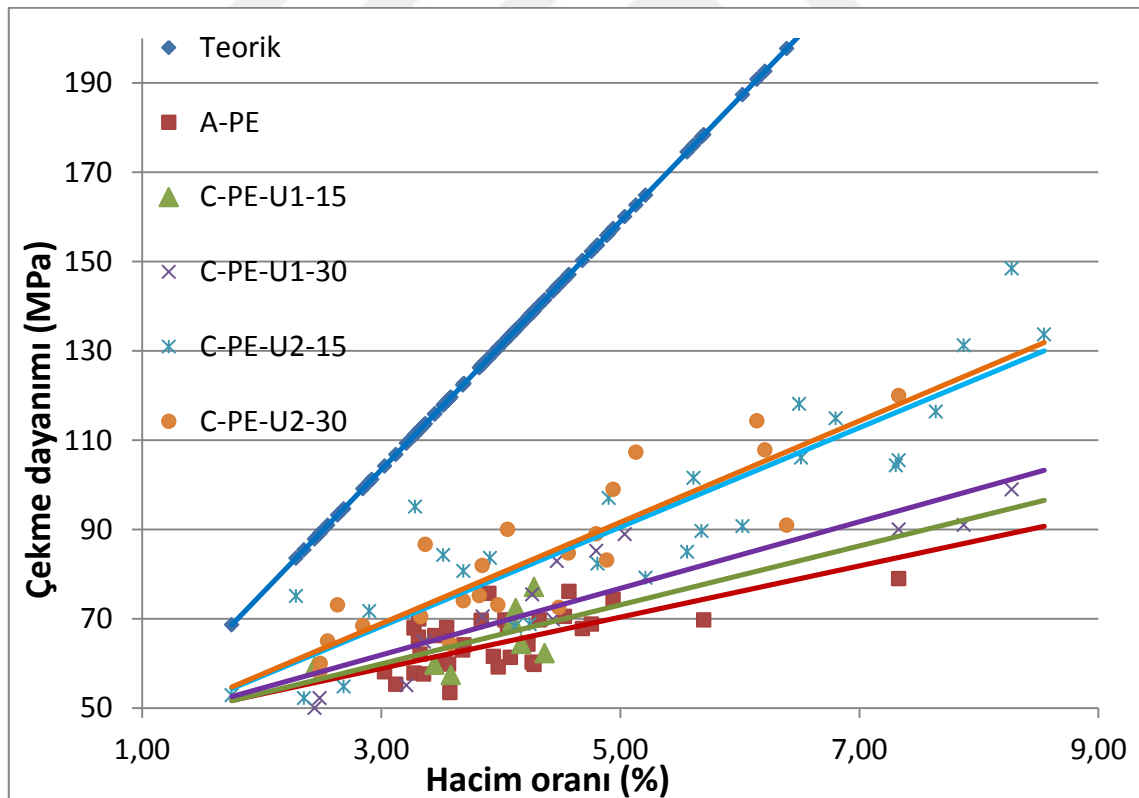
E-camı fiber ile benzer proseslerle (A, B ve C) basalt fiber takviyeli kompozitler üretilmiştir. Buradaki üretimin E-camı kompozit üretiminden tek farkı C grubunda %15 ve %30 olmak üzere iki uyumlaştırıcı oranının sabit tutulmuş olmasıdır. Bu sayede daha az parametre ile daha anlaşılır veriler elde edilmiştir.



Şekil 8.12 Grup A ve B' de HDPE için çekme dayanımına fiber hacim oranı grafiği

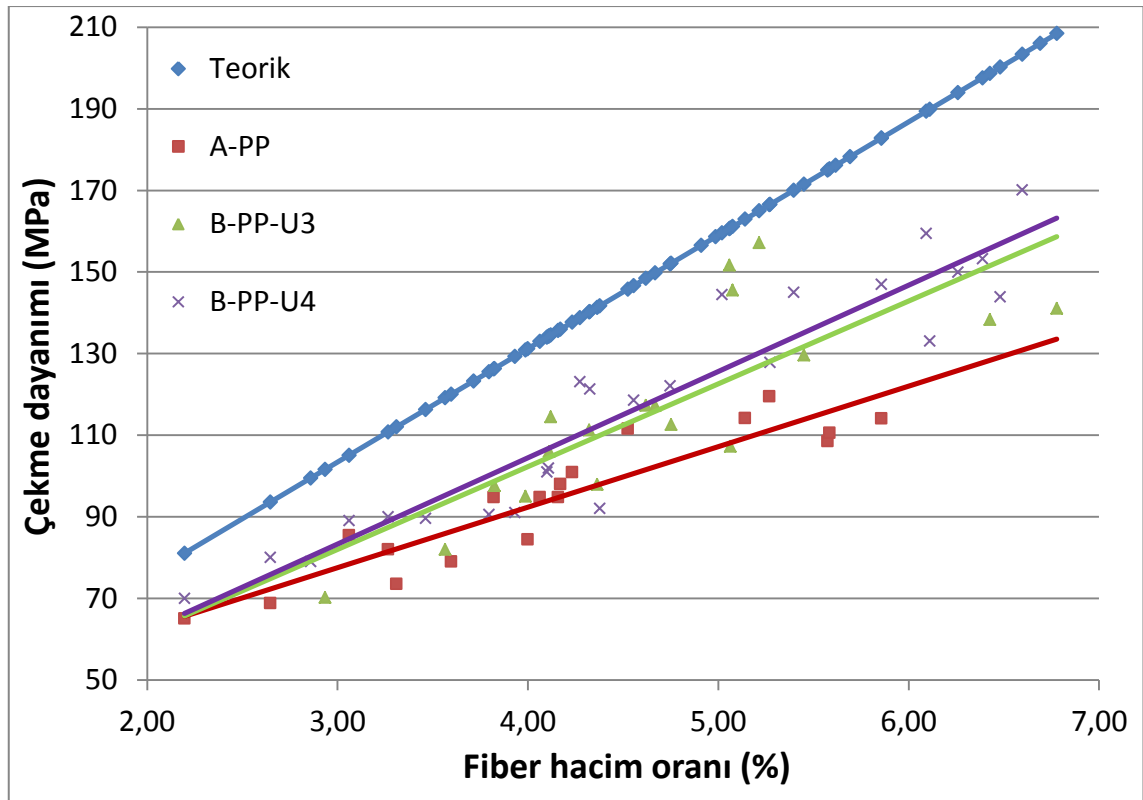
Her numune için belirlenen hacim oranındaki maksimum çekme dayancı değeri grafik üzerinde işaretlenmiş ve her grup için eğilim çizgileri uygun grafikte çizilmiştir. Karışımlar kuralına göre hesaplanan teorik sonuçlar her grafikte verilmiştir. Bu, üretilen kompozitin üst limitlerini görmeğe ve karşılaştırma yapmaya yardımcı olmuştur. Ayrıca her tür için Grup A' nın sonuçları uyumlaştırılmamış durumla karşılaştırma yapmak adına grafiklere yerleştirilmiştir. Grafikler; HDPE için Grup A-B ve Grup A-C, PPRC için Grup A-B ve Grup A-C şeklinde kategorize edilmiştir.

Şekil 8.12' de HDPE' in Grup A ve Grup B kompozitlerinden %2-10 hacim oranları arasında elde edilen sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre, her iki uyumlaştırıcının da etkili olduğu görülmektedir. Ancak EMA-GMA terpolimer içerikli U2 uyumlaştırıcısının, MAH içerikli U1 uyumlaştırıcısına göre biraz da iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunda U2' nin daha yüksek MFR değerine sahip olmasının etkisi büyüktür. Yine de U2 uyumlaştırıcı içeren B grubu kompozitler bile teorik değere özellikle yüksek hacim oranlarında ulaşamamıştır.



Şekil 8.13 Grup A ve C' de HDPE için çekme dayanımına fiber hacim oranı grafiği

HDPE için Grup C'nin sonuçları %2-9 fiber hacim oranı arasında Şekil 8.13' daki gibi verilmiştir. B grubunda olduğu C grubunda da U2 uyumlaştırıcısı çok daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak U2' ki kompozitlerin uyumlaştırıcı oranının dayanım üzerine çok etkisi olmadığı görülmektedir. Grup B-PE sonuçlarında olduğu gibi, Grup C-PE sonuçlarının da teorik değerlerden çok uzakta olduğu görülmektedir. Bu, Bikiari D. ve arkadaşlarının da ortaya koyduğu gibi artan fiber/matris yapışması her zaman etkili kaplama ile ilişkili değildir, çünkü arayüzey bölgesindeki yapısal değişiklikler malzeme özelliklerinde bozulmaya neden olabilir olarak açıklanabilir.

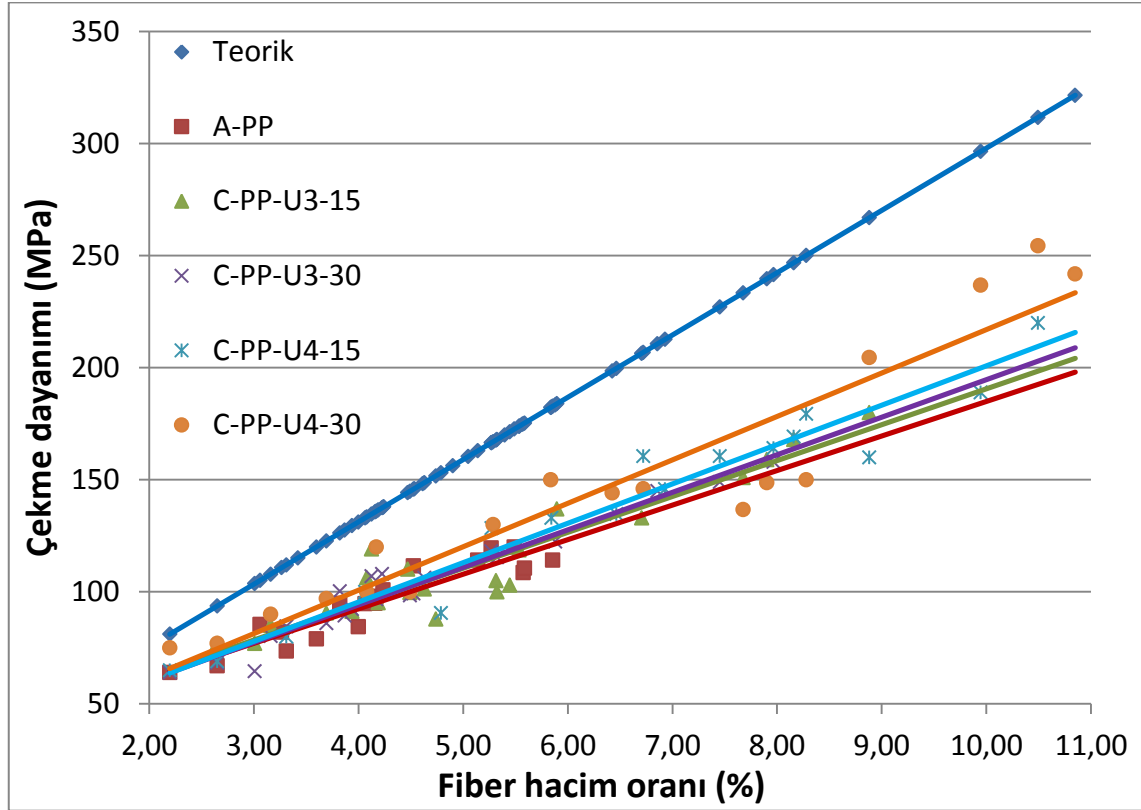


Şekil 8.14 Grup A ve B' de PPRC için çekme dayanımına fiber hacim oranı grafiği

Şekil 8.14, PPRC için Grup A ve B' nin %2-7.5 fiber hacim oranındaki sonuçlarını göstermektedir. Uyumlaştırıcıların faydalı olduğu kompozitin dayanımının teorik değere yaklaşmasından belli olmaktadır. İkisi de MAH içerikli olan U3 ve U4 de benzer sonuçlar vermişlerdir. Ancak burada U4 yüksek MFR değerlerinden ötürü, özellikle %5 ve üstü fiber içeriklerinde biraz daha etkili olmuştur.

B grubu numunelerde PPRC kompozitler, HDPE kompozitlere göre daha iyi sonuç vermişlerdir. Bunun nedeni basalt fiberin kendisinin üzerinde var olan silan

kaplamasının PP uyumlu olmasında kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuçlardan uyumlaştırıcı katılarak üretilen PP kompozitlerin teorik değerler yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 8.15 Grup A ve C' de PPRC için çekme dayanımına fiber hacim oranı grafiği

Şekil 8.15' te PPRC' nin U4 ile harmanlanması sonucu elde edilen dayanım değerleri görülmektedir. B grubundaki gibi U4 içerikli numuneler daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Özellikle C-PP-U4' te oldukça yüksek değerler elde edilebilmiştir. Ancak diğer sonuçlar birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Özellikle düşük fiber hacim oranlarında sonuçlar neredeyse A grubuyla benzer olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.5' te Şekil 8.12, 8.13, 8.14 ve Şekil 8.15' te dayanım değerleri verilen kompozit gruplarının yaklaşık %5 fiber hacim oranındaki elastisite modülü ve uzama değerleri verilmiştir. Burada elde edilen sonuçların Çizelge 8.4' teki E-camı kompozitlerle elde edilen verilerle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Ancak basalt fiberli numunelerden daha yüksek sonuçlar alınmıştır. Bunun nedeni basalt fiberin daha yüksek dayanımda olması malzeme veya E-camı fiber çapından daha ince çaplara sahip olması olabilir.

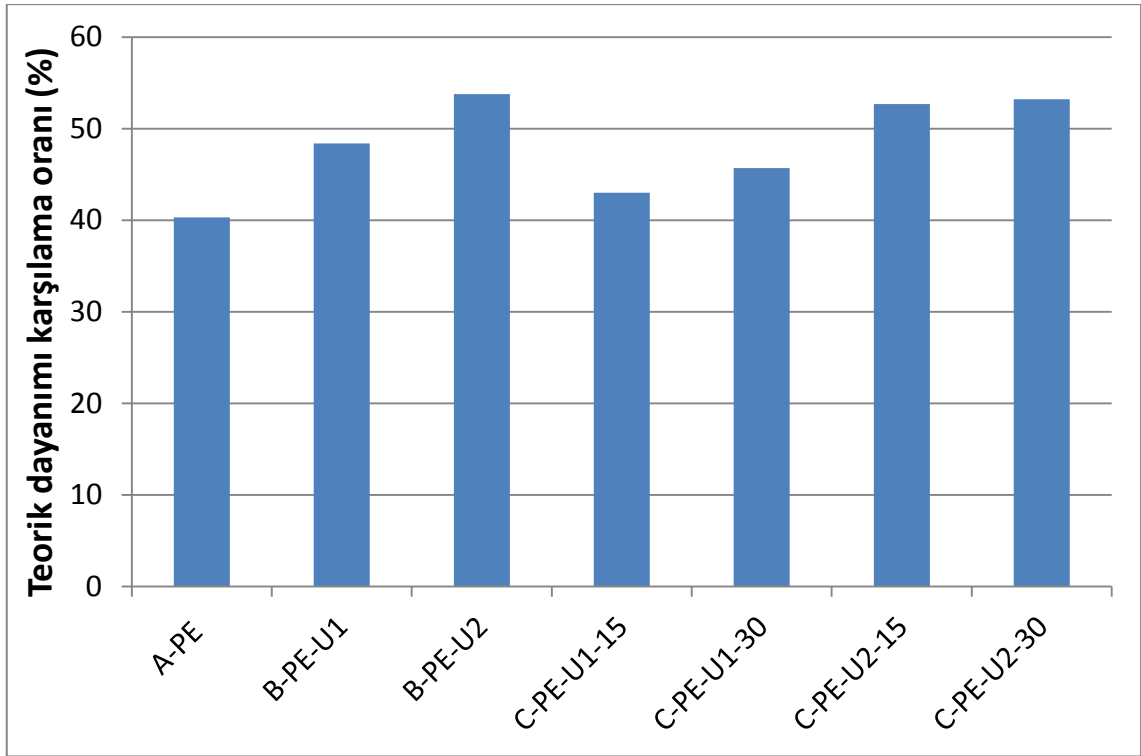
C gruplarındaki uyumlaştırıcı etkisi incelendiğinde elastisite modülü bakımından %30 uyumlaştırıcı içeriğinde, %15' e göre yükselme yaşanırken; uzama bakımından düşme gözlenmiştir. Uyumlaştırıcıların genel olarak uzama değerleri daha yüksek olmasına uzamaların uyumlaştırıcı oranı artışı ile artması beklenmektedir. Ancak bu gruplarda muhtemelen daha iyi bir fiber-matris tutunması yaşanmış ve bu da fiberlerin sıyrılmasını önlediğinden kompozit daha az uzamıştır.

Çizelge 8.5 Basalt fiberli numunlerin elastisite modülü ve uzama değerleri ($V_f=5\%$)

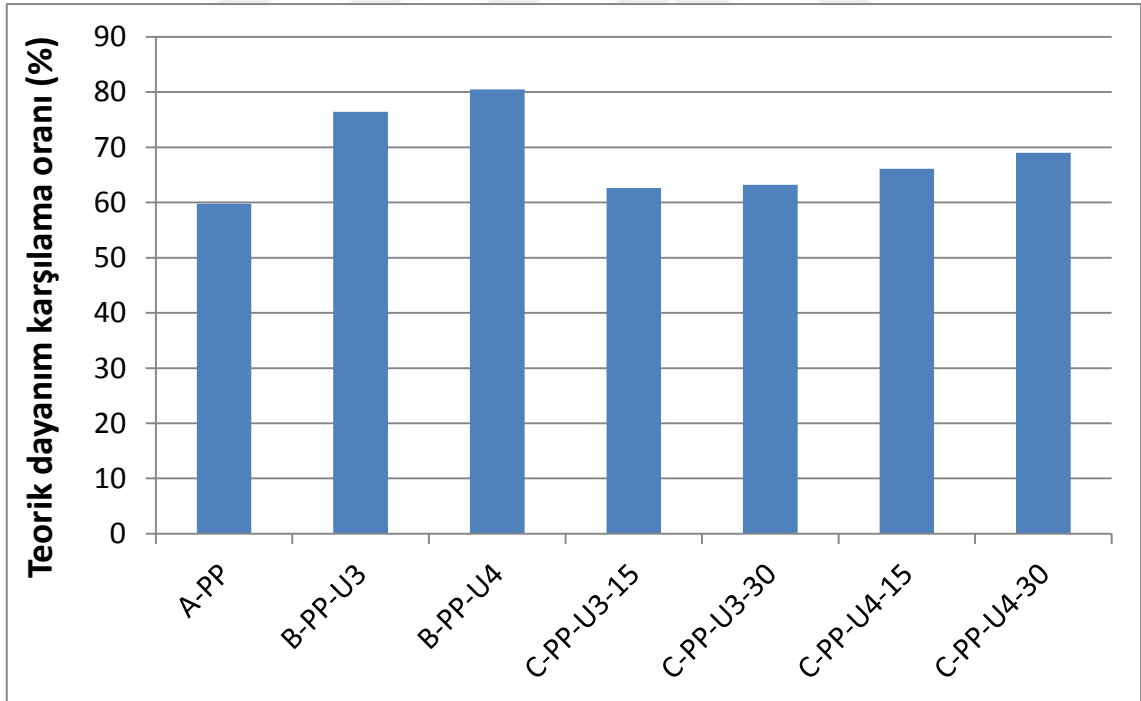
PE	E-mod (GPa)	Uzama (%)	PP	E-mod (GPa)	Uzama (%)
A-PE	3,84	4,20	A-PP	4,39	4,01
B-PE-U1	4,28	5,46	B-PP-U3	6,17	7,13
B-PE-U2	5,14	6,02	B-PP-U4	6,58	5,63
C-PE-U1-15	3,74	4,86	C-PP-U3-15	4,57	5,87
C-PE-U1-30	3,92	4,39	C-PP-U3-30	4,60	5,56
C-PE-U2-15	4,78	7,57	C-PP-U4-15	4,68	4,33
C-PE-U2-30	4,84	6,02	C-PP-U4-30	4,77	4,41

Şekil 8.16 ve 8.17, sırasıyla HDPE ve PPRC kompozitlerin için hesaplanan karşılama oranlarını göstermektedir. Bu sonuçlardan B-PE-U2' nin HDPE kompozitler arasında en iyi performansı verdiği görülmüş ve onu B-PE-U1 takip etmiştir. U2' nin C grubunda da iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak U1' in C grubu performansı U2 kadar etkili olmamıştır.

Beklenildiği üzere PPRC kompozitlerde karşılama oranı HDPE kompozitlere göre daha iyi sonuç vermiştir. PPRC kompozitlerde B gruplarında en yüksek değerlere ulaşılmıştır. Diğer bir değişle uyumlaştırıcıyı ara tabaka olarak uygulamak kompozitin dayanımını arttırmıştır. Ayrıca, bu grupta kullanılan uyumlaştırıcı alternatifleri arasında belirgin bir farklılık da gözlenmemiştir. Bu davranış, her iki PP bazlı uyumlaştırıcının da MAH aşılı edilmiş tür olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

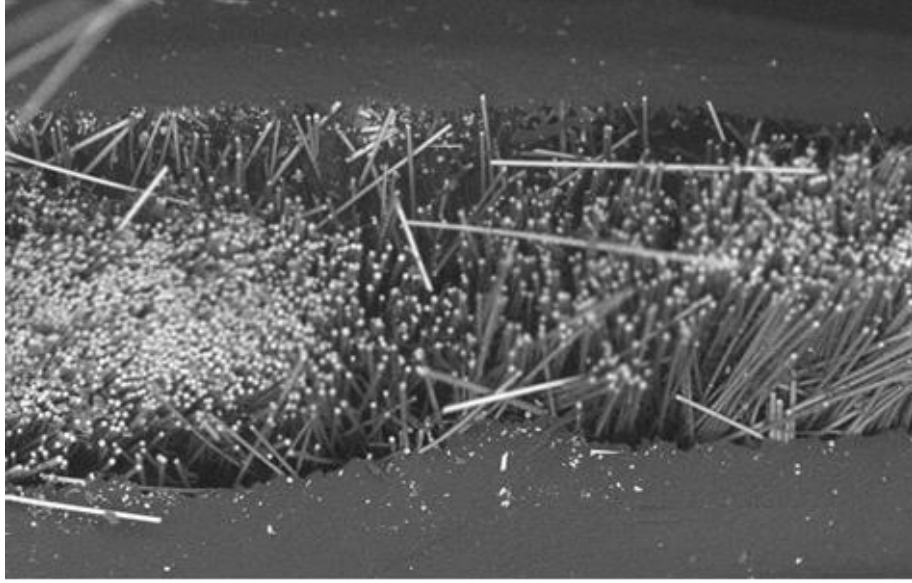


Şekil 8.16 HDPE kompozitlerin teorik dayanımı karşılama oranları

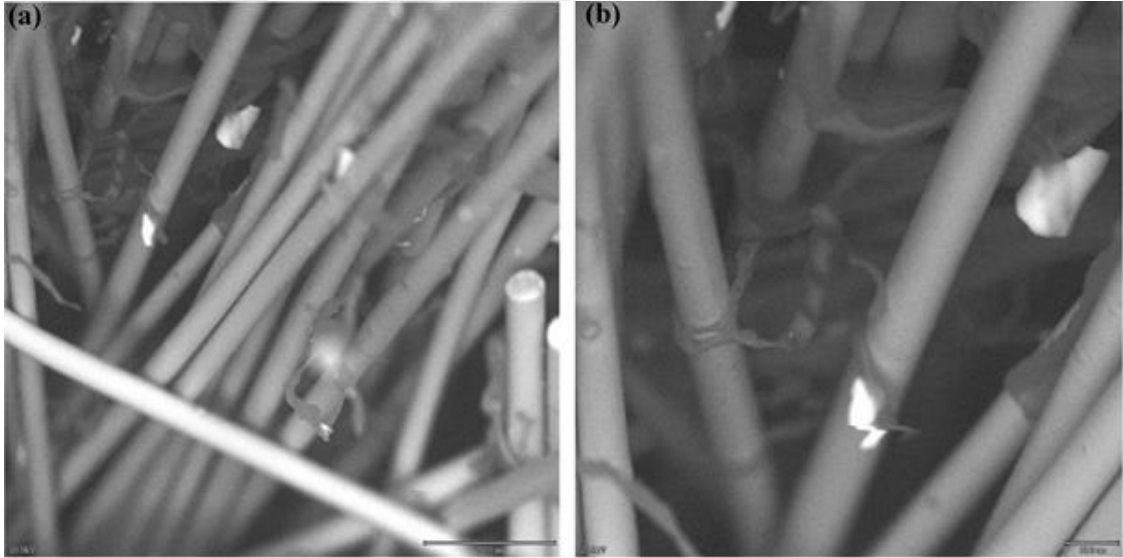


Şekil 8.17 PPRC kompozitlerin teorik dayanımı karşılama oranları

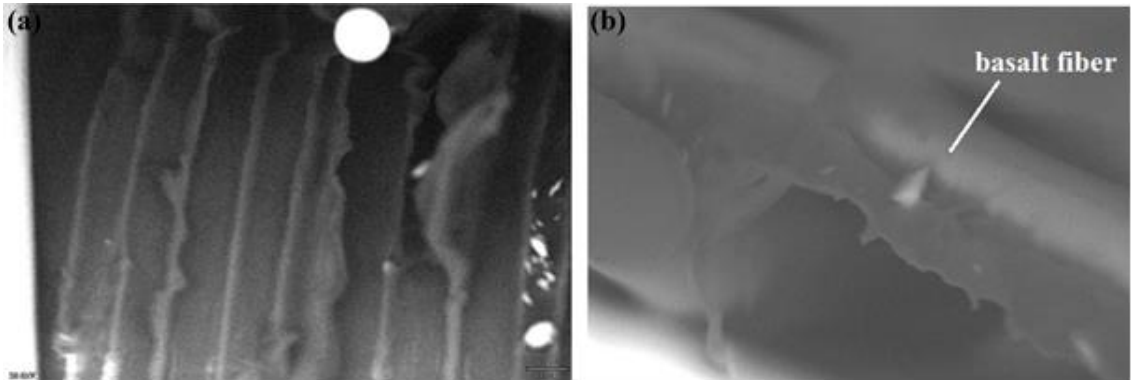
Ancak C gruplarında etkili sonuçlar alınmamıştır. Özellikle C-PP-U3' lü numunelerde çok az bir iyileşme yaşandığı görülmektedir.



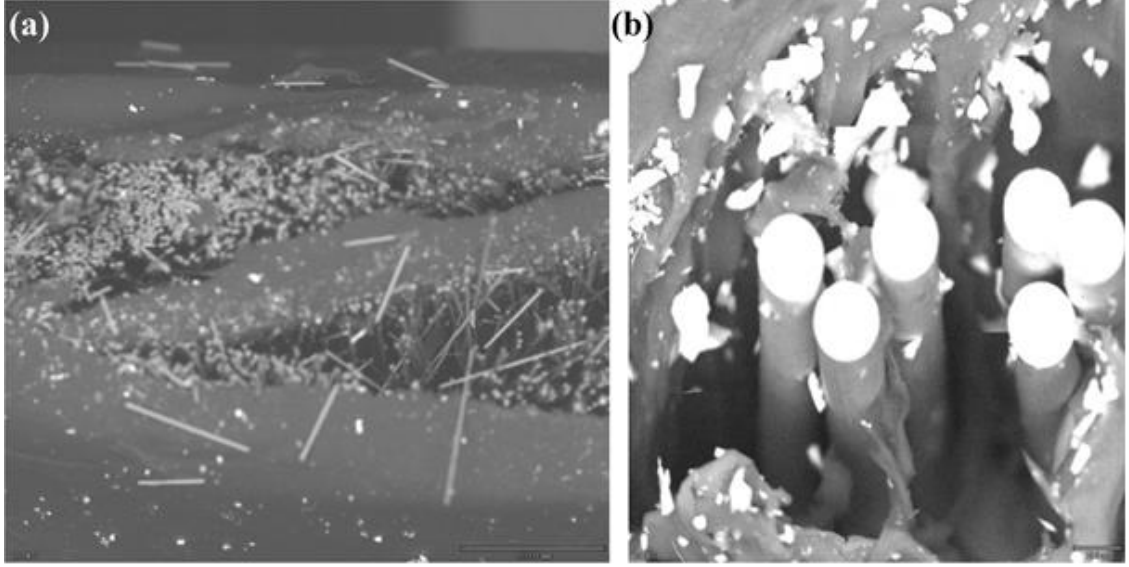
Şekil 8.18 50X' te alınmış A-PE SEM görüntüsü



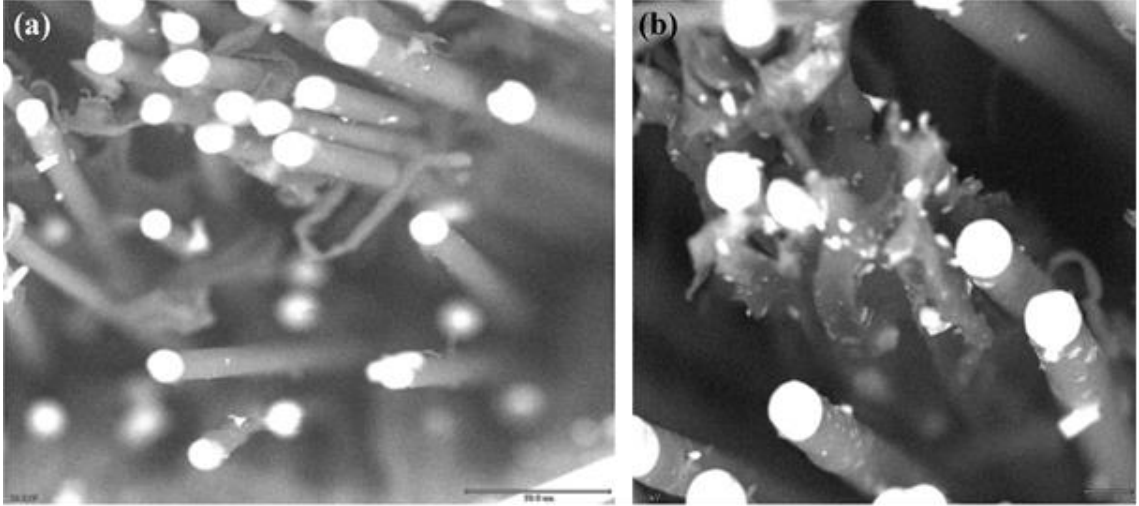
Şekil 8.19 A-PE SEM görüntüsü: a) 500X, b) 1000X



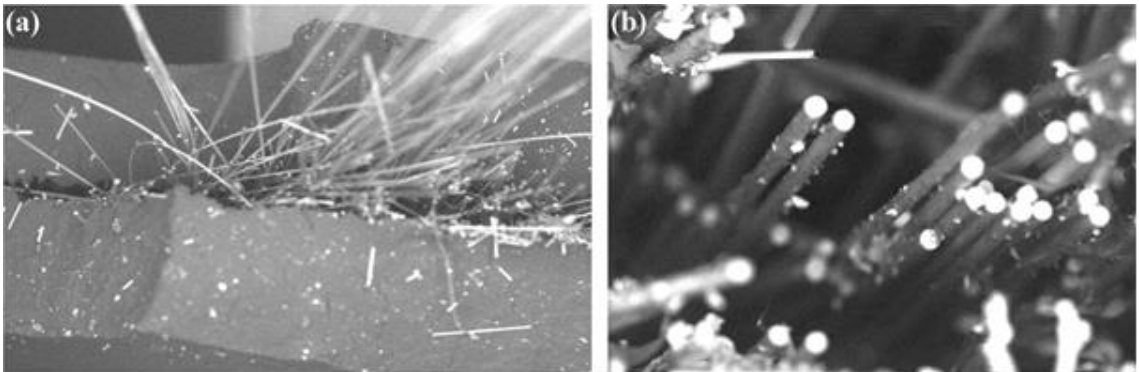
Şekil 8.20 B-PE-U1 SEM görüntüsü: a) 750X, b) 3500X



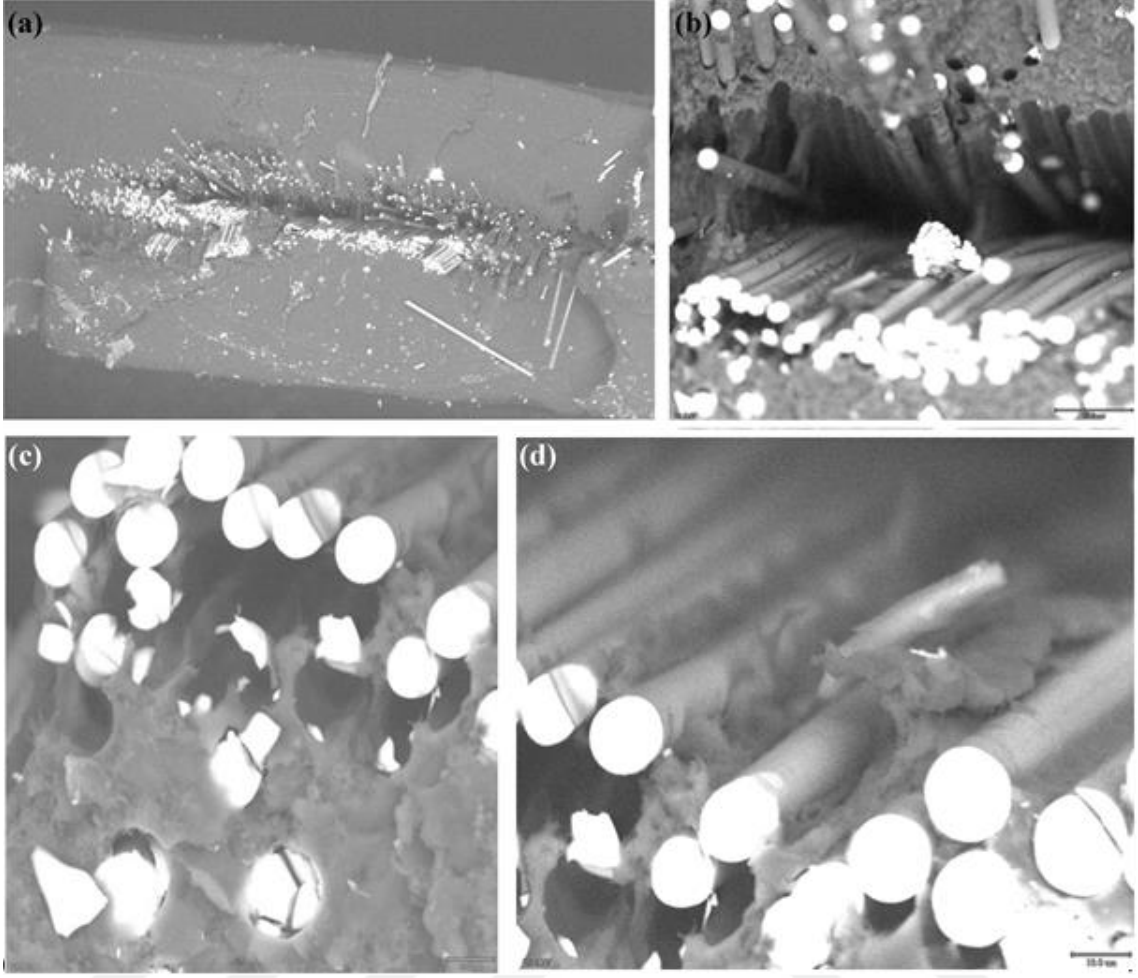
Şekil 8.21 C-PE-U2 SEM görüntüsü: a) 50X, b) 1000X



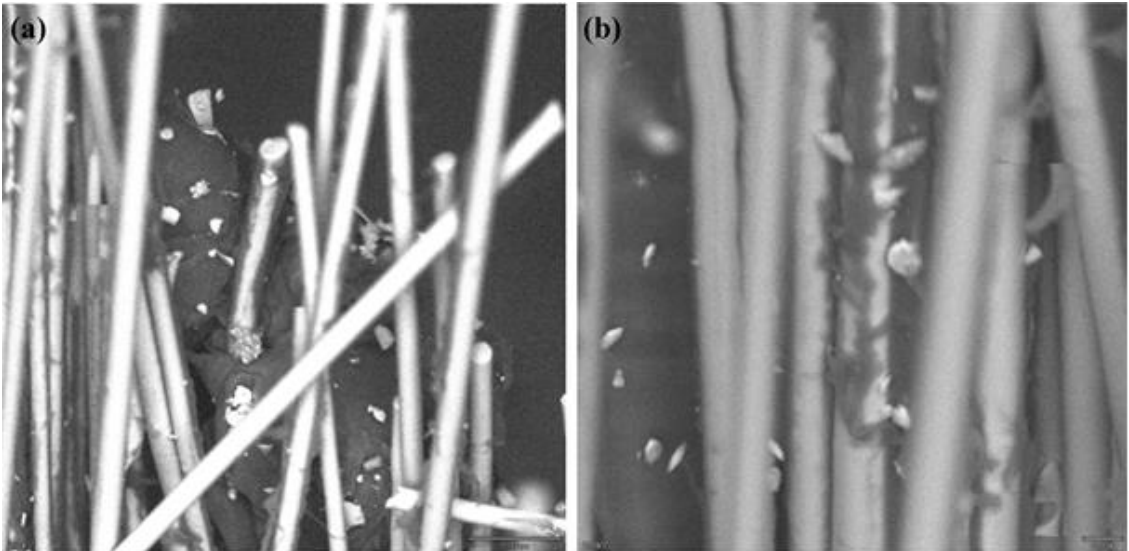
Şekil 8.22 A-PP SEM görüntüsü: a) 500X, b) 1000X



Şekil 8.23 B-PP-U3 SEM görüntüsü: a) 50X, b) 1000X



Şekil 8.24 B-PP-U4 SEM görüntüsü: a) 35X, b) 350X, c) 500X, d) 1000X

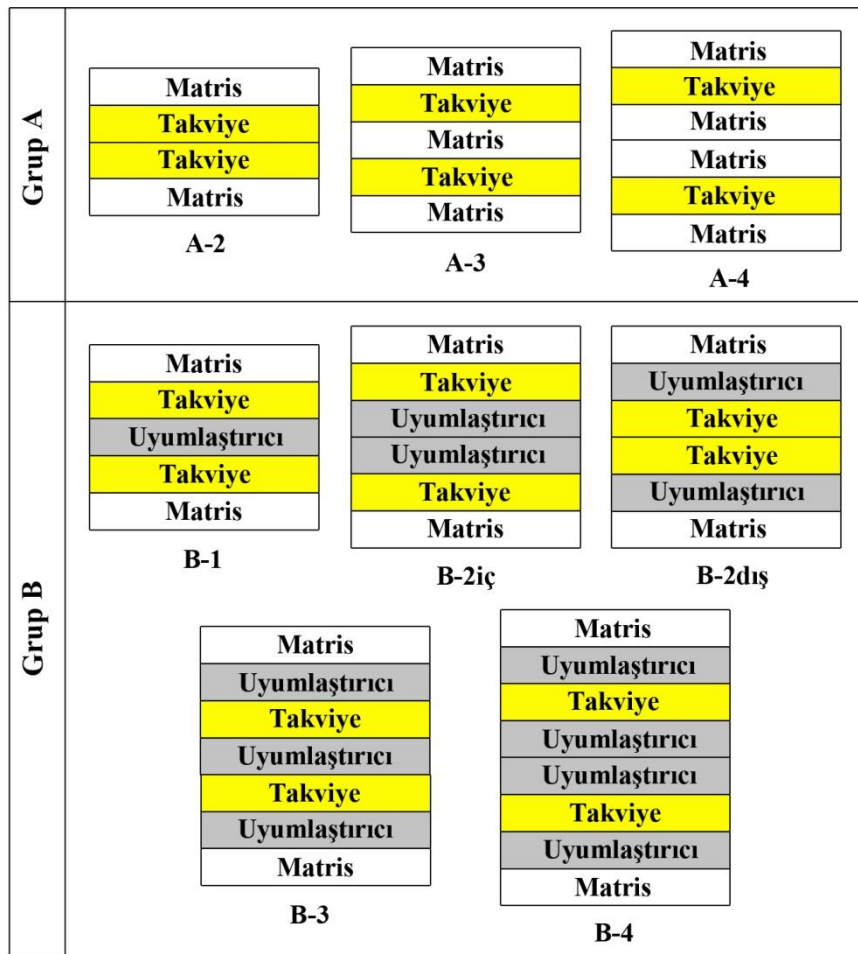


Şekil 8.25 C-PP-U3 SEM görüntüsü: a) 350X, b) 750X

Şekil 8.18 ve 8.19’ te A grubu HDPE, Şekil 8.20 B grubu HDPE, Şekil 8.22’ te B grubu HDPE kompozitlere ait kırık kesitlerin SEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 8.24 A grubu PPRC, Şekil 8.23 ve 8.24’ da B grubu PPRC, Şekil 8.25’ da C grubu PPRC kompozitlere ait kırık kesitlerin SEM görüntüleri yer almaktadır. Bu şekillerde mekanik sonuçlarda da anlaşıldığı üzere A grubunda yapışma eksikliği büyük oranda görülmüştür. Yapışma izleri B ve C gruplarında, kırık fiberin etrafına sarmış haldeki polimer kalıntıları şeklinde kendini göstermiştir.

8.4 Aramid Fiber Takviyeli Kompozitler

A grubu numunelerden 2, 3 ve 4 katlı numuneler üretilmiştir. B grubu ise 1, 2 iç, 2 dış, 3 ve 4 kat uyumlaştırıcı tabaka yerleştirilerek oluşturulmuştur. Şekil 8.26’ de oluşturulan grupların numune içi yerleşim düzeni ve sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 8.26 Aramid fiberli numunelerin yerleşim düzeni ve sınıflandırılması

A grubunda 1, 2 ve 3 katlı olarak tasarlanmış üçer alt gruba; B grubunda U1 ve U2 olmak üzere iki farklı uyumlaştırıcı ile 1 kat, 2 içkat, 2 dış kat, 3 kat ve 4 kat olmak her uyumlaştırıcı için beşer alt gruba çekme testi uygulanmıştır. Sonuçlar yük, dayanım, elastisite modülüne ve % kopma uzaması değerlerine göre Çizelge 8.6' da toplanmıştır.

Kullanılan fiber miktarı bu numunelerde sabit tutulup, matris plakalarının sayıları değiştirildiğinden az da olsa fiber hacim oranında değişiklik olmuştur. Fiber hacim oranları %12-17 arasında değişim göstermiştir. Bu nedenle dayanım, elastisite modülü ve uzama değerleri hacim oranından etkilendiğinden bu değerler hacim oranı %15 olacak şekilde orantılanarak verilmiştir.

Çekme yükü bakımından yapılan karşılaştırmada A grubunda 2 katlının 3 katlıdan daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. U1 yani maleik anhidrit (MAH) esaslı uyumlaştırıcı içeren B grubu çekme yükü bakımından karşılaştırıldığında; 1 kat uyumlaştırıcının kullanıldığı türde A grubuna göre yaklaşık iki kat yüksek sonuçlar alınmıştır. Uyumlaştırıcı miktarının artırıldığı 2 iç uyumlaştırıcı katlı türde yük değerlerinde artış yaşanmıştır. Buradan uyumlaştırıcı miktarının artışının mekanik özellikleri arttırdığı söylenebilir.

Fakat benzer miktarda uyumlaştırıcı fiberlerin dışına yerleştirildiğinde aynı etkiyi vermediği U1-2 dış katlı numune türünde görülmektedir. Hatta burada çekme yükü değerleri ciddi bir şekilde düşmüştür. Dolayısıyla uyumlaştırıcı katmanın yerleştirilme konumunun da önemli bir parametre olduğu ortaya çıkmaktadır.

Üç ve dört uyumlaştırıcı katmanı içeren numunelerde de düşük yük değerleri elde edilmiş ve uyumlaştırıcı miktarı artmasına rağmen düşüş devam etmiştir. Burada uyumlaştırıcı etkisinin bir optimum değere sahip olduğu belirli bir uyumlaştırıcı oranından sonra uyumlaştırıcı miktarındaki artışın mekanik özellikleri düşürdüğü söylenebilir.

Çizelge 8.6 Aramid fiberli kompozitlerin çekme testi verileri

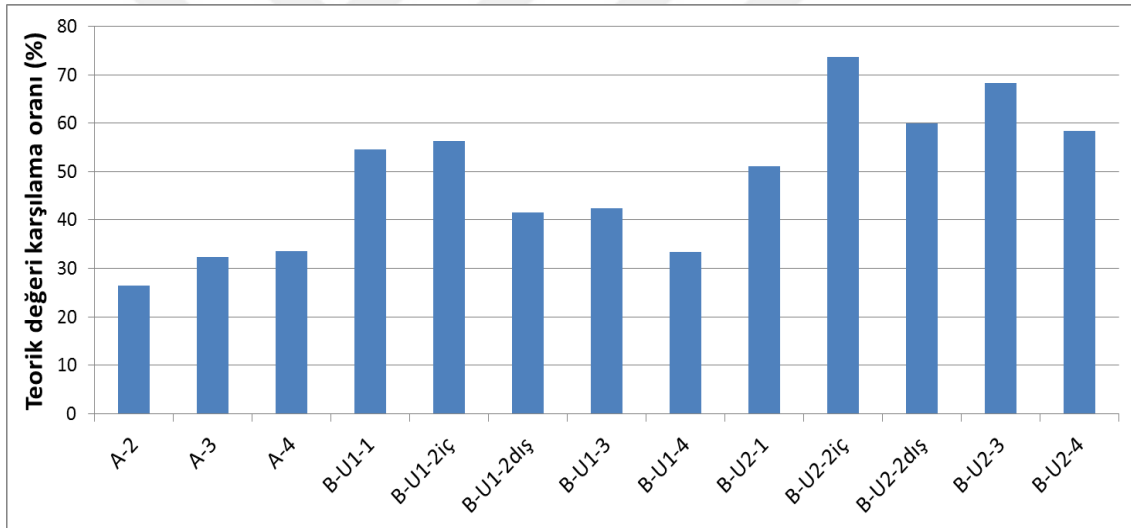
$V_f=\%15$	Yük (N)	Dayanım (MPa)	E-mod (GPa)	Uzama (%)
A-2	1639,605	99,34242	2,62748	5,96087
A-3	2805,693	121,0284	3,031875	5,375
A-4	3083,195	125,5835	3,147692	4,5
B-U1-1	3188,644	204,7291	4,523778	4,896913
B-U1-2iç	3414,924	211,2239	4,73355	5,134061
B-U1-2dış	2825,779	155,6451	4,230322	4,65372
B-U1-3	2964,935	158,8693	4,183693	4,668986
B-U1-4	2460,121	125,1149	3,487142	4,457091
B-U2-1	3739,531	191,646	3,990041	6,05707
B-U2-2iç	4533,936	276,4373	5,193414	7,321549
B-U2-2dış	4017,482	224,6492	4,288192	7,430088
B-U2-3	5298,545	256,1347	4,395743	9,743136
B-U2-4	4589,025	219,2897	4,240393	10,15071

U2 esaslı uyumlaştırıcı içeren B grubu numuneler genel itibari ile hem uyumlaştırıcısız A grubu hem de U1 uyumlaştırıcılı numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. U1-2iç ve U1-2dış kat ile benzer eğilimler göstermiş, uyumlaştırıcı miktarı arttıkça mekanik değerler yükselmiş ve dış katman olarak kullanıldığında düşmüştür. U1'ün aksine 3 katman olunca değerler yükselmeye devam etmiş fakat 4 katmanda düşüş yaşanmıştır.

Çekme yükünün numunenin kesit alanına bölünmesi ile hesaplanan çekme dayanımı değerleri bakımından karşılaştırıldığında çekme yükü karşılaştırmasıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yük karşılaştırmasına göre tek farklılık B grubunda U2-3 katmanda yaşanmıştır. Ancak dayanım değeri numunenin kesitinden bağımsız bir özellik olması açısından daha güvenilir sonuçlardır. Böylece B grubunda optimum uyumlaştırıcının U1 için de, U2 için de 2 iç katmanda elde edildi görülmüştür.

Yine numunenin boyutlarından bağımsız bir özellik de elastisite modülüdür. Elastisite modülü numunenin dayanım değerinin % kopma uzamasına bölünmesiye bulunan bir özelliktir. Numunelerin elastisite modülü değerlerindeki karşılaştırma eğilimi de dayanımla benzer olup en iyi sonuçlara 2 iç katman uyumlaştırıcı içeren B grubu numunelerde ulaşılmıştır.

Kopma uzaması A grubu içinde yaklaşık olarak benzer sonuçlar verirken; B grubunda U1 uyumlaştırıcı miktarı arttıkça azalmış, U2 uyumlaştırıcısı miktarı arttıkça artmıştır (U2-4 hariç). Bunun nedeni olarak uyumlaştırıcı hammaddelerinin kopma uzama değerlerinin düşük ya da yüksek olması gösterilebilir. PE'in kopma uzaması %600 iken; U1' in %500, U2'in %1100' dür. Dolayısıyla U1' li kompozit için uyumlaştırıcı oranı arttıkça kopma uzaması U1 ile orantılı olarak azalmakta iken; U2' li kompozit için U2 arttıkça orantılı olarak artmaktadır.

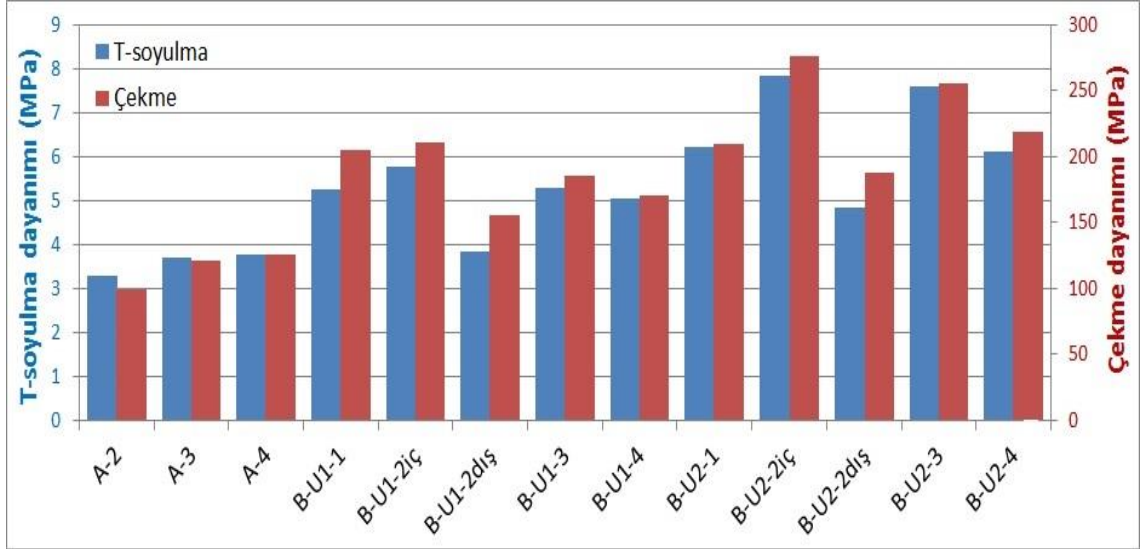


Şekil 8.27 Aramid fiberli numunelerin teorik değeri karşılama oranları

Şekil 8.27' de aramid fiberli kompozit numunelerin teorik çekme dayanımı karşılama oranları verilmiştir. Burada da en başarılı grupların B-U1-2iç ve B-U2-2iç olduğu belirlenmiştir. U2 uyumlaştırıcısı daha yüksek akıcılığa sahip olduğundan bu uyumlaştırıcıyı içeren gruplarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

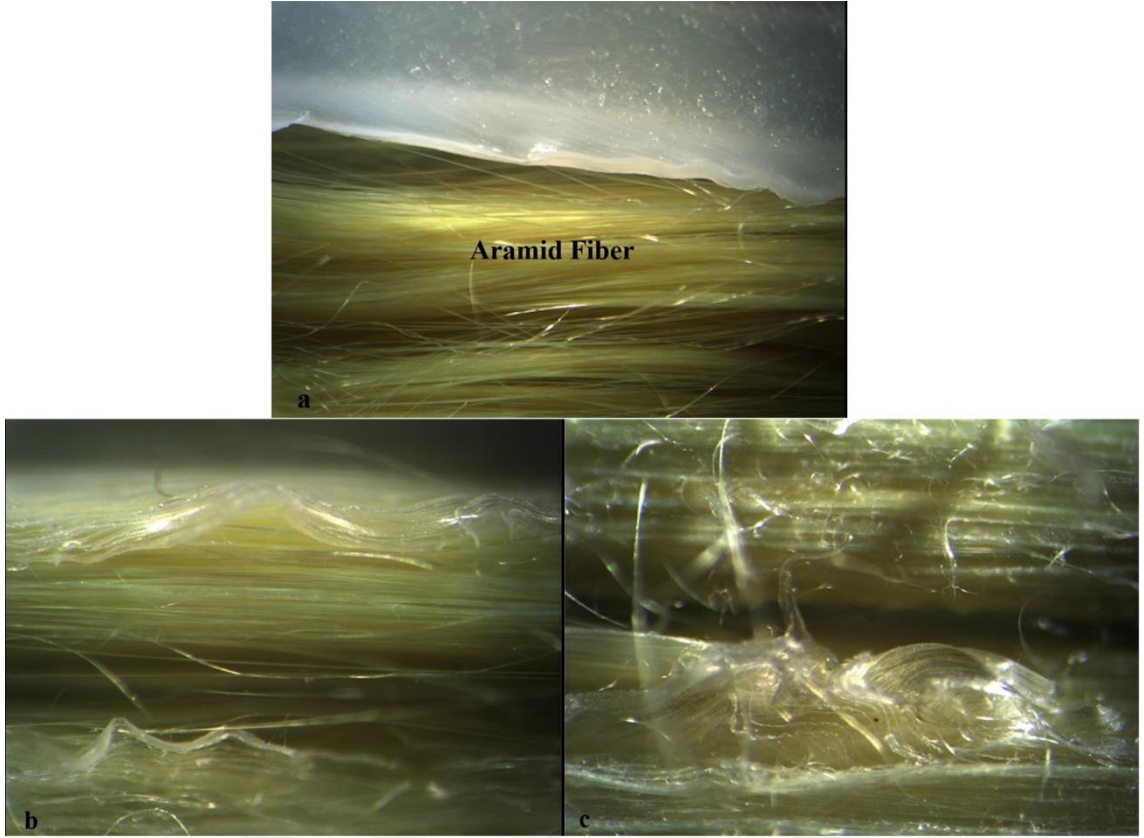
8.4.1 T-Soyulma Testi Sonuçları

T-soyulma ve çekme dayanımları sonuçları Şekil 8.28’ de verilmiştir. Soyulma yükü ve dayanım değerleri karşılaştırması bakımında çekme testiyle benzer eğilimde sonuçlara ulaşılmıştır.

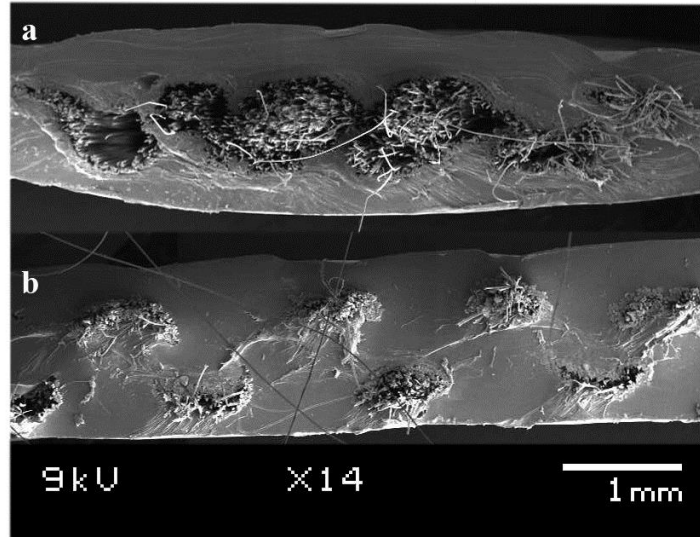


Şekil 8.28 Aramid fiber takviyeli kompozitin T-soyulma dayanımı sonuçları

Şekil 8.29’ de soyulma testi sonrası bazı numunelerden alınan kırık kesit görüntüleri yer almaktadır Şekil 8.29.a’ da uyumlaştırıcısız kompozitte aramid fiberin neredeyse hiç ıslanmadığı açık olarak görülmektedir. Şekil 8.29.b’ de ise yapıştırıcının fiber demetinin etrafını sardığı fakat demetin içine işlemediği görülmektedir. Şekil 8.29.c’ de yapıştırıcı fiber demetinin üzerini tamamen örtmüş ve demete çok iyi yapışmıştır öyleki kopma sonrasında bile uyumlaştırıcı tabakası halen fiberin üzerindedir. Şekil 8.30’ de görülen SEM görüntülerinden de benzer sonuçlar çıkmaktadır.



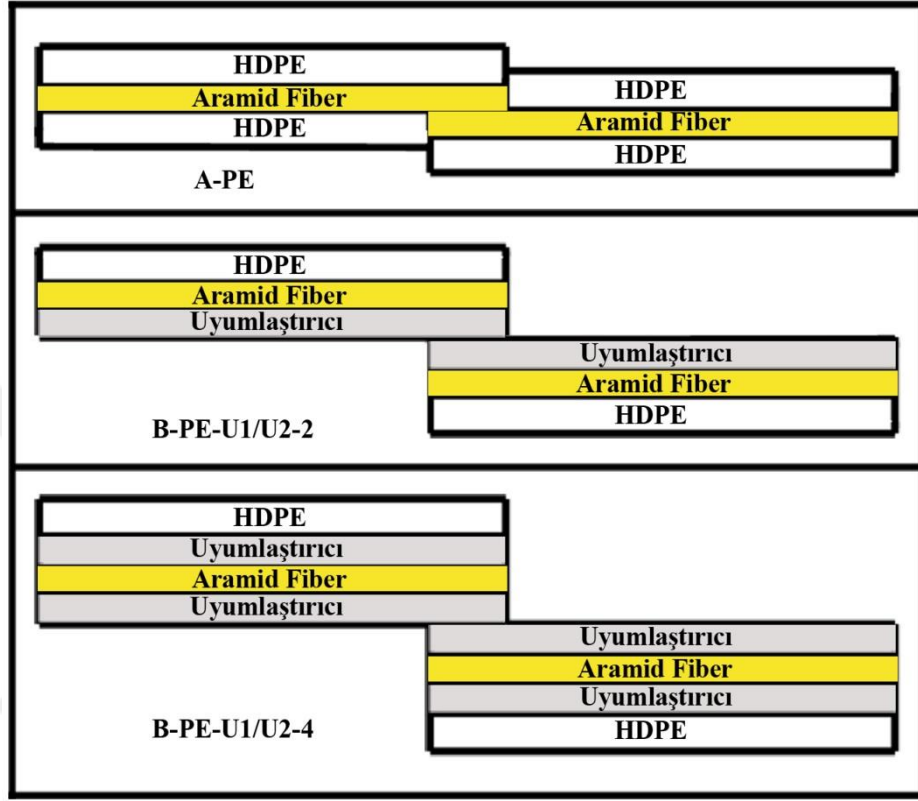
Şekil 8.29 Stereo mikroskop görüntüleri: a) A-2, b) B-U1-2-iç, c) B-U2-2-iç



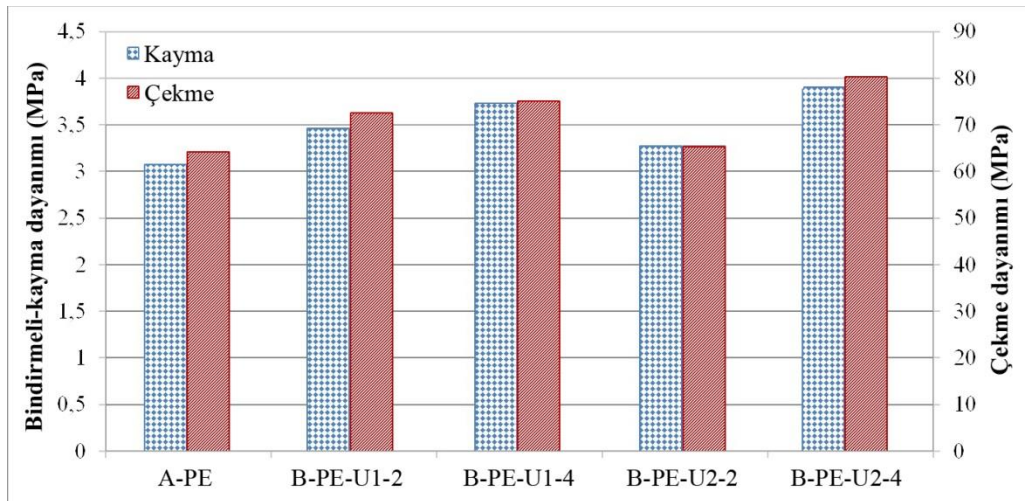
Şekil 8.30 Aramid fiberli kompozitlerin SEM görüntüleri: a) B-U1-2-iç, b) B-U2-2-iç

8.4.2 Bindirmeli-Kayma Testi Sonuçları

Şekil 8.31’ de A-PE, B-PE-U1-2, B-PE-U1-4, B-PE-U2-2 ve B-PE-U2-4 numune gruplarına ait bindirmeli kesme ve çekme testi sonuçları verilmiştir. Her değer beş test sonucunun ortalamasıdır.



Şekil 8.31 Bindirmeli-kayma testi numune türlerinin şematik görünümü



Şekil 8.32 Bindirmeli kesme dayanım ve çekme dayanım grafiği

Şekil 8.32' de görüldüğü üzere aramid fiber takviyeli HDPE kompozitlerin bindirmeli kesme dayanımı 3-4 MPa arasında, çekme dayanımları ise 60-80 MPa arasında bulunmuştur. Her iki testte de sonuçlar benzer eğilimlerdedir. Neredeyse benzer oranlarda kesme dayanımı arttıkça çekme dayanımı artmış, düştükçe düşmüştür. Bu üretilen kompozitlerin kararlı bir davranış gösterdiğini göstermektedir. Çünkü kesme ve çekme mekanizmaları arasında Eşitlik 8.2 ve 8.3' de verilen bağıntıda görüldüğü gibi bir bağlantı vardır.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (7.2)$$

Burada E elastisite modülü, G kayma modülü ve ν poisson oranıdır. Bu eşitlik aşağıdaki gibi açılabilir:

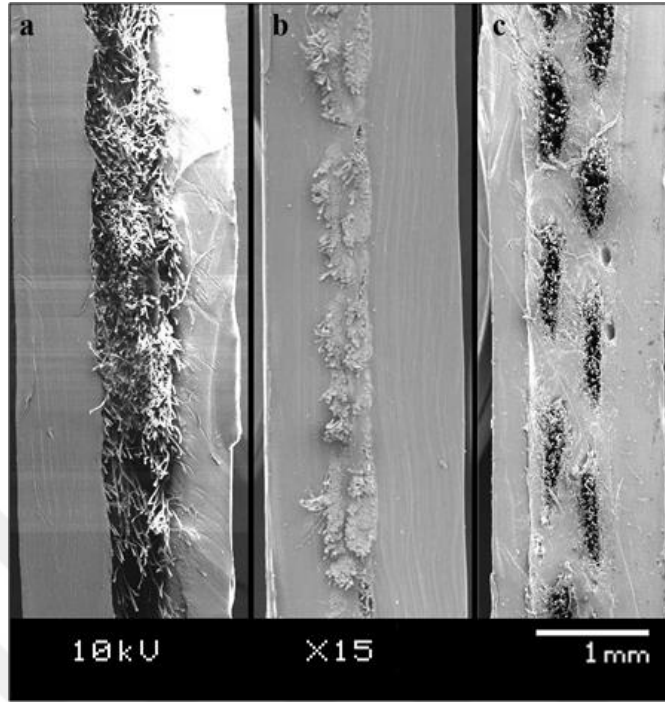
$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = 2 \frac{\tau}{\gamma} (1 + \nu) \quad (7.3)$$

Burada ise σ çekme dayanımı, τ kesme dayanımı, ε çekme gerinimi ve γ kesme gerinimidir. Fakat burada bu eşitlikler sadece numune davranışları arasındaki eğilimi tahmin etmek için kullanılabilir, gerçek değerleri bulmak için kullanılamaz. Çünkü bindirmeli-kayma sürekli fiber takviyeli yapıya ait testi gerçek kesme değerini veremez. Bindirmeli-kayma dayanımı 12.5 mm uzunlukta takviyeli kompozitten ölçülmektedir, ancak çekme dayanımı sürekli fiber takviyeli kompozitten ölçülmektedir.

A-PE grubu numunelerde ortalama 3.07 MPa bindirmeli kayma dayanımı (BKD) ve 64.28 MPa çekme dayanımı (ÇD) bulunmuştur. Uyumlaştırıcı tabakası mekanik sonuçları arttırmıştır. U1 uyumlaştırıcı tabakası kullanılması durumunda dayanım değerleri kullanılan uyumlaştırıcı sayısı arttıkça artmıştır. B-PE-U1-2 grubu numunelerde 3,46 MPa BKD ve 72,62 MPa ÇD, AF-HDPE-U1-4 grubu numunelerde ise 3,73 MPa BKD ve 75,08 MPa ÇD değerleri elde edilmiştir. Benzer durum U2 kullanımında da görülmüştür. U2 tabaka sayısı arttıkça mekanik değerler artmıştır. B-PE-U2-2 grubunun sonuçları A-PE grubundan çok farklı değildir. Bu grupta 3,27 MPa BKD ve 65,4 MPa ÇD görülmüştür. B-PE-U2-4 grubunda ise serinin en yüksek sonuçları elde edilmiştir. Bu grupta ise 3,91 MPa BKD ve 80,29 MPa ÇD bulunmuştur.

Uyumlaştırıcı katmanı kullanımına ve uyumlaştırıcı türüne bağlı olarak SEM'de üç çeşit numune incelenmiştir. A-PE, B-PE-U1-4 ve B-PE-U2-4 grubu numunelerin kesit

görüntüleri matris içindeki fiber dağılımını ve fiber-matris arayüzeyini kabaca incelemek için 15X'te alınmıştır. Bu görüntüler Şekil 8.33'te verilmiştir.



Şekil 8.33 Kesit görüntüleri (15X): a) A-PE, b) B-PE-U1-4, c) B-PE-U2-4

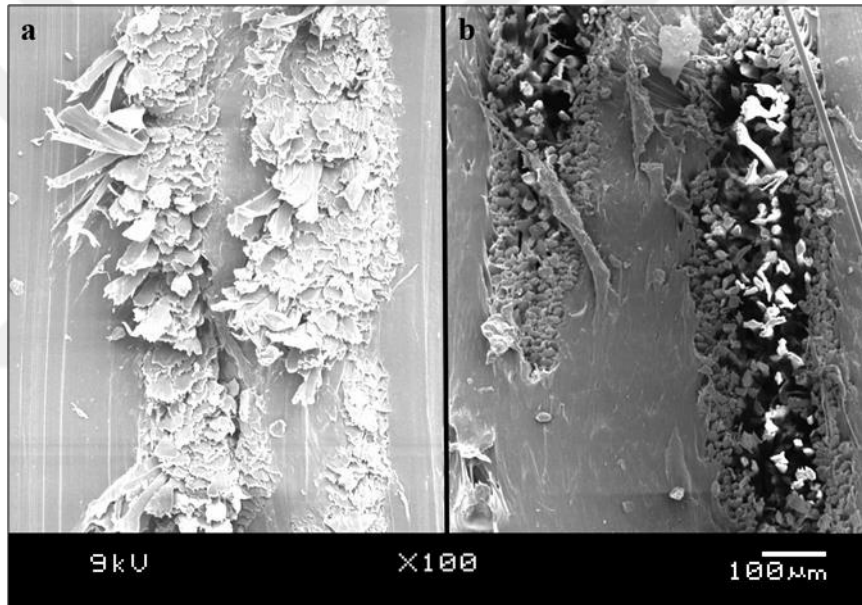
Şekil 8.33.a' da görünen uyumlaştırmısız kompozitte fiberler üzerinde neredeyse hiç ıslanmanın olmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu grupta fiber-matris arayüzeyinin oluşmadığı söylenebilir. Bu ise bindirmeli-kayma ve çekme testi sonucunda alınan düşük mekanik sonuçların sebebidir.

Şekil 8.33.b' de fiberler oldukça düzgün yayılmış olarak gözükmemektedir. Ayrıca U1' in fiberi çok iyi bir şekilde kapladığı görülmektedir ki bu iyi ıslatmanın ve başarılı bir fiber-matris birleşmesinin yapıldığının göstergesidir. Şekil 8.33.c' de ise fiber demetlerinin düzenli dizilmiş olduğu görülmektedir. Fakat burada demetler toplu halde kalmış, yayılmamıştır. U2 bu topaklanmış, yoğun demetin içine girememiştir. Bu yüzden demetlerin iç kısımları ıslanamamıştır. Buna rağmen en yüksek mekanik sonuçlar bu gruptan alınmıştır. Bu nedenle U2' de yapışmanın daha iyi olduğu yorumu yapılabilir.

Şekil 8.34' te fiber-matris arayüzey bağlanmasını daha detaylı incelemek için iki farklı uyumlaştırmıcı türü içeren numunelerin fiberce zengin kısımları üzerine odaklanılmıştır. B-PE-U1-4 ve B-PE-U2-4 numunelerinin kesitlerinden 100X'te görüntüler alınmıştır.

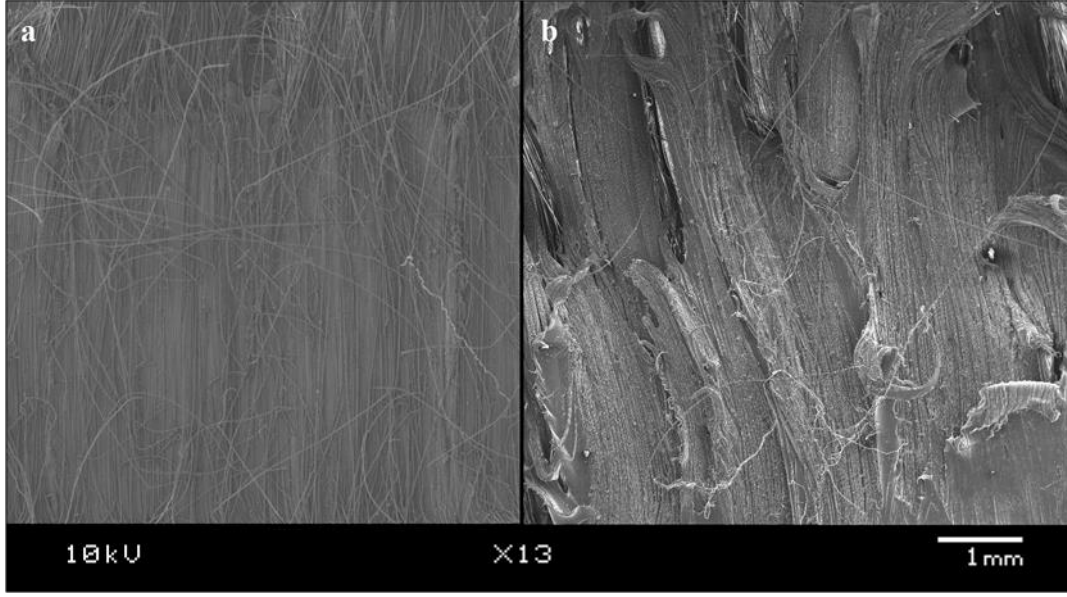
B-PE-U1-4' te fiber yayılımı daha homojen olmasına ve U1 fiberin büyük çoğunluğunu sarmış olmasına rağmen arayüzeyde bazı bağlanmamış kısımlar olduğu görülmüştür (Şekil 8.34.a). Bu bağlanma eksikliği düşük mekanik sonuçlar alınmasının nedeni olarak açıklanabilir.

B-PE-U2-4' deki sorun yayılmamış fiber demetleri yüzünden ıslanmamış fiber iç bölgeleriydi. Ancak çoğu fiberlerin kenar ve köşe noktalarının ıslanmış olduğu Şekil 8.34.b'de görülmektedir. U2' nin yüksek MFR değerine sahip olması bunun sebebi olabilir. Ayrıca U1' in aksine ıslanan bu kısımlar oldukça iyi bağlanmış ve herhangi bir ayrılma görülmemiştir. Buradan, demetlerin daha iyi yayılmasının sağlandığı bir proses sonucu, bu gruptan daha iyi mekanik değerler elde edilebileceği söylenebilir.



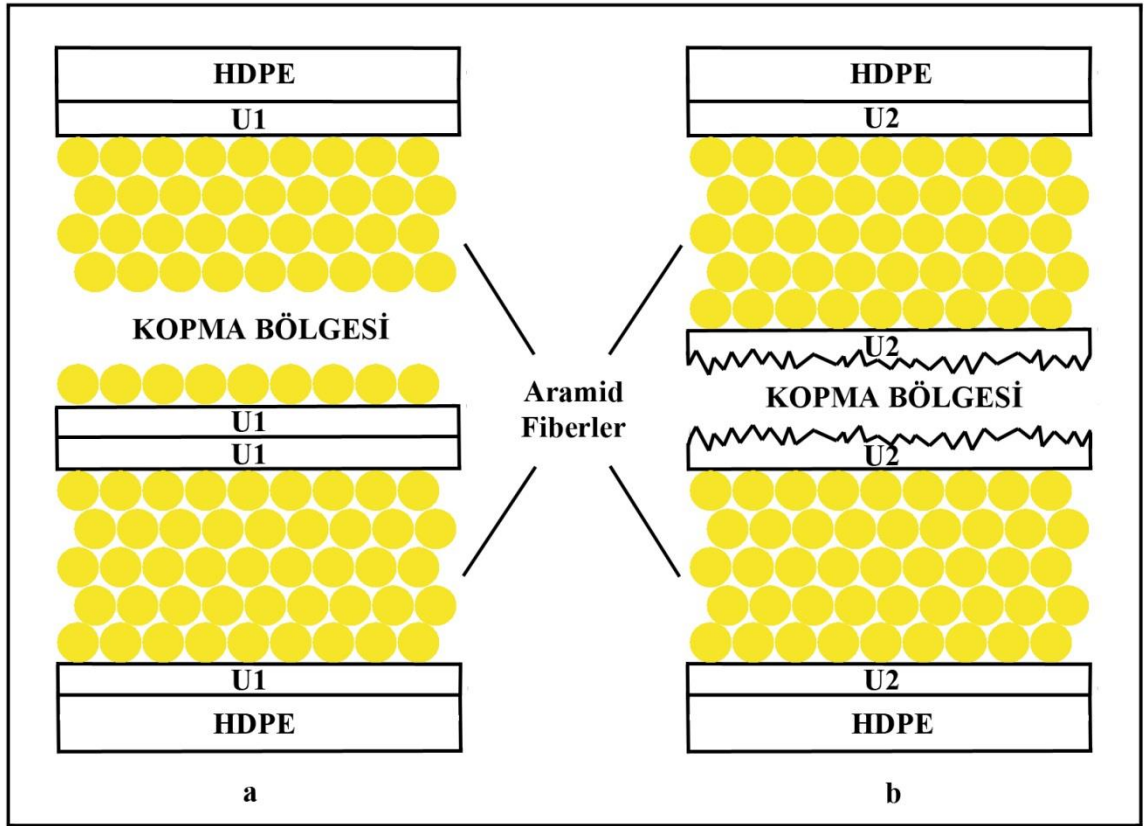
Şekil 8.34 Kesit görüntüleri (100X): a) B-PE-U1-4, b) B-PE-U2-4

Şekil 8.34' te uyumlaştırıcı numuneler için kesme testi uygulanmış yüzeylerin düşük büyütmelelerdeki (13X) görüntüleri verilmiştir. Şekil 8.35.a' da; U1'in sadece yüzeyde birkaç fibere tutunduğunu B-PE-U1-4'in kırık yüzeyinde görülmektedir. Bundan farklı olarak Şekil 8.35.b' de U2'nin B-PE-U2-4' ün neredeyse tüm kırık yüzeyindeki fiberleri kaplamış olduğu görülmektedir.



Şekil 8.35 Kırık kesit görüntüleri: a) B-PE-U1-4, b) B-PE-U2-4

U1 ve U2' li numunelerin kırık kesit görüntüleri farklılık göstermekte birlikte hasar paternleri de farklı yapılarıdadır. İki kompozite ait hasar türlerini tanımlamak için Şekil 8.36' deki şekil çizilmiştir.



Şekil 8.36 Şematik kırık kesit görünümüleri: a) B-PE-U1-4, b) BF-PE-U2-4

ISO 10365' a göre [112] temel hasarlar altlık ve yapıştırıcıda meydana gelir. Bu standarttaki tanımlamalar kompozitlere uyarlandığında; matris ve fiber altlık, uyumlaştırıcı katmanı ise yapıştırıcı olarak tanımlanabilir.

Uyumlaştırıcılı kompozitlerdeki kopmalarda her iki hasarda altlık yüzünden meydana gelmemiştir. Her iki hasar yapıştırıcı kaynaklıdır. U1'li kompozit yapılarda kopma fiber-uyumlaştırıcı (altlık-yapıştırıcı) arayüzeyinde meydana gelmiştir (Şekil 8.36.a). Ancak yapıştırıcı katmanı kendini hasar almadan korumuştur. Bu durumda hasar “adhesif” türü hasar olarak tanımlanmaktadır. Bunun nedeni olarak da U1'in aramid fibere yetersiz bağlandığı gösterilebilir.

Ancak U2'li kompozit yapılarda farklı bir durum ortaya çıkmıştır. Fiber-uyumlaştırıcı (altlık-yapıştırıcı) arayüzeyinde hasar görülmemektedir. Hasar uyumlaştırıcı katmanında meydana gelmiştir. Şekil 8.36.b' de görüldüğü gibi U2 kaplı fiberler hasara uğramıştır. Bu hasar türü ise “kohesif” olarak tanımlanmaktadır ve büyük olasılıkla U2'nin düşük mekanik özellikleri nedeni ile oluşmuştur.

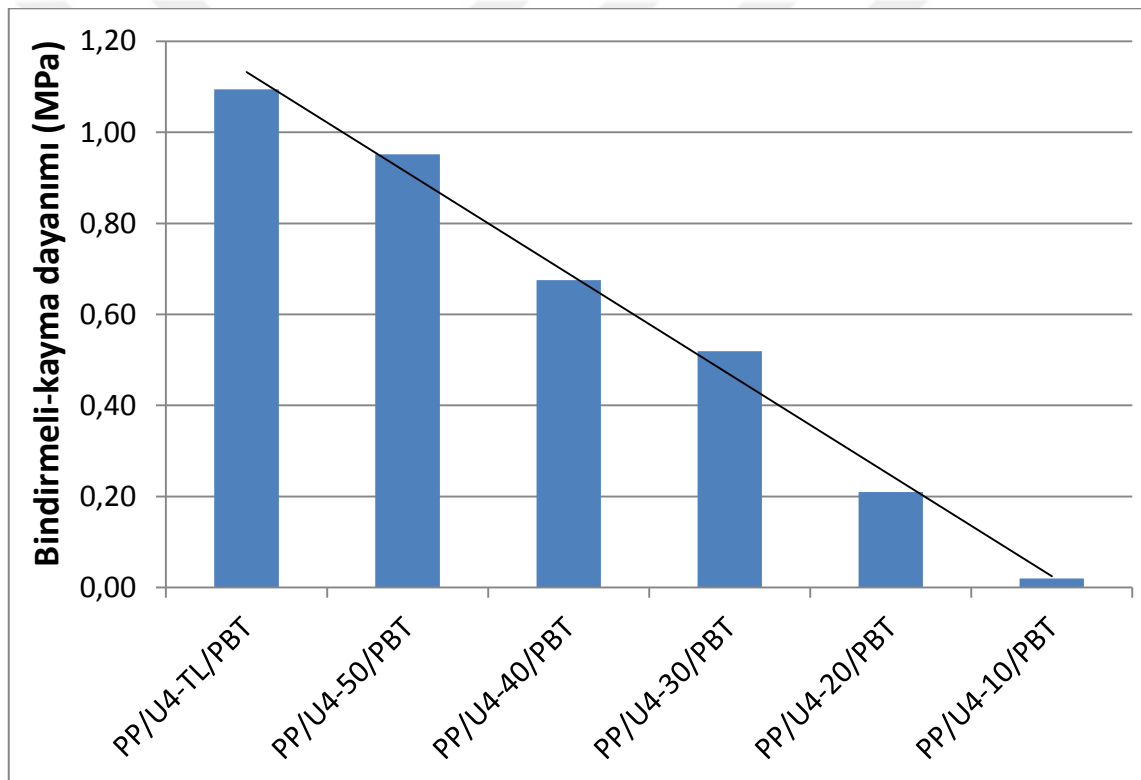
8.5 PP/PBT Arasındaki Bağlanmanın Ölçülmesi

Kendinden oluşan (in-situ) mikrofibrilli plastik kompozitler, bileşenlerinden ortalama %30-50 yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip değerler sergileyen yapılardır. Günümüzde bu yapılar cam fiber takviyeli sistemler ile karşılaştırılabilir seviyeye gelmişlerdir. Bu yapıların oluşturulması için iki polimer ekstrüderde harmanlandıktan sonra bir gerdime sisteminden geçirilerek in-situ fiberlerin oluşması sağlanmaktadır. Ancak bu ikili sistemlerde takviye polimer ile matris polimer çoğunlukla birbiri içinde karışmayan yapıda olduklarından ve dolayısıyla birbirlerine tutunmadıkları takdirde mekanik özelliklerden beklenen performans alınamamaktadır. In-situ PBT fiberli PP kompozitlerde bunlardan bir tanesidir.

Arayüzey bağlanmasını arttırmak bu sistemlerde de mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlamaktadır. Bu amaçla uyumlaştırıcılar kullanılmaktadır. PP ve PBT arasındaki arayüzey bağlanmasını makro seviyede incelemek ve aralarındaki bağlama derecesini belirlemek için 2'şer milimetrelilik PP ve PBT plakaları 4 mm' lik kalıp içinde preslenerek bağlanmıştır.

Bağlanmayı arttırmak için PP ile PBT arasına uyumlaştırıcılar ince bir tabaka halinde (TL) ve PP ile uyumlaştırıcılar harmanlanarak kullanılmıştır. Oluşan bağlantılar bindirmeli-kayma, tabakalar arası kayma ve eğme deneyleri yapılarak makro düzeydeki bağlanma ölçülmüştür.

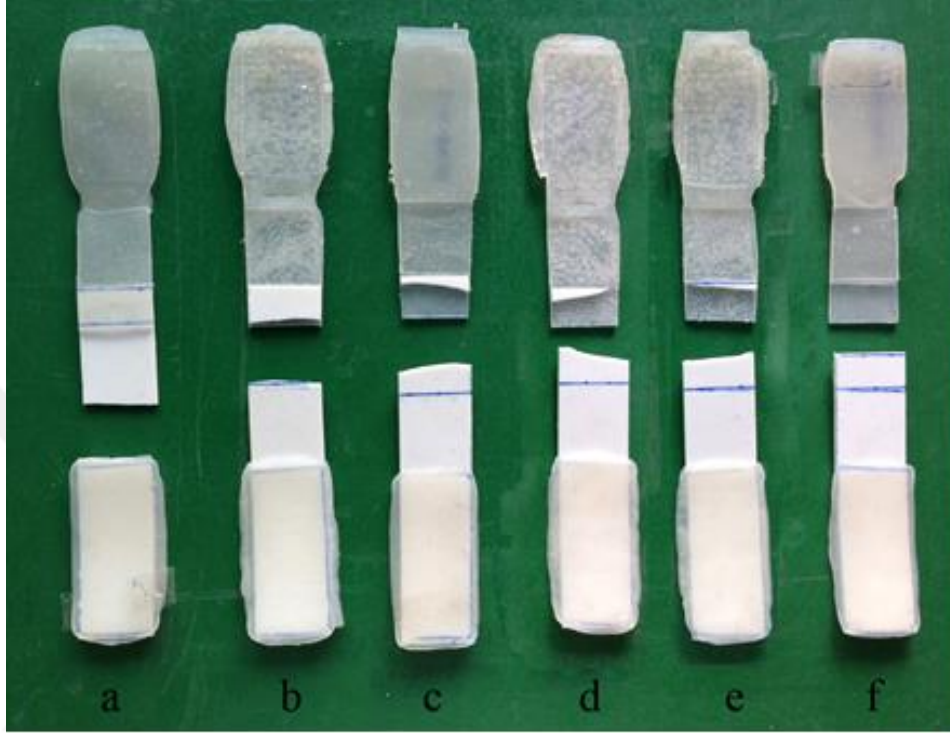
Şekil 8.37’ da U4 uyumlaştırıcısı ile üretilmiş numunelerin bindirmeli-kayma dayanımları görülmektedir. PP/U4-TL/PBT uyumlaştırıcının ayrı bir tabaka olarak kullanıldığı grubu oluştururken, PP/U4-50/PBT, PP/U4-40/PBT, PP/ U4-30/PBT, PP/ U4-20/PBT ve PP/ U4-10/PBT sırasıyla %50, %40, %30, %20 ve %10 oranlarında uyumlaştırıcı ile harmanlanmış PP plaka ile PBT bağlantısından oluşan numune gruplarıdır. PP/U4-TL/PBT, 1,094 MPa ile en yüksek dayanım değerini göstermiştir.



Şekil 8.37 PP/U4/PBT bağlantılarının bindirmeli-kayma dayanımları

PP/U4-50/PBT, PP/U4-40/PBT, PP/ U4-30/PBT, PP/ U4-20/PBT ve PP/ U4-10/PBT ise sırasıyla 0,952 MPa, 0,676MPa, 0,519 MPa, 0,210 MPa ve 0,020 MPa bindirmeli-kayma dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Burada uyumlaştırıcı oranı azaldıkça değerlerin düştüğü ciddi oranlarda düştüğü görülmüştür. Bu harmanlanmış PP plakası ile PBT plakası arasındaki bağlanmanın da uyumlaştırıcı içeri ile düştüğü sonucu çıkartılmıştır.

%10 uyumlaştırıcı içeriğinde ise iki plaka arasında neredeyse hiç bağlantının olmadığı sifıra yakın çıkan dayanım değerinden anlaşılmıştır. Şekil 8.38’ de bu numunelerin kırık görüntülerinden örnekler yer almaktadır. Bu şekilde görülen beyaz kısımlar PBT, opak kısımlar ise PP’ dir.



Şekil 8.38 PP/U4/PBT bağlantılarının kırık görüntüleri: a) TL, b) %50, c) %40, d) %30, e) %20, f) %10

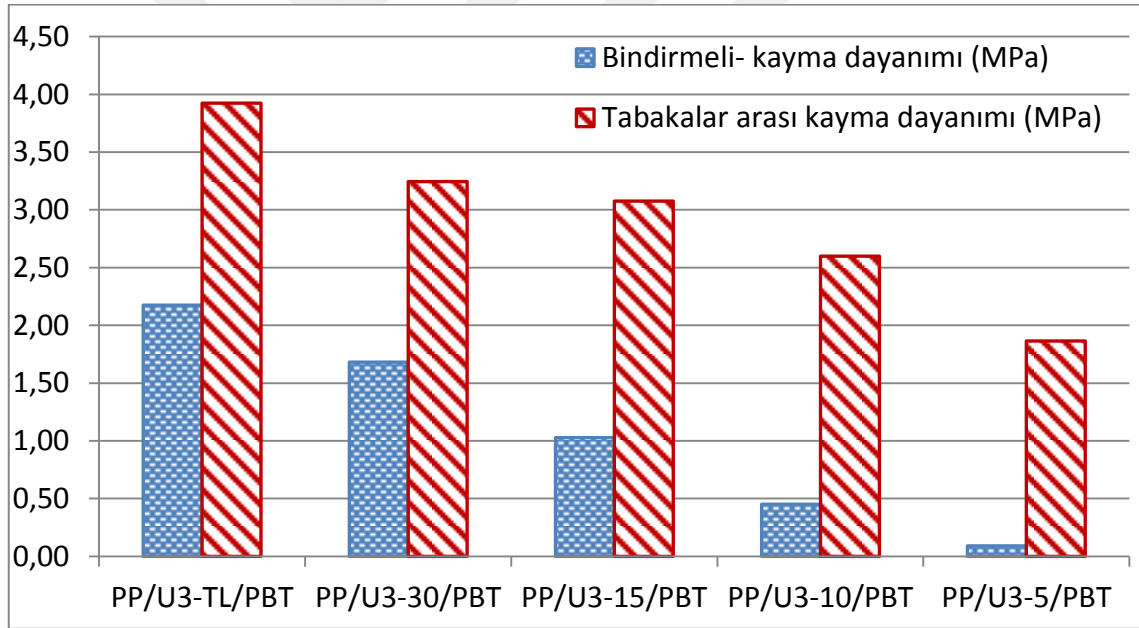
En yüksek bindirmeli-kayma dayanımı gösteren PP/U4-TL/PBT’ de Şekil 8.38.a’ da görüldüğü üzere bağlantı noktası olan birdirme bölgesinde hiçbir deformasyon izine rastlanmamıştır. Bu numunede kopma, birdirme bölgesinin çok dışında, PBT plakada meydana gelmiştir. Buradan %100 U4 uyumlaştırıcısını tabaka şeklinde içeren numunelerde mükemmel yakın bir bağlantının olduğu söylenebilir. Bu numune grubu dışındaki tüm gruplarda kopma bindirmeli bağlantı bölgesi içinde olmuştur.

Şekil 8.38.b’ de görülen PP/U4-50/PBT numunesinde ise kopma bağlantı bölgesini hemen dışındaki bir bölgede gerçekleşmekle birlikte çok az bir kısım bindirme bağlantı bölgesinden kopmuştur. Tabakalı (TL) bağlantı numunesinden sonra hem en yüksek dayanım değerini veren hem de en fazla bağlantı sağlayan bu numune grubu olduğu belirlenmiştir.

%40, %30, %20 uyumlaştırıcı içeren numunelerde ise kopma yine bindirmeli bağlantı bölgesinde gerçekleşmiştir. Düşen uyumlaştırıcı oranıyla azalan bir tutunma olduğu bindirme bölgesinde kalan PBT plakası parçasının alanının azlığından anlaşılmaktadır.

PP/ U4-10/PBT’ da ise hasar bindirmeli bağlantı bölgesinde gerçekleşmesine rağmen kopma olmamıştır. Çünkü iki plaka arası bağlantı o kadar yetersizdir ki çok düşük bir yüklemde iki plaka birbirinden ayrılmıştır. Bindirme bölgesinde de hiçbir deformasyon izi görülmemesi plakaların hiç zorlanmadan ayrıldığını göstermektedir.

TS EN ISO 10365’ e göre [112] PP/U4-TL/PBT grubundaki hasar türü “altlık hasarı”dır ve kopmanın bağlanma bölgesi dışında gerçekleşmesinden dolayı PP ile PBT’ nin çok iyi bağlandığını göstermektedir. Diğer tüm gruplarda (harmanlı gruplar) gerçekleşen hasar bağlanma türü “bağlayıcı hasarıdır”. Bu türde bağlanma eksikliğinden dolayı hasar bağlanma bölgesinde gerçekleşmektedir.



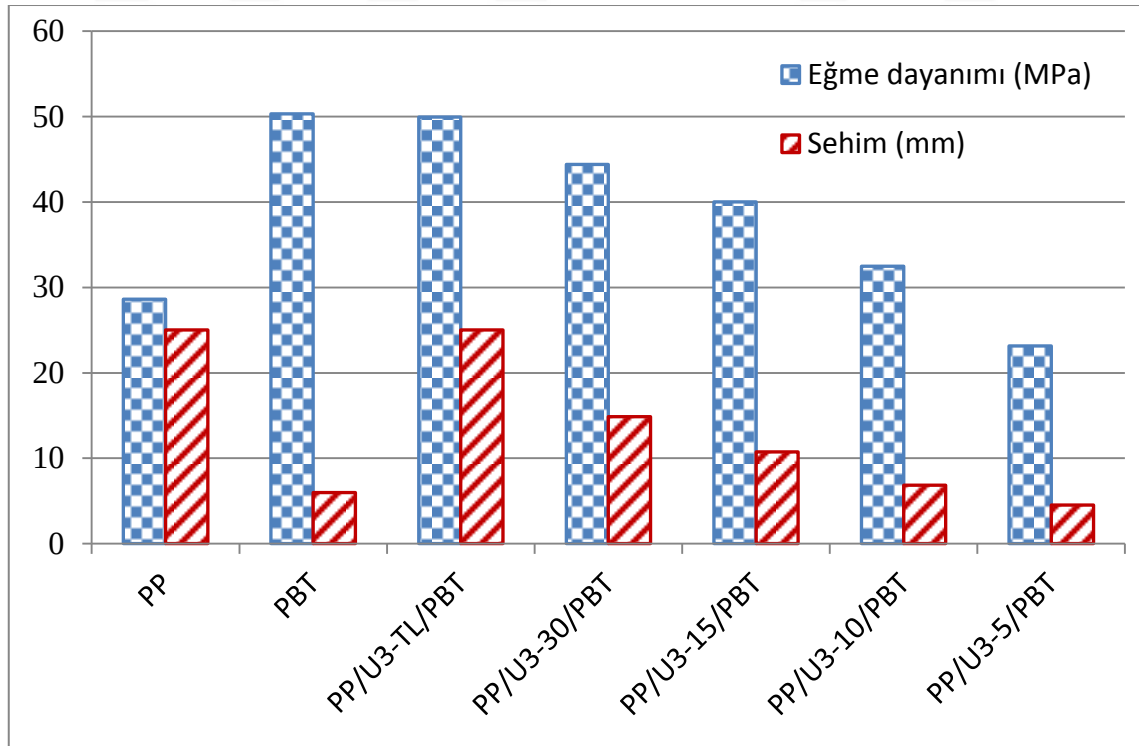
Şekil 8.39 PP/U3/PBT bağlantılarının bindirmeli-kayma ve tabakalar arası kayma dayanım değerleri

PP ile PBT plakaları arasında bağlantıyı sağlamak için U3 uyumlaştırıcısı da kullanılmıştır. Şekil 8.39’ de bu bağlantıların bindirmeli-kayma ve tabakalar arası kayma testi sonuçları görülmektedir. PP/U3-TL/PBT, PP/U3-30/PBT, PP/U3-15/PBT, PP/U3-10/PBT, PP/U3-5/PBT gruplarının bindirmeli-kayma dayanım değerleri sırasıyla 2,17 MPa, 1,68 MPa, 1,03 MPa, 0,45 MPa, 0,09 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerler U4

uyumlaştırıcı ile kullanılarak üretilen numunelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında U3' lü numunelerin çok daha yüksek değerler verdiği görülmektedir. TL' li numuneler bazında karşılaştırıldığında U3' lü numune iki kat daha yüksek dayanımdadır. Harmanlı numunelerde ise daha az oranlarda U3 kullanılmasına rağmen çok daha yüksek veriler elde edilmiştir. Bu nedenle diğer deneylerde U3 uyumlaştırıcısı ile devam edilmiştir.

Tıpkı U4' lü numune gruplarında olduğu gibi ayrı bir uyumlaştırıcı tabakasının bulunduğu PP/U3-TL/PBT' de en yüksek bindirmeli-kayma dayanımı bulunmuşken, harmanlı olan gruplarda U3 oranı azaldıkça dayanım değerleri azalmıştır. PP/U3-5/PBT' de ise sıfıra yakın bir değer elde edilmiştir ki bu da bağlanmanın bu grupta hiç gerçekleşmediğini göstermektedir.

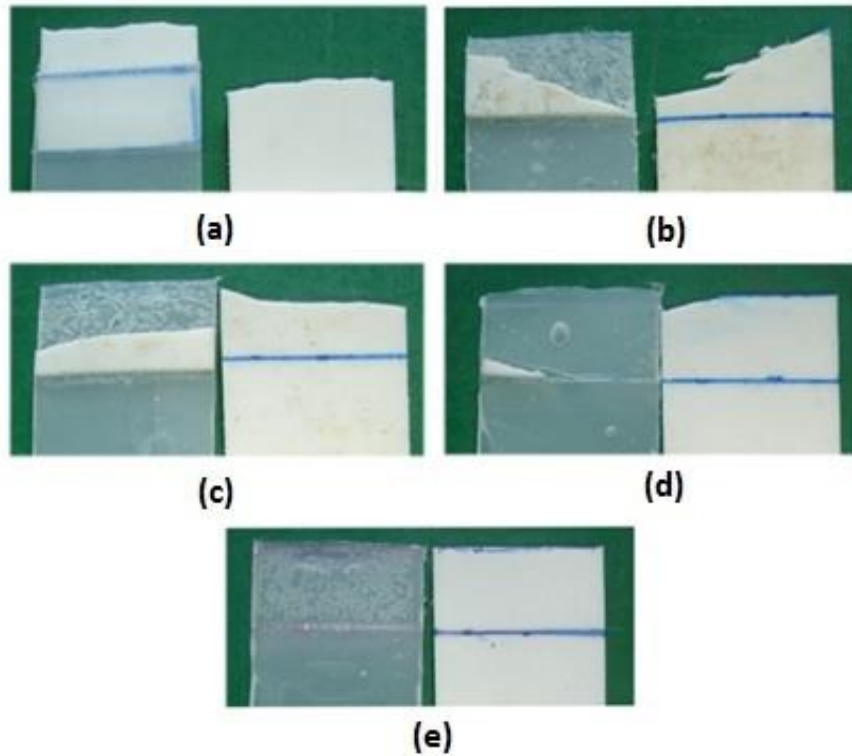
Şekil 8.39' de görülen diğer veri ise numune gruplarının tabakalar arası kayma dayanımıdır. En yüksek değere 3,92 MPa ile PP/U3-TL/PBT' de ulaşılmıştır. PP/U3-30/PBT, PP/U3-15/PBT, PP/U3-10/PBT, PP/U3-5/PBT gruplarında ise sırasıyla 3,24 MPa, 3,08 MPa, 2,60 MPa, 1,86 MPa değerleri bulunmuştur. Tabakalar arası kayma dayanımı sonuçlarının, bindirmeli-kayma dayanımı sonuçlarıyla orantılı şekilde düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 8.40 PP/U3/PBT bağlantılarının eğme dayanımı ve sehim değerleri

Şekil 8.40' de saf PP, saf PBT ve U3 uyumlaştırıcılı bağlantıların eğme testi sonuçları görülmektedir. PP, PBT, PP/U3-TL/PBT, PP/U3-30/PBT, PP/U3-15/PBT, PP/U3-10/PBT, PP/U3-5/PBT' den alınan eğme dayanımı sonuçları sırasıyla 28,62 MPa, 50,32 MPa, 49,93 MPa, 39,99 MPa, 32,46 MPa, and 23,14 MPa' dır. Sehim değeri ise sırasıyla 25 mm, 5.99 mm, 25 mm, 14.84 mm, 10.74 mm, 6.85 mm, and 4.51 mm' dir. Ancak bu testlerde PP ve PP/U3-TL/PBT' de hasar gerçekleşmemiştir.

Eğme testi sonuçlarından da görülmektedir ki en iyi sonuçlar yine PP/U3-TL/PBT' de ulaşılmıştır. Bu grupta bileşenlerinden yüksek dayanımda olan PBT' ye yakın sonuçlar alınırken, sehim değerleri de PP kadar yüksek olduğu bulunmuştur. Bu da TL grubu numunelerde bağlanmanın mükemmel olduğu bir kez daha göstermektedir. Bu büyük olasılıkla PP ile PBT arayüzeyine %100 U3' ün etki etmesinden dolayıdır. Harmanlanmış gruplarda ise uyumlaştırıcı azalışı ile birlikte hem eğme dayanımı hem de sehim azalmıştır.



Şekil 8.41 PP/U3/PBT bağlantılarının kırık görüntüleri: a) TL, b) %30, c) %20, d) %10, e) %5

Şekil 8.41’ de U3 uyumlaştırıcılı numunelerin bindirmeli-kayma testi sonrası kırık görüntüleri verilmiştir. Bunlarda da Şekil 8.30’ daki U4 uyumlaştırıcılı numunelerdeki benzer görüntüler alınmıştır. TS EN ISO 10365’ e göre [112] PP/U3-TL/PBT grubundaki hasar türü, PP/U4-TL/PBT’ dekine benzer şekilde “altlık hasarı” dır ve kopmanın bağlanma bölgesi dışında gerçekleşmesinden dolayı PP ile PBT’ nin çok iyi bağlandığını göstermektedir. Harmanlı diğer tüm gruplarda gerçekleşen hasar bağlanma türü “bağlayıcı hasarıdır”. Bu türde bağlanma eksikliğinden dolayı hasar bağlanma bölgesinde gerçekleşmektedir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada PE ve PP matrislerin aminosilan kaplı E-camı, basalt ve aramid fiberlere bağlanma dayanımını arttırmak ve bu kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için gerçekleştirilmiştir. Bu bağlanmanın artırılması için matrise MAH (maleik anhidrit) ve EMA-GMA (etilen, metil akrilat ve glisil metakrilat) gibi fonksiyonel gruplar ilave edilmesinin etkili olduğu belirlenmiş ve bu uyumlaştırıcılar çeşitli proseslerle uygulanmıştır. A grubu proste sadece matris ve fiberlerden oluşan kontrol grubu numuneler oluşturulmuştur. B grubu proste uyumlaştırıcı fiber ve matris arasında ayrı bir katman şeklinde uygulanmıştır. C grubunda ise matris uyumlaştırıcı ile harmanlanarak kullanılmıştır.

Akışkanlık, yani düşük viskozite kompoziti oluşturan matris malzemelerinde büyük öneme sahiptir. Yüksek akışkanlık polimerin fiberleri daha iyi ıslatıp sarmasını ve bu öylece fiber-matris arayüzey oluşumunu arttırmaktadır. Bu nedenle matriste kullanılan hammaddelerin ergiyik akış hızı (MFR) değeri ölçülmüştür. Buna göre kullanılan uyumlaştırıcıların matris malzemeleri olan HDPE ve PPRC' in akışkanlıklarını arttırdığı görülmüştür. Aynı zamanda uyumlaştırıcı oranının artmasıyla da akışkanlıklar artmıştır. HDPE' de yapılan ölçümler sonucu U2, U1' den daha fazla akışkanlık sağlamıştır. Benzer şekilde PPRC' de U4, U1' e göre çok daha yüksek akışkanlık değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

Matris ve uyumlaştırıcı malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesi için ayrıca diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) eğrileri elde edilmiştir. Burada U4 haricindeki tüm uyumlaştırıcıların matris malzemelerinden daha düşük ergime sıcaklığı ve ergime entalpisine sahip olduğu belirlenmiştir. Uyumlaştırıcı harmanlarında ise uyumlaştırıcı oranı içeriği ile orantılı olarak bu değerlerde düşme görülmüştür. Bu sayede uyumlaştırıcıların saf matristen daha kolay bir şekilde ergiyip, fiberlerin etrafını sardığı sonucuna varılmıştır.

Üretilen numunelere çekme testi uygulandığında; tüm numunelerde kopma yüklemeye dik, yaklaşık 90° açıda meydana geldiği gözlenmiştir. Söz konusu kopmalar ani şekilde gerçekleşen gevrek karakterli kopmalardır. Bunlar çekme gerilme-gerinim grafiklerinde elastik bölgede gerçekleşmiştir. Termoplastik matris her ne kadar sünek özellik gösterse de, takviye elyafların aşırı gevrek yapıda olması kompozitin gevrek kopma sergilemesine neden olmuştur. Özellikle bu gevrek davranış yüksek fiber hacim oranlı numunelerde daha dik gerilme-gerinim eğrilerinin oluşmasını sağlamıştır.

E-camı fiber ve basalt fiberli kompozitlerde benzer sonuçlar alınmış. Ancak basalt fiber daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir malzeme olduğundan bunlarda görece daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. HDPE ve PPRC kompozitlerde beklendiği üzere en düşük değerler uyumlaştırsız A grubu numunelerden elde edilmiştir. PP' li kompozitler PE' li kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler sergilemiştir. Bu fark, takviyenin yüzeyindeki PP' ye uygun silan kaplamadan, görece yüksek vizkoziteli HDPE'in takviyeyi yeterince ıslatamamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca kullanılan fiberler PP uyumlu silan kaplı olduğundan PP matrise daha bağlanmayı sağlamaktadır.

B grubu katmanlı numunelerde %100 uyumlaştırıcı doğrudan fiber-matris arayüzeyine temas ettiği için katman uygulamasının sürekli elyafli kompozit üretiminde harmanlamadan daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmüştür. B grubunda HDPE kompozitlerde U2, PPRC kompozitlerde U4 daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni bu uyumlaştırıcıların diğerlerine kıyasla daha yüksek MFR değerine sahip olmasıdır.

C grubu harmanlı numuneler, A grubunun belirli bir miktar iyileşmesini sağlamıştır. Bunlar içinde ise yine MFR değeri yüksek olanlar HDPE' de U2 uyumlaştırıcısı, PPRC' de

U4 daha iyi sonuçlar kazandırmıştır. Ancak burada PPRC' nin E-camı ile takviyelendirilmesinde bir istisna yaşanmış ve U3' lü alt gruptan daha yüksek sonuçlar alınmıştır. Burada U4' ün daha yüksek ergime entalpisi ve ergime sıcaklığına sahip olmasından dolayı harmanın ergimesi sırasında bir ayrışma yaşanıp, önce ergiyen PPRC' nin fiberleri kaplaması ihtimali ortaya çıkmıştır. Böylece daha düşük bağlanma kabiliyetine sahip PP ile fiber yeterli performansı sergileyememiş olabilir. Ancak SEM görüntülerinde söz konusu faz ayrışmasına dair bir ipucu yakalanamamıştır.

C gruplarındaki uyumlaştırıcı etkisi incelendiğinde elastisite modülü bakımından %30 uyumlaştırıcı içeriğinde, %15' e göre yükselme gözlenirken; uzama bakımından düşme görülmüştür. Uyumlaştırıcıların genel olarak uzama değerleri daha yüksek olmasına uzamaların uyumlaştırıcı oranı artışı ile artması beklenmektedir. Ancak bu gruplarda muhtemelen daha iyi bir fiber-matris tutunması yaşanmış ve bu da fiberlerin sıyrılmasını önlediğinden kompozit daha az uzamıştır.

Yoğunluk sonuçlarına göre tüm gruplarda benzer gözenek miktarı tespit edilmiştir. Dolayısıyla kullanılan farklı malzemelerin gözenek oluşumu üzerinde bir etkiye yol açmadığı ve bu gözeneklerin üretim yönteminden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Mikroskobik incelemelerde A grubundaki yapışma eksikliği büyük oranda görülmüştür. Yapışma izleri B ve C gruplarında, kırık fiberin etrafına sarmış haldeki polimer kalıntıları şeklinde kendini göstermiştir. Bu gözlemler mekanik sonuçları destekler nitelikte bulunmuştur.

Sürekli aramid fiber takviyeli HDPE kompozitler çeşitli uyumlaştırıcı katmanı sayısı ve türü uygulanarak üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin özellikleri T-soyulma, bindirmeli-kayma ve çekme testleri ile belirlenmiştir. Fiber-matris arayüzeyinde uyumlaştırıcı katmanı kullanımı HDPE matriste yapışmayı arttırmıştır. Her iki uyumlaştırıcı türünde de dört adet uyumlaştırıcı katmanı içeren kompozitler daha iyi mekanik özellikler sağlamıştır. Dört adet EMA-GMA içeren kompozit, MAH'lı tüm kompozitlerden daha iyi kayma ve çekme dayanımı göstermiştir. Test sonuçlar karşılaştırıldığında aralarında kuvvetli bir ilişki olduğu gözlenmiştir. MAH'lı kompozitlerde "adhesif" hasar gözlemlerinken, EMA-GMA'lı kompozitlerde "kohesif" hasar türü gözlemlenmiştir.

In-situ mikrofibrilli kompozitlerde de fibril-matrsi arası bağlanma oldukça önemlidir. Bu nedenle PP ve PBT arasındaki arayüzey bağlanmasını makro seviyede incelemek ve aralarındaki bağlama derecesini bulmak için birdirmeli-kayma, tabakalar arası kayma ve eğme deneyleri yapılmıştır. Bağlanmayı arttırmak için PP ile PBT arasına uyumlaştırıcılar ince bir tabaka halinde ve PP ile uyumlaştırıcılar harmanlanarak kullanılmıştır. U3 ve U4 uyumlaştırıcıları denemiş ve burada en iyi sonuçları U3' ün verdiği bulunmuştur. %100 uyumlaştırıcı katmanı içeren yapı en yüksek değerleri verirken; harmalamada uyumlaştırıcı oranı düştükçe mekanik değerler de azalmıştır. Uyumlaştırıcı tabakası içeren yapıda “altlık hasarı” görülmüş ve kopmanın bağlanma bölgesi dışında gerçekleşmesinden dolayı PP ile PBT' nin çok iyi bağlandığını belirlenmiştir. Harmanlı diğer tüm gruplarda gerçekleşen hasar bağlanma türü “bağlayıcı hasarıdır”. Bu türde bağlanma eksikliğinden dolayı hasar bağlanma bölgesinde gerçekleşmektedir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Toldy, A., Szolnoki, B. ve Marosi, G.Y., (2011). "Flame Retardancy of Fibre-Reinforced Epoxy Resin Composites for Aerospace Applications", *Polym Degrad Stab*, 96:371-376.
- [2] Vieille, B., Albouy, W., Chevalier, L. ve Tale, L., (2013). "About the Influence of Stamping on Thermoplastic-Based Composites for Aeronautical Applications", *Composites Part B Engineering*, 45:821-834.
- [3] Fiore, V., Di Bella, G. ve Valenza, A., (2011). "Glass-Basalt/Epoxy Hybrid Composites for Marine Applications", *Mater Des*, 32:2091-2099.
- [4] Hufenbach, W., Bohm, R., Thieme, M., Winkler, A., Mader, E., Rausch, J. ve ark., (2011). "Polypropylene/Glass Fibre 3D-Textile Reinforced Composites For Automotive Applications", *Mater Des*, 32:1468-1476.
- [5] Pendhari, S.S., Kant, T. ve Desai, Y.M., (2008). "Application of Polymer Composites In Civil Construction: A General Review", *Compos Struct*, 84:114-124.
- [6] Kumosa, L., Kumosa, M. ve Armentrout, D., (2003). "Resistance to Stress Corrosion Cracking of Unidirectional ECR-Glass/Polymer Composites for High Voltage Composite Insulator Applications", *Composites Part A*, 34:1-15.
- [7] Mathieu, R., René, R. ve Benmokrane, B., (2010). "Environmental Effects on Glass Fibre Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composite Laminate for Structural Applications", *Polym Compos*, 31(4):604-611.
- [8] Hugo, A.M., Scelsi, L., Hodzic, A., Jones, F. ve Dwyer-Joyce, R.R., (2011). "Development of Recycled Polymer Composites for Structural Applications", *Plast Rubber Compos*, 40(6-7):317-323.
- [9] Huang, X., Ke, Q., Kim, C., Zhong, H., Wei, P., Wang, G., ve ark., (2007). "Non Isothermal Crystallization Behavior and Nucleation of LDPE/Al Nano- and Micro Composites", *Polym Eng Sci*, 47(7):1052-1061.
- [10] Klyosov, A.A., (2007). *Wood-Plastic Composites*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [11] Cornelia, V. ve Pascu, M., (2005). *Practical Guide to Polyethylene*, iSmithers Rapra Publishing, Shropshire, UK.

- [12] Behzad, K., (2012). "Studies on Mechanical Characterization and Water Resistance of Glass fibre/Thermoplastic Polymer Bio Nano Composites", *J Appl Polym Sci*, 123:2391-2396.
- [13] Arrakhiz, F.Z., El Achaby, M., Kakou, A.C., Vaudreuil, S., Benmoussa, K., Bouhfid, R., ve ark., (2012), "Mechanical Properties of High Density Polyethylene Reinforced with Chemically Modified Coir Fibers: Impact of Chemical Treatments", *Mater Des* 37:379-383.
- [14] Ayswarya, E.P., Vidya Francis, K.F., Renju, V.S. ve Thachi, I. E.T., (2012). "Rice Husk Ash-A Valuable Reinforcement for High Density Poly Ethylene", *Mater Des*, 41:1-7.
- [15] Karen, L., Shuying, Y. ve Qiang, Z., (2004). "Rheological Analysis of Vapor-Grown Carbon Nanofiber-Reinforced Polyethylene Composites", *J Appl Polym Sci*, 93(1):155-162.
- [16] McNally, T., Potschke, P., Halley, P., Murphy, M., Martin, D. ve ark., (2005). "Polyethylene Multi Walled Carbon Nanotube Composites", *Polym J*, 46:8222-8232.
- [17] Kord, B. ve Hosseini Kiakojouri, SM., (2011). "Effect of Nano Clay Dispersion on Physical and Mechanical Properties of Wood Flour/Polypropylene/Glass Fibre Hybrid Composites". *BioRes*, 6(2):1741-1751.
- [18] Gellert, E.P. ve Turley, D.M., (1999). "Seawater Immersion Ageing of Glass-Fibre Reinforced Polymer Laminates for Marine Applications", *Composites Part A*, 30:1259-1265.
- [19] AlMaadeed, M.A., Ouederni, M. ve Khanam P.N., (2013). "Effect of Chain Structure on the Properties of Glass Fibre/Polyethylene Composites", *Materials and Design*, 47:725-730.
- [20] Hull, D. ve Clyne, T.W., (1996). *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [21] Leach, D.C., (1989). *Advanced composites*. Elsevier, London, UK.
- [22] Nygard, P. ve Gustafson, C.G., (2004). "Continuous Glass Fiber–Polypropylene Composites Made by Melt Impregnation: Influence of Processing Method", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17:167-184.
- [23] Thomason, J.L., (2002). "The Influence of Fibre Length and Concentration on the Properties of Glass Fibre Reinforced Polypropylene: 5. Injection Moulded Long And Short Fbre PP", *Composites Part A*, 33:1641-1652.
- [24] Nygard, P. ve Gustafson, C.G., (2003). "Interface and Impregnation Relevant Tests for Continuous Glass fibre-Polypropylene Composites", *Composites Part A*, 34:995-1006.
- [25] Hartness, T., Husman, G., Koenig, J. ve Dyksterhouse, J., (2001). "The Characterization of Low Cost Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Produced by DRIFT™ Process", *Composite Part A*, 32:1155-1160.
- [26] Agarwal, B.D., Broutman, L.J. ve Chandrashekhara, K., (2006). *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Wiley, New Jersey, USA.

- [27] Vinson, J.R., Sierakowski, R.L., (2002). The Behavior of Structures Composed of Composite Materials, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- [28] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., (2003). Composite Materials: Design and Applications, CRC Press LLC, Florida, USA.
- [29] Chung, D.D.L., (2010). Composite Materials: Science and Applications, Springer-Verlag London Ltd., London, UK.
- [30] Kelly, A., Zweben C.H., (2000). Comprehensive Composite Materials, Vol. 2: Polymer Matrix Composites, Pergamon Press, Oxford, UK.
- [31] Pinho, S.T., Remmers, J.J.C, Camanho, P.P., Dávila, C.G., (2008). Mechanical Response of Composites, Springer Science + Business Media B.V., Dordrecht, the Netherlands.
- [32] Nielsen, L.E., Landel, R.F., (1994). Mechanical Properties of Polymers and Composites, Marcel Dekker, Inc., Abington, UK.
- [33] Tsai, S.W., (1992). Theory of Composites Design, Think Composites, Dayton, OH, USA.
- [34] Mazumdar S.K., (2001) Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering, CRC PRESS, Florida, USA.
- [35] Peters, S.T., (1998). Handbook of Composites, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- [36] Kaw, A.K., (2006). Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis Group, USA.
- [37] Jones, R.M., (1999). Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis, USA.
- [38] Ersoy, H.Y., (2001). Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [39] Vasiliev, V.V. ve Morozov, E.V., (2001). Mechanics and Analysis of Composite Materials, Elsevier, USA.
- [40] Rosato, D. ve Rosato D., (2004). Reinforced Plastics Handbook, Elsevier Science & Technology Books, USA.
- [41] Horrocks, A.R. ve Anand, S.C., (2000). Handbook of Technical Textiles, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- [42] Atak, S., (2006). "Dokuma Kumaşlarda Son Bitim İşlemleri ve Örgün Eğitim Kurumlarının Tekstil Programlarındaki Durumu", Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [43] Yıldırım, B., (2005). Dokuma Kumaş Mukavemetinin Hammadde Özelliklerinden Tahminlenmesinin Sağlayan Bir Bilgisayar Yazılımının Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- [44] Alagirusamy, R., Fanguero, R., Ogale, V. ve Padaki N., (2006). Textile Progress: Hybrid Yarns and Textile Preforming For Thermoplastic Composites, Taylor & Francis, USA.

- [45] Hull, D., (1981). An Introduction to Composite Materials, The Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [46] Douglas, F.H., (1986). Aircraft Production Technology, The Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK.
- [46] ABD Savunma Bakanlığı Raporu, (1991). Plastic Matrix Composites with Continuous Fiber Reinforcement, Military Handbook, Department of Defense, USA.
- [47] AGY, Teknik Bilgi http://www.agy.com/technical_info/index.htm, 05 Kasım 2013.
- [48] Ekrem, M., (2006). Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- [49] Biron, M., (2007). Thermoplastics and Thermoplastic Composites Technical Information for Plastics Users, Elsevier, USA.
- [50] Broutman, J. ve Krock, R.H., (1967). Modern Composite Materials, Lawrence Addison-Wesley Publishing Company, USA.
- [51] Peacock, A.J., (2000). Handbook of Polyethylene Structures Properties and Applications, Marcel Dekker, Abington, UK.
- [52] Karain, H., (2003). Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Routledge, UK.
- [53] Karger-Kocsis, J., (1999). Polypropylene an A-Z reference, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- [54] Drzal, L.T., (2001). ASM Handbook: Composites, Section: Interfaces and Interphases, ASM International Handbook Committee, USA.
- [55] Yosomiya, R., Morimoto, Y., Nakajima, A., Ikada, Y. ve Suzuki T., (1990). Adhesion and Bonding in Composites, Marcel Dekker, Inc., Abington, UK.
- [56] Drzal, L.T., (1985). Advances in Polymer Science, Springer-Verlag, London, UK.
- [57] Utracki, L. A., (2002). Polymer Blends Handbook, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- [58] Clarke, N., Dudowicz, J., Freed, K.F., SchwahnKarl D., (2005). Phase Behavior of Polymer Blends, Springer, Berlin.
- [59] Di Benedetto, A.T., (1985). "Evaluation of Fiber Surface Treatments In Composite Materials", Pure & Appl Chem., 57(11):1659-1665.
- [60] Lipatov, Y.S., (1995). Polymer Reinforcement, ChemTec Publishing, USA.
- [61] Tugrul, A.B., (1997). Capillarity Effect Analysis for Alternative Liquid Penetrant Chemicals, NDT & E International, Elsevier, USA.
- [62] Bikiaris, D., Matzinos, P., Prinos, J., Flaris, V., Larena, A. ve Panayiotou, C., (2001). "Use of Silanes and Copolymers as Adhesion Promoters Glass Fiber/Polyethylene Composites", Journal of Applied Polymer Science, 80(14):2877-2888.
- [63] Sakamoto, K. ve Oda, O., (2001). "High Strength Polyethylene Fiber", EP1350868.

- [64] Devaux, E. ve Cazé, C. (1999). "Composites of UHMW Polyethylene Fibres in a LD Polyethylene Matrix. I. Processing Conditions", *Composites Science and Technology*, 59:459-466.
- [65] Black, D.E. ve Garrett, D.W., (1984). "A Size for Glass Fibers is Disclosed, The Size Comprising an Oxidized Polyolefin, a Polymeric Film Former and an Organic Acid, Preferably Terephthalic Acid or Isophthalic Acid.", US 4.489.131.
- [66] Mosleha, M., Suhb, N.P. ve Arinez J., (1998). "Manufacture and Properties of a Polyethylene Homocomposite", *Composites Part A*, 29A:611-617.
- [67] Xanthos, M., (1988). "Interfacial Agents for Multiphase Polymer Systems: Recent Advances", *Polym. Engrg. Sci.*, 28:1392-1399.
- [68] Mader, E., Freitag, K.H., (1990). "Interface Properties and their Influence on Short Fibre Composites, *Composites*", 21:397-402.
- [69] Gamstedt, E.K., Berglund, L.A., Peijs, T., (1999). "Fatigue Mechanisms in Unidirectional Glass-Fibre-Reinforced Polypropylene, *Compos. Sci. Technol*", 59:759-768.
- [70] Lin, C.H., (1993). "Modification of Polypropylene by Peroxide-Catalysed Grafting of Maleic Anhydride For Adhesive Bonding: Surface and Interface", *J. Mater. Sci. Lett.*, 12:612-614.
- [71] De Roover, B., Sclavons, M., Carlier, V., Devaux, J., Legras, R. ve Momtaz, A., (1995). "Molecular Characterization of Maleic Anhydridefunctionalized Polypropylene", *J. Polym. Sci. Part A*, 33:829-842.
- [72] Thomason, J.L. ve Schoolenberg, G.E., (1994). "An Investigation of Glass Fibre/Polypropylene Interface Strength and Its Effect on Composite Properties", *Composites*, 25:197-203.
- [73] Liu, Y., Tao, Y., Lv, X., Zhang, Y. ve Di, M.,(2010). "Study on the Surface Properties of Wood/Polyethylene Composites Treated under Plasma", *Applied Surface Science*, 257(3):1112-1118.
- [74] Grubbström, G., Holmgren, A. ve Oksman, K., (2010). "Silane-Crosslinking of Recycled Low-Density Polyethylene/Wood Composites", *Composites Part A*, 41(5):678-683.
- [75] Kim, J.P., Yoon, T.H., Mun, S.P., Rhee, J.M. ve Lee, J.S., (2006). "Wood-Polyethylene Composites Using Ethylene-Vinyl Alcohol Copolymer as Adhesion Promoter", *Bioresource Technology*, 97(3):494-499.
- [76] Fávaro, S.L., Lopes, M.S., Vieira de Carvalho Neto, A.G., Rogério de Santana, R. ve Radovanovic E., (2010). "Chemical, Morphological, and Mechanical Analysis of Rice Husk/Post-Consumer Polyethylene Composites", *Composites Part A*, 41(1): 154-160.
- [77] Yao, F., Wu, Q., Lei, Y. ve Xu, Y., (2008). "Rice Straw Fiber-Reinforced High-Density Polyethylene Composite: Effect of Fiber Type and Loading". *Industrial Crops and Products*, 28(1): 63-72.

- [78] Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N. ve Trada M., (2011). "A Review on the Tensile Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites". *Composites Part B*, 42(4):856-873.
- [79] Liu, S.P. ve Tu L.C., (2011). "Studies on Mechanical Properties of Dispersing Intercalated Silane Montmorillonite in Low Density Polyethylene Matrix", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38:879-886.
- [80] Kakroodi, A.R., Kazemi, Y. ve Rodrigue, D., (2013). "Mechanical, Rheological, Morphological and Water Absorption Properties of Maleated Polyethylene/Hemp Composites: Effect of Ground Tire Rubber Addition", *Composites Part B*, 51:337-344.
- [81] Zhang, Y., Chen, R. ve Hui, Z. (2000). "Effects of the Interfacial Stress-Induced Crystallization on the Matrix Crystalline Morphology and the Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced High Density Polyethylene Composites", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 14(11):1405-1421.
- [82] Chen, J., Wang, Y., Gu, C., Liu, J., Liu, Y., Li, M. ve Lu, Y., (2013). "Enhancement of the Mechanical Properties of Basalt Fiber-Wood-Plastic Composites via Maleic Anhydride Grafted High-Density Polyethylene (MAPE) Addition", *Materials*, 6(6):2483-2496.
- [83] Kord, B., (2011). "Studies on Mechanical Characterization and Water Resistance of Glass Fiber/Thermoplastic Polymer Bionanocomposites", *J. Appl. Polym. Sci.*, 123(4):2391-239.
- [84] Hamada, H., Fujihara, K. ve Harada, A., (2000). "The Influence of Sizing Conditions on Bending Properties of Continuous Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites", *Composites Part A* 31:979-990.
- [85] Nygård, P., ve Gustafson, C.G., (2003). "Interface and Impregnation Relevant Tests for Continuous Glass Fibre-Polypropylene Composites", *Composites Part A*, 34:995-1006.
- [86] Nygård, P., Redford, K. ve Gustafson, C.G., (2002). "Interfacial Strength in Glass Fibre-Polypropylene Composites: Influence Of Chemical Bonding and Physical Entanglement", *Composite Interfaces*, 9(4): 365-388.
- [87] Karsli, N.G. ve Aytac, A., (2011). "Effects of Maleated Polypropylene On The Morphology, Thermal and Mechanical Properties of Short Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Composites", *Materials and Design*, 32:4069-4073.
- [88] Miller, A.H., Dodds, N., Hale, J.M.ve Gibson A.G., (1998). "High Speed Pultrusion of Thermoplastic Matrix Composites", *Composites Part A*, 29:773-782.
- [89] Carisson, A. ve Aström, B.T., (1998). "Experimental Investigation of Pultrusion of Glass Fibre Reinforced Polypropylene Composites", *Composites Part A*, 29:585-593.
- [90] Velde, K.V.ve Kiekens, P., (2001). "Thermoplastic Pultrusion of Natural Fibre Reinforced Composites", *Composite Structures*, 54:355-360.
- [91] Salomi, A., Garstka, T., Potter, K., Greco, A. ve Maffezzoli, A., (2008). "Spring-In Angle as Molding Distortion for Thermoplastic Matrix Composite", *Composites Science and Technology*, 68:3047-3054.

- [92] Haffner, S.M., Friedrich, K., Hogg, P.J. ve Busfield, J.J.C., (1998). "Finite Element Assisted Modelling of the Microscopic Impregnation Process in Thermoplastic Preforms", *Applied Composites Materials*, 5:237-255.
- [93] Kim, D.H., Lee, W.I. ve Friedrich, K., (2001). "A Model for a Thermoplastic Pultrusion Process Using Commingled Yarns", *Composites Science and Technology*, 61:1065-1077.
- [94] Wilson, M. Ve Buckley, J.D., (1994). "The Potential for Low Cost Thermoplastic Pultrusion", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 13:1595-1598.
- [95] Tomlinson, W. J. ve Holland, J. R., (1993). "Pultrusion and Properties of Unidirectional Glass Fibre-Polypropylene Matrix Composites", *Journal of Materials Science Letters* 13(9):675-677.
- [96]Cartz, L., (1995). *Nondestructive Testing*, ASM International, USA.
- [97] Cheremisinoff, N.P. ve Cheremisinoff, P.N., (1995). *Fiberglass Reinforced Plastics*, Noyes Publications, USA.
- [98] Friedrich, K., Fakirov, S. ve Zhang, Z., (2005). *Polymer Composites: From Nano-To-Macro-Scale*, Springer Science+Business Media, USA.
- [99] Strong, A.B., (2008). *Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods, and Applications (2. Edition)*, Society of Manufacturing Engineers, USA.
- [100] Vasiliev, V.V. ve Morozov, E.V., (2007). *Advanced Mechanics of Composite Materials, (2. Edition)*, Elsevier, USA.
- [101] Staab, G.H., (1999). *Laminar Composites*, Butterworth-Heinemann, USA.
- [102] Adams, D.F., (2000). *Comprehensive Composite Materials Volume 5: Test Methods, Nondestructive Evaluation, and Smart Materials, Test Methods for Mechanical Properties*, Elsevier, USA.
- [103] TS EN ISO 527-5, (2009). *Plastikler - Çekme Özelliklerinin Tayini - Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler için Deney Şartları*
- [104] ASTM D 3039, (2008). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*
- [105] TS EN ISO 178, (2010). *Plastikler- Eğilme Özelliklerinin Belirlenmesi*
- [106] TS EN ISO 14130, (1997). *Plastik Kompozitler - Elyaf Takviyeli - Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti - Kısa Kiriş Metodu*
- [105] TS EN ISO 11339, (2010). *Yapıştırıcılar - Birbirine Yapıştırılmış İki Esnek Parça İçin T Sıyırma Deneyi*
- [106] TS EN 1465, (2009). *Yapıştırıcılar - Bindirmeli Sistemlerin Ayrılma Dayanımının Tayini*
- [107] TS 1177 EN ISO 1172, (1998). *Tekstil - Cam Takviyeli Plâstikler - Prepregler, Kalıplama Hamurları ve Lâminantlar - Tekstil - Cam ve Mineral Dolgu Muhtevasının Tayini Kalsinasyon Metotları*

- [108] TS EN ISO 1183-1, (2012). Gözeneksiz Plastikler - Yoğunluk Tayin Metotları - Bölüm 1: Daldırma Metodu, Sıvı Piknometre Metodu ve Titrasyon Metodu
- [109] ASTM D1238, (2013). Standard Test Method For Melt Flow Rates Of Thermoplastics by Extrusion Plastometer
- [110] TS EN ISO 1133-1, (2011). Plâstikler - Erimiş Termoplâstiklerin Kütlesel Akış Hızının (MFR) ve Hacimsel Akış Hızının (MVR) Tayini -Bölüm 1: Standard Yöntem
- [111] TS EN ISO 11357-3, (2013). Plâstikler- Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)- Bölüm 3: Kristalleşme ve Erime Entalpisi Ve Sıcaklığının Belirlenmesi
- [112] TS EN ISO 10365, (2001). Yapıştırıcılar- Başlıca Kusurların Gösterilmesi



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Aylin BEKEM
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1984 - İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : aylinaltinbay@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Metalurji ve Malzeme Müh.	Yıldız Teknik Üniv.	2008
Lisans	Metalurji ve Malzeme Müh.	Yıldız Teknik Üniv.	2005
Lise		Özel Tercüman Lisesi	2001

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2007-...	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Tuğçegül Gümölcine, Aylin Bekem, Mustafa Doğu, Zafer Gemici, Ahmet Ünal, "İzoftalik Polyester Matrisli Sürekli E-Camı ve Bazalt Fiber Takviyeli Kompozitlerin

Mekanik Özellikleri Üzerine Deneysel Bir Çalışma”, YTÜ Sigma Dergisi, 2013, Cilt: 5, Sayı: 1, sf. 104-115.

2. Nilüfer Evcimen Duygulu, Aylin Bekem, “Isıl İşlemin Emaye Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi”, Türkiye Seramik Federasyonu Dergisi, Temmuz-Ekim 2013, Sektör: 43, sf.140-149.
3. D.Gülfem Baydar, Aylin Bekem, Mustafa Doğu, Zafer Gemici, Ahmet Ünal, “Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, YTÜ Sigma Dergisi, 2012, Cilt: 30, Sayı: 2, sf. 120-132.
4. Zeynep Alkan, Engin Acioglu, Ozgür Yigit, Aylin Bekem, Elad Azizli, Ahmet Unal, Feyzi Sahin, “Determining the Most Suitable Costal Cartilage Level for Rhinoplasty: An Experimental Study”, Otolaryngol Head Neck Surg. 2012 Mar;146(3):377-81.
5. Zeynep Alkan, Ozgür Yigit, Engin Acioglu, Aylin Bekem, Elad Azizli, Ismail Kocak, Ahmet Unal, Yalcın Buyuk, “Tensile Characteristics of Costal and Septal Cartilages Used as Graft Materials”, Arch. Facial Plast. Surg. 2011; 13: 322-326.

Uluslararası Bildiri

1. Aylin BEKEM, Ayse Begum Balım BAS, Mustafa DOĞU, Ahmet UNAL, “Investigation of Bonding Between PBT and PP via Lap-Shear Test”, Advanced Material World Congress (AMWC2013), Çeşme, İzmir, 19-16 September 2013. (Sözlü Bildiri)
2. Aylin Bekem, Mustafa Dogu, Zafer Gemici, Ahmet Unal, “Investigation of Mechanical Properties of Aramid Fiber Reinforced HDPE Composite”, 9th International Conference on Composite Science (ICCST9), Sorrento, Italy, 24-26 April 2013.
3. Ahmet Unal, Aylin Bekem, Ali Rifat Unal, M. Hilmi Guler, “Determination of the Effects of Recycling on Polyolefin Matrix Composites”, 9th International Conference on Composite Science (ICCST9), Sorrento, Italy, 24-26 April 2013.
4. A.Ünal, A. Bekem, M. Doğu, Z. Gemici, D.G. Baydar, “A Novel Lifetime Determination Method for Prepreg-Wound PE Composite Pipes Under Internal Pressure”, 16th International Conference on Composite Structures (ICCS16), Porto, 28-30 June 2011. (Sözlü Bildiri)
5. A. Bekem, M. Doğu, Z. Gemici, D.G. Baydar, A. Ünal, “Investigation of Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Thermoplastic Composites”, 16th International Conference on Composite Structures (ICCS16), Porto, 28-30 June 2011. (Sözlü Bildiri)
6. Alkan Z., Server E.A., Yiğit O., Acioglu E., Bekem A., Ünal A., Akkin SM., “The comparison of biomechanical properties of glass ionomer cement for repair of incudostapedial joint discontinuity of two different diameters: Experimental study”, Joint Meeting of Anatomical Societies, Bursa, 19-22 May 2011. (Poster)
7. A. Altinbay, Z. Gemici, M. Dogu, A. Unal, “Investigation of hot-air welding parameters of polyethylene homocomposites”, 14th European Conference on Composite Materials, Budapest, 7-10 June 2010. (Sözlü Bildiri)

8. Şardan B., Altınbay A., Ünal A., “Effect of discontinuous fiber on mechanical properties of a particle filled three component composite”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye. (Sözlü Bildiri)
9. Ekerim A., Altınbay A., Evcimen N., “Effect of Composition and Heat Treatment to Mechanical Properties on Cast Steels”, 14.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 16-18 Ekim 2008, İstanbul, Türkiye. (Sözlü Bildiri)

Ulusal Bildiri

1. D.G. Baydar, A. Bekem, T. Gümölcine, A. Ünal, M.Doğu ve Z. Gemici, “Polipropilen Matrisli Kompozitlerde Maleik Anhidrit Aşılı Uyumlaştırıcı İlavesinin Kırılma Davranışlarına Etkisi”, UKK 9, İstanbul, 19-21 Ekim 2011. (Sözlü Bildiri)
2. A. Bekem, D. G. Baydar, T. Gümölcine, A. Ünal, Z. Alkan Çakır, Ö. Yiğit, F. Şahin, M. Doğu, Z. Gemici, “Rinoplasti Cerrahisinde Septal Kartilaj Yerine Kullanılabilecek Kostal Kartilajların Kırılma Davranışlarının İncelenmesi”, UKK 9, İstanbul, 19-21 Ekim 2011. (Sözlü Bildiri)
3. Zeynep Alkan Çakır, Engin Acioğlu, Özgür Yiğit, Aylin Altınbay, Elad Azizli, Ahmet Ünal, Feyzi Şahin, “Septal Kartilajın Biyomekanik Özelliklerine Uygun Kostal Kartilaj Seçimi ile İlgili Deneysel Bir Çalışma”, 7. Türk Rinoloji Kongresi, Antalya, 19-22 Mayıs 2011. (Sözlü Bildiri, Sözel Bildiri 2.’lik Ödülü)
4. H. Ercan, A. Bekem, M. Doğu, A. Ünal, “Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Tahribatsız Muayeneleri ve Tamiri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), Elazığ, 16-18 Mayıs 2011. (Poster)
5. A. Bekem, H. Ercan, M. Doğu, A. Ünal, “Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), Elazığ, 16-18 Mayıs 2011. (Sözlü Bildiri)
6. Z. Alkan Çakır, Ö. Yiğit, E. Acioğlu, A. Altınbay Bekem, E. Azizli, İ. Koçak, A. Ünal, Y. Büyük, “Graft Materyeli Olarak Kullanılan Kostal ve Septal Kartilajların Biyomekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması”, 32. Türk Ulusal Kulak Burun Boğaz ve Baş Cerrahisi Kongresi, Antalya, 27-30 Ekim 2010. (Sözlü Bildiri)
7. A. Altınbay, M. Doğu, Z. Gemici, A. Ünal, “Sürekli E-Cam Fiber Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozitlerde Arayüzey Yapışmasının Mekanik Özelliklere Etkisi”, III. Ulusal Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi, Mayıs 2010. (Sözlü Bildiri)

Proje

1. “Melez İplikli Termoplastik Kompozit Boru Bağlantı Elemanlarının Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretimi ve Modelleme Teknikleri Kullanılarak Hatasız Ürün Geliştirilmesi” SAN-TEZ 01549.STZ.2012-2 no’lu proje
2. “Kompozit Peletlerden Demir Tanesi Üretiminde Redükleyici Olarak Plastik Atık Kullanımının Araştırılması”, KAP, Proje No: 2011-07-02-KAP02.

3. “Elyaf Takviyeli Termoplastik Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu”, DOP, Proje No: 2011-07-02-DOP02.
4. “Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Boru Üretimi” TÜBİTAK 1501-3080574 no’lu proje.

